

## **Regulación e Hidrógeno Verde en la Transición Energética Mexicana**

### **Regulation and Green Hydrogen in Mexico's Energy Transition**

Andrea Celeste Tafolla Manzo<sup>1</sup>

#### **Resumen**

El ensayo analiza la transición energética mexicana desde la interacción entre eficiencia regulatoria, crecimiento económico, comercio exterior, energías renovables e hidrógeno verde. A partir de una revisión documental y de una síntesis analítica de literatura académica y técnica, se argumenta que la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> no depende únicamente del aumento de capacidad renovable, sino de la existencia de reglas estables, infraestructura de red, financiamiento, coordinación institucional y legitimidad social. Se concluye que el hidrógeno verde puede ampliar la descarbonización en sectores difíciles de electrificar, siempre que se integre a una política energética coherente, transparente y orientada a la transición justa.

#### **Abstract**

This essay analyzes Mexico's energy transition through the interaction between regulatory efficiency, economic growth, foreign trade, renewable energy and green hydrogen. Based on a documentary review and analytical synthesis of academic and technical literature, it argues that CO<sub>2</sub> mitigation depends not only on additional renewable capacity, but also on stable rules, grid infrastructure, finance, institutional coordination and social legitimacy. The essay concludes that green hydrogen can extend decarbonization to hard-to-electrify sectors, provided that it is integrated into a coherent, transparent and socially just energy policy framework.

**Palabras clave:** crecimiento económico; eficiencia regulatoria; energías renovables; hidrógeno verde; transición energética.

**Keywords:** economic growth; energy transition; green hydrogen; regulatory efficiency; renewable energy.

**Clasificación JEL:** F18; O13; O44; Q42; Q48.

#### **1. Introducción**

México atraviesa una transición energética marcada por una tensión estructural: durante décadas, su sistema productivo, fiscal y tecnológico se ha organizado alrededor de los hidrocarburos, mientras que los compromisos

<sup>1</sup> Profesora Universidad Latina de América email: [andrea.tafolla01@gmail.com](mailto:andrea.tafolla01@gmail.com). orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8401-4271>

climáticos, la presión tecnológica internacional y la volatilidad de los mercados energéticos exigen reducir de manera sostenida las emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta tensión no se expresa únicamente en el tipo de fuentes utilizadas para generar energía, sino también en la forma en que se gobierna el sector, en la estabilidad de sus reglas, en la capacidad de inversión y en la legitimidad social de los proyectos energéticos.

El debate sobre energías renovables e hidrógeno verde suele presentarse como una discusión tecnológica. Sin embargo, la experiencia mexicana muestra que el potencial solar, eólico, geotérmico o de hidrógeno no se convierte automáticamente en descarbonización. Una matriz energética puede aumentar su capacidad renovable y, al mismo tiempo, mantener trayectorias elevadas de emisiones si persisten cuellos de botella de transmisión, incertidumbre en permisos, señales de precio contradictorias, subsidios a combustibles fósiles o reglas de despacho que reducen la capacidad efectiva de las tecnologías limpias para desplazar generación fósil. En consecuencia, la transición debe analizarse como un proceso económico, institucional, ambiental y social.

El objetivo de este ensayo es analizar cómo la eficiencia regulatoria, el crecimiento económico, el comercio exterior, las energías renovables y el hidrógeno verde condicionan la trayectoria de emisiones de CO<sub>2</sub> en México, con el propósito de discutir las condiciones necesarias para que la transición energética avance de manera efectiva, justa y sostenible. La tesis central sostiene que la descarbonización mexicana no depende sólo de incorporar nuevas tecnologías, sino de articular una gobernanza energética estable, infraestructura suficiente, financiamiento adecuado, políticas industriales verdes y mecanismos de participación social que otorguen legitimidad a los proyectos.

El ensayo se sustenta en una revisión documental y una síntesis analítica de literatura académica y técnica sobre desarrollo sostenible, economía institucional, transición energética, comercio internacional, energías renovables e hidrógeno verde. Esta aproximación permite integrar aportes teóricos y evidencia empírica comparativa para identificar relaciones esperadas entre las variables analizadas. También permite distinguir entre efectos directos, como el crecimiento económico que incrementa la demanda energética, y efectos condicionados por instituciones, infraestructura y composición productiva, como ocurre con las energías renovables y el comercio exterior.

El texto se organiza en cuatro apartados. Después de esta introducción, el segundo apartado desarrolla la fundamentación teórica que vincula desarrollo, instituciones, comercio, energía y emisiones. El tercer apartado presenta el análisis de información y discusión sobre el caso mexicano, considerando el contexto histórico del sector energético, los determinantes de las emisiones, las barreras de las energías renovables y el papel potencial del hidrógeno verde. El cuarto apartado expone las conclusiones y sintetiza las implicaciones principales para una política energética orientada a la reducción estructural de CO<sub>2</sub>.

## 2. Fundamentación teórica

Las teorías del desarrollo han evolucionado desde enfoques centrados en la acumulación de capital, la productividad y la industrialización hacia perspectivas que incorporan instituciones, sostenibilidad, innovación tecnológica y límites ambientales. En la tradición clásica y neoclásica, el crecimiento económico se explica por la asignación eficiente de recursos, el ahorro, la inversión y el progreso técnico. Sin embargo, esta visión resultó insuficiente para comprender por qué algunas economías pueden crecer y, al mismo tiempo, reproducir desigualdad, dependencia tecnológica y deterioro ambiental. En este punto, los enfoques institucionales

ampliaron el análisis al mostrar que las reglas formales e informales influyen en la inversión, la innovación, la calidad de las políticas públicas y la capacidad estatal para orientar el desarrollo (Acemoglu y Robinson, 2019; Acquah et al., 2023).

La economía institucional resulta particularmente útil para estudiar el sector energético, porque la transición hacia tecnologías limpias no ocurre en un vacío normativo. La calidad de los permisos, las reglas de conexión, los esquemas de subasta, los estándares de emisiones, la regulación del despacho eléctrico, la transparencia de los contratos y la coordinación entre agencias públicas determinan quién invierte, bajo qué condiciones y con qué horizonte temporal. Por ello, la eficiencia regulatoria puede entenderse como la capacidad del Estado para diseñar, implementar y ajustar normas que alineen incentivos privados con objetivos públicos de sostenibilidad. Cuando las reglas son claras y estables, disminuye la incertidumbre, baja el costo de capital y se facilita la adopción de tecnologías limpias; cuando son ambiguas o reversibles, se elevan los riesgos de inversión y se ralentiza la transición (Jenkins y Karplus, 2016; Hagemann, Nilsson y Röser, 2024).

La teoría del desarrollo sostenible permite integrar las dimensiones económica, social y ambiental de la energía. Desde esta perspectiva, la energía no es sólo un insumo productivo, sino una condición de bienestar, competitividad y seguridad. Un sistema energético sostenible debe garantizar acceso asequible, eficiencia económica, reducción de emisiones y distribución equitativa de beneficios y costos. Esta mirada cuestiona la idea de que el crecimiento económico, por sí mismo, resolverá los problemas ambientales. La hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets plantea que las emisiones aumentan en fases iniciales de desarrollo y disminuyen después de cierto umbral de ingreso, cuando las economías pueden financiar tecnologías limpias y regulaciones ambientales más exigentes (Grossman y Krueger, 1995). No obstante, la evidencia reciente muestra que dicho punto de inflexión no es automático, ya que depende de la estructura productiva, la calidad institucional, la composición del comercio y la velocidad de adopción tecnológica (Chen, Pinar y Stengos, 2022; Shahnazi y Dehghan Shabani, 2021).

El comercio exterior introduce una dimensión adicional. En la teoría clásica, la apertura comercial promueve especialización y eficiencia; en los enfoques ambientales contemporáneos, también puede redistribuir emisiones entre países. Las cadenas globales de valor muestran que una parte de la contaminación asociada al consumo final puede generarse en territorios distintos a aquellos donde se demandan los bienes. Por ello, las exportaciones intensivas en energía pueden incrementar emisiones territoriales, mientras que las importaciones pueden desplazar emisiones al exterior o facilitar acceso a tecnología limpia. El efecto ambiental del comercio no depende sólo de su volumen, sino de su composición, de la intensidad energética de los sectores involucrados y de las regulaciones aplicables (Meng et al., 2018; Pan et al., 2017; Steinhäuser, Kittová y Khúlová, 2024).

Las teorías de innovación y difusión tecnológica complementan este marco al explicar cómo las tecnologías limpias se incorporan al sistema energético. La energía solar, eólica, el almacenamiento y el hidrógeno verde han reducido costos, pero su adopción efectiva depende de redes, financiamiento, aprendizaje tecnológico, aceptación social y reglas de mercado. La transición energética, por tanto, no se reduce a reemplazar combustibles fósiles por renovables, sino que implica reconfigurar infraestructuras, contratos, capacidades industriales, prácticas regulatorias y relaciones territoriales. Esta complejidad explica por qué la incorporación de renovables puede producir efectos positivos sólo cuando supera ciertos umbrales de participación y cuando cuenta con respaldo institucional suficiente (Kittner, Lill y Kammen, 2017; Nikas et al., 2021).

En este marco, las energías renovables representan una condición necesaria para reducir la intensidad de carbono de la economía, pero no son suficientes por sí mismas. Su capacidad de mitigación depende de que

sustituyan generación fósil, de que exista transmisión disponible, de que el sistema pueda gestionar intermitencia y de que las reglas remuneren adecuadamente la flexibilidad. De igual forma, el hidrógeno verde debe analizarse como un vector complementario, no como una solución universal. Al producirse mediante electrólisis con electricidad renovable, puede almacenar excedentes, abastecer transporte pesado, sustituir hidrógeno gris en procesos industriales y descarbonizar actividades difíciles de electrificar. Sin embargo, su impacto depende de costos de electricidad renovable, disponibilidad de agua tratada, infraestructura de transporte, certificación de origen, seguridad industrial y demanda ancla (Staffell et al., 2019; Glenk y Reichelstein, 2019; Ueckerdt et al., 2024).

De esta fundamentación se desprende una relación causal compleja: el crecimiento económico puede aumentar emisiones si la demanda energética se cubre con combustibles fósiles, pero puede reducirlas si financia innovación y tecnologías limpias bajo reglas adecuadas; el comercio puede elevar la huella de carbono si se concentra en manufacturas intensivas en energía, pero también puede facilitar transferencia tecnológica; las renovables pueden disminuir CO<sub>2</sub> si desplazan efectivamente fuentes fósiles; y el hidrógeno verde puede profundizar la descarbonización si se integra a una cadena de valor viable. En todos los casos, la eficiencia regulatoria funciona como variable mediadora, porque define si las oportunidades tecnológicas y económicas se convierten en resultados ambientales observables.

### 3. Análisis de información y discusión

El sector energético mexicano tiene una trayectoria profundamente marcada por los combustibles fósiles. Antes de la reforma energética de 2013, Petróleos Mexicanos concentraba la exploración y extracción de hidrocarburos, mientras que la Comisión Federal de Electricidad mantenía funciones estratégicas en generación, transmisión y distribución. Este arreglo permitió al Estado conservar control sobre activos críticos, pero también produjo límites en diversificación tecnológica, inversión privada, modernización de infraestructura y eficiencia operativa. La matriz resultante sostuvo una elevada intensidad de emisiones en generación eléctrica, transporte e industria, lo que configuró una dependencia estructural difícil de modificar en el corto plazo (Ramírez, Ortiz-Arango y Rosellón, 2021; Tacuba, 2022).

La reforma energética de 2013 respondió a una combinación de presiones: declive de campos maduros, restricciones fiscales de Pemex, necesidad de inversión en infraestructura, demanda de mayor competencia y expectativas de integración con mercados internacionales. Entre 2013 y 2018, la apertura parcial permitió atraer capital privado, desarrollar proyectos solares y eólicos, ampliar la infraestructura de gas natural y crear condiciones para una mayor participación de tecnologías renovables. Sin embargo, los resultados ambientales fueron moderados. La sustitución de combustóleo y carbón por gas redujo emisiones relativas en algunos segmentos, pero también prolongó la dependencia fósil. Además, la expansión renovable enfrentó limitaciones de transmisión, coordinación institucional y continuidad regulatoria (García-Garza et al., 2023; Varela y Carbajal, 2022).

A partir de 2019, el sector entró en una etapa de recentralización y disputa sobre el rumbo de la política energética. El fortalecimiento de Pemex y CFE, la prioridad otorgada a la soberanía energética y los ajustes regulatorios introdujeron incertidumbre sobre permisos, despacho eléctrico e inversión privada. Esta reorientación respondió a preocupaciones legítimas sobre seguridad energética y capacidad estatal, pero también generó tensiones con la descarbonización, en tanto redujo la previsibilidad para nuevos proyectos

renovables. La literatura reciente coincide en que la transición mexicana se encuentra en una fase inconclusa: existe capacidad renovable creciente y potencial técnico considerable, pero su efecto sobre las emisiones depende de una gobernanza que concilie rectoría pública, inversión, competencia, seguridad y metas climáticas (Baker et al., 2025; Probst, 2024).

La dimensión social complejiza aún más el diagnóstico. En México persisten desigualdades en el acceso y consumo de energía, así como conflictos territoriales vinculados a megaproyectos. La transición no puede evaluarse sólo por megawatts instalados o por metas agregadas de emisiones. Requiere considerar pobreza energética, distribución de costos, consulta a comunidades, beneficios locales y mecanismos de compensación. Los proyectos renovables pueden enfrentar resistencia si se perciben como extractivos, si no generan beneficios territoriales o si reproducen relaciones asimétricas entre empresas, Estado y comunidades. Por ello, la legitimidad social es una condición de viabilidad, no un complemento posterior (Vera, De la Vega y Samperio, 2021; Zárate, 2023).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> deben entenderse como el resultado agregado de la matriz energética, la intensidad del crecimiento, la estructura comercial y la eficacia regulatoria. En economías manufactureras abiertas, como México, el crecimiento económico suele aumentar la demanda de electricidad, combustibles para transporte y energía para procesos industriales. Si esa demanda se cubre con fuentes fósiles, el crecimiento se traduce en mayor presión ambiental. La Curva Ambiental de Kuznets sugiere que el crecimiento podría reducir emisiones en etapas posteriores, pero esta reducción sólo se materializa si existen políticas que impulsen cambio tecnológico, eficiencia energética y sustitución de combustibles fósiles. En ausencia de esas condiciones, el crecimiento puede profundizar la dependencia de infraestructura intensiva en carbono.

La evidencia empírica para México y economías comparables respalda esta lectura condicionada. Estudios recientes muestran que el PIB, la estructura productiva y el comercio exterior pueden relacionarse con mayores emisiones, mientras que las energías renovables, la eficiencia energética y ciertos instrumentos regulatorios pueden mitigar el impacto ambiental cuando se aplican con coherencia. Escamilla-García et al. (2024) señalan que los determinantes socioeconómicos de las emisiones en México no actúan de forma aislada, sino mediante relaciones dinámicas entre crecimiento, comercio y energía. Rosas, Morillón y Silva (2024) muestran que la eliminación de subsidios energéticos y la implementación de impuestos al carbono pueden reducir emisiones, aunque con efectos distributivos diferenciados. Por su parte, Elizondo (2022) plantea que los esquemas de comercio de emisiones pueden funcionar si cuentan con gobernanza, transparencia y coordinación con otras políticas climáticas.

El comercio exterior tiene efectos ambivalentes. Las exportaciones pueden aumentar emisiones cuando dependen de manufacturas intensivas en energía o de insumos fósiles; las importaciones pueden desplazar emisiones hacia otros países o facilitar la incorporación de bienes y tecnologías más limpias. En este sentido, no basta con medir apertura comercial; es necesario analizar su composición sectorial y su articulación con la política industrial. Zhao et al. (2023) muestran que el comercio puede incrementar emisiones cuando existe incertidumbre en las reglas comerciales, mientras que Meng et al. (2018) y Pan et al. (2017) evidencian que las cadenas globales redistribuyen la responsabilidad por emisiones. Para México, esta discusión es estratégica porque la relocalización productiva y la integración con América del Norte podrían convertirse en oportunidad de descarbonización o en una nueva fuente de presión energética, dependiendo del tipo de inversiones que se atraigan.

Las energías renovables ofrecen una ruta indispensable para reducir la intensidad de carbono, pero enfrentan barreras concretas. México cuenta con potencial solar, eólico, hidroeléctrico y geotérmico, además de experiencia acumulada en proyectos privados y públicos. La solar y la eólica han mostrado mayor dinamismo por la caída de costos tecnológicos, mientras que la geotermia conserva valor por su generación continua. Sin embargo, el potencial técnico no es equivalente a generación efectiva. Las zonas con mejores recursos suelen estar lejos de centros de carga, la transmisión presenta cuellos de botella, el almacenamiento aún es limitado y las reglas de despacho pueden afectar la rentabilidad de los proyectos. Además, el costo de capital se eleva cuando hay incertidumbre regulatoria, riesgo político o ausencia de contratos de largo plazo (Denholm et al., 2016; Esparza y Hernández, 2023; Hagemann, Nilsson y Röser, 2024; Palacios et al., 2024).

Las barreras institucionales y sociales también son decisivas. Los permisos lentos, los cambios de criterios administrativos, la falta de mercados de flexibilidad y la ausencia de mecanismos claros para servicios auxiliares dificultan la integración de fuentes variables. A ello se suman conflictos de uso de suelo, impactos paisajísticos, preocupaciones por beneficios locales y experiencias de consulta insuficiente. En consecuencia, la expansión renovable requiere planeación territorial, fortalecimiento de red, financiamiento verde, reglas estables y participación temprana de las comunidades. Sólo así las renovables podrán desplazar generación fósil y no limitarse a coexistir con ella (Hernández et al., 2022; Delgado, Saldaña y Mellardo, 2024).

El hidrógeno verde amplía la discusión porque puede atender sectores donde la electrificación directa es difícil o costosa. Su producción mediante electrólisis alimentada por electricidad renovable permite almacenar energía, sustituir hidrógeno gris en procesos industriales, abastecer transporte pesado y crear insumos para fertilizantes, siderurgia, refinación o combustibles sintéticos. No obstante, su viabilidad depende de factores encadenados: costos competitivos de electricidad renovable, disponibilidad de electrolizadores, agua tratada, infraestructura de compresión y almacenamiento, transporte por ductos o conversión a amoníaco, certificación de origen renovable, estándares de seguridad y existencia de compradores ancla (Brändle, Schönfish y Schulte, 2021; Makepeace et al., 2024).

Para México, las oportunidades del hidrógeno verde son relevantes, pero no automáticas. La cercanía con cadenas industriales de América del Norte, el potencial renovable y la posible demanda en transporte, puertos e industria pueden abrir espacios de desarrollo. Estudios recientes sobre demanda regional y viabilidad técnico-económica sugieren que el país podría construir hubs de hidrógeno si coordina infraestructura, mercados e incentivos (Becerra-López et al., 2025; Palacios et al., 2025). Sin embargo, la experiencia internacional muestra que los países con mayores avances han combinado subsidios iniciales, contratos por diferencia, créditos fiscales, financiamiento público, estándares de certificación y corredores logísticos. Sin ese andamiaje, el hidrógeno puede permanecer como proyecto piloto o como expectativa tecnológica sin impacto estructural (IRENA, 2020).

La discusión sobre hidrógeno verde debe evitar dos extremos: asumirlo como sustituto total de la electrificación o descartarlo por sus altos costos actuales. Su papel más razonable es complementario. Puede ser útil donde la electricidad directa y las baterías no ofrecen una solución eficiente, especialmente en usos industriales de alta temperatura, transporte pesado, almacenamiento de largo plazo y producción de insumos químicos. También puede funcionar como mecanismo para absorber excedentes renovables y estabilizar sistemas eléctricos con alta penetración solar o eólica. Sin embargo, su desarrollo debe evaluarse como cadena de valor completa. Un electrolizador competitivo no basta si no existe electricidad renovable firme, agua, logística, mercado y regulación. Además, la seguridad industrial y la aceptación social requieren protocolos claros, monitoreo y comunicación pública (Staffell et al., 2019; Giannini et al., 2025; Vidal, Baena y Therán, 2024).

En síntesis, la información revisada muestra que la reducción de emisiones en México no depende de una sola variable. La eficiencia regulatoria ordena los incentivos; el crecimiento económico define la presión sobre la demanda; el comercio exterior transforma la composición productiva y la huella de carbono; las renovables reducen emisiones sólo si desplazan fuentes fósiles; y el hidrógeno verde puede profundizar la descarbonización si cuenta con mercado, infraestructura y reglas. La interacción entre estas dimensiones exige una estrategia de gobernanza que articule estabilidad regulatoria, infraestructura de transmisión y almacenamiento, política industrial verde y mecanismos de justicia social. Sin esos pilares, la transición energética puede avanzar en capacidad instalada sin producir los resultados ambientales que México requiere.

#### **4. Conclusiones**

La transición energética mexicana se encuentra condicionada por una dependencia histórica de combustibles fósiles, por la centralidad de Pemex y CFE, por una infraestructura eléctrica con rezagos y por cambios regulatorios que han alterado los incentivos de inversión. Reducir emisiones de CO<sub>2</sub> exige reconocer este legado y construir mecanismos que permitan una sustitución efectiva de tecnologías, no sólo un aumento marginal de capacidad renovable.

El crecimiento económico y el comercio exterior tienen efectos ambientales condicionados. Pueden aumentar emisiones cuando se apoyan en manufacturas intensivas en energía, transporte fósil e infraestructura carbonizada; pero también pueden facilitar descarbonización si se articulan con innovación, eficiencia energética, certificación de bajas emisiones y política industrial verde. Por ello, la Curva Ambiental de Kuznets no debe asumirse como trayectoria automática. El desacoplamiento entre crecimiento y emisiones requiere instituciones, inversión y tecnologías limpias.

La eficiencia regulatoria es la palanca que conecta los objetivos públicos con las decisiones de inversión y consumo. Sin reglas estables, permisos transparentes, instrumentos fiscales coherentes, financiamiento y rendición de cuentas, las energías renovables enfrentan costos de capital elevados y menor capacidad de desplazar generación fósil. La regulación debe entenderse como infraestructura institucional de la descarbonización.

Las energías renovables son indispensables, pero requieren transmisión, almacenamiento, flexibilidad operativa y legitimidad territorial. El hidrógeno verde puede ampliar el alcance de la transición hacia sectores difíciles de electrificar, siempre que se construya como cadena de valor y no como tecnología aislada. Su desarrollo debe considerar electricidad renovable competitiva, agua tratada, seguridad industrial, certificación, demanda ancla, financiamiento y aceptación social.

Finalmente, la agenda mexicana debe articular soberanía energética, competitividad y justicia social. Un modelo viable no opone Estado y mercado de manera absoluta; combina rectoría pública, inversión privada regulada, empresas estatales eficientes, financiamiento verde y participación comunitaria. Bajo estas condiciones, las energías renovables y el hidrógeno verde pueden contribuir a una reducción estructural de CO<sub>2</sub> y a una transición energética más justa, sostenible y socialmente legítima.

La agenda de investigación que abre este análisis es amplia. En primer lugar, se requieren estudios empíricos que cuantifiquen el efecto de la eficiencia regulatoria sobre la velocidad de adopción de renovables en México, controlando por estructura productiva regional y composición del comercio exterior. En segundo lugar, la economía del hidrógeno verde en el contexto mexicano demanda modelos de viabilidad que integren

costos de electricidad renovable, disponibilidad hídrica, logística y demanda industrial por corredor geográfico. En tercer lugar, la dimensión de justicia energética —distribución de costos, conflictos territoriales y pobreza energética— requiere investigación cualitativa y cuantitativa que informe el diseño de mecanismos de compensación y consulta. Finalmente, el vínculo entre relocalización productiva, nearshoring y trayectoria de emisiones en México representa una línea prioritaria, dado que las decisiones de inversión que se tomen en los próximos años definirán si la integración con América del Norte opera como palanca de descarbonización o como nueva fuente de presión fósil.

## Referencias

- Acemoglu, D. y Robinson, J. (2019). *The Narrow Corridor: States, Societies, and the Fate of Liberty*. Penguin Books.
- Acquah, E., Carbonari, L., Farcomeni, A. y Trovato, G. (2023). Institutions and economic development: new measurements and evidence. *Empirical Economics*, 65, 1693-1728. <https://doi.org/10.1007/s00181-023-02395-w>
- Baker, L., Cao, U., Chipango, E., Fathoni, H., Munro, P. y Samarakoon, S. (2025). Of Energy Transitions and the State. The Case of Mexico's Attempted Electricity Reform. En L. Baker, U. Cao, E. Chipango, H. Fathoni, P. Munro y S. Samarakoon (Eds.), *Electricity Capital and Energy Poverty. Perspectives From Developmental States and Decentralised Markets* (pp. 89-107). Palgrave Macmillan. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-94358-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-94358-4_5)
- Becerra-López, H., De Silva, L., Flores, J., Lira, R. y Romero, T. (2025). Forecasting regional green hydrogen demand in Mexico by 2035. *International Journal of Hydrogen Energy*, 141(25), 1039-1049. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.132>
- Brändle, G., Schönfisch, M. y Schulte, S. (2021). Estimating long-term global supply costs for low-carbon hydrogen. *Applied Energy*, 302, 117481. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117481>
- Chen, C., Pinar, M. y Stengos, T. (2022). Renewable energy and CO<sub>2</sub> emissions: New evidence with the panel threshold model. *Renewable Energy*, 194, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.095>
- Delgado, J., Saldaña, M. y Mellardo, C. (2024). Eficiencia energética en los municipios de México. *International Journal of Professional Business Review*, 9(9), 2-18. <https://doi.org/10.26668/businessreview/2024.v9i9.4819>
- Denholm, P., Novacheck, J., Jorgenson, J. y O'Connell, M. (2016). *Impact of Flexibility Options on Grid Economic Carrying Capacity of Solar and Wind: Three Case Studies*. National Renewable Energy Laboratory. <https://docs.nrel.gov/docs/fy17osti/66854.pdf>
- Elizondo, A. (2022). Bringing Emissions Trading Schemes into Mexican Climate Policy. En S. Lucatello (Ed.), *Towards an Emissions Trading System in Mexico: Rationale, Design and Connections with the Global Climate Agenda* (pp. 33-47). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-82759-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82759-5_2)
- Escamilla-García, P., Rivera-González, G., Rivera, A. y Soto, F. (2024). Socio-Economic Determinants of Greenhouse Gas Emissions in Mexico: An Analytical Exploration over Three Decades. *Sustainability*, 16(17), 7668. <https://doi.org/10.3390/su16177668>
- Esparza, J. y Hernández, C. (2023). ¿Se retroalimentan las energías renovables con el crecimiento económico en México?: Análisis del 2013-2020. *Paradigma Económico*, 15(2), 143-173. <https://doi.org/10.36677/paradigmaeconomico.v15i2.21930>

- García-Garza, M., Ortiz-Rodríguez, J., Picazzo-Palencia, E., Munguía, N. y Velazquez, L. (2023). The 2013 Mexican Energy Reform in the Context of Sustainable Development Goal 7. *Energies*, 16(19), 6920. <https://doi.org/10.3390/en16196920>
- Giannini, S., Reniers, G., Yang, M., Nogal, M. y Paltrinieri, N. (2025). Cost-Informed Risk-Based Inspection (CIRBI) for hydrogen systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 260, 111063. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111063>
- Glenk, G. y Reichelstein, S. (2019). Economics of converting renewable power to hydrogen. *Nature Energy*, 4(2), 216-222. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0326-1>
- Grossman, G. y Krueger, A. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377. <https://doi.org/10.2307/2118443>
- Hagemann, M., Nilsson, A. y Röser, F. (2024). *Understanding finance needs for a just transition of the Mexican power sector*. NewClimate Institute. <https://newclimate.org/resources/publications/understanding-finance-needs-for-a-just-transition-of-the-mexican-power>
- Hernández, G., Tapia, L., Toledo, A. y Guzmán, D. (2022). La transición energética bajo prácticas autoritarias. Tres casos en México. *Desafíos*, 34(2), 1-40. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/desafios/a.11474>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal*. IRENA. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_cost\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf)
- Jenkins, J. y Karplus, V. (2016). *Carbon pricing under binding political constraints*. WIDER Working Paper Series, 2016/44. <https://www.wider.unu.edu/sites/default/files/wp2016-44.pdf>
- Kittner, N., Lill, F. y Kammen, D. (2017). Energy storage deployment and innovation for the clean energy transition. *Nature Energy*, 2(9), 17125. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.125>
- Makepeace, R., Tabandeh, A., Hossain, M. y Asaduz-Zaman, M. (2024). Techno-economic analysis of green hydrogen export. *International Journal of Hydrogen Energy*, 56(2), 1183-1192. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.212>
- Meng, B., Peters, G., Wang, Z. y Li, M. (2018). Tracing CO<sub>2</sub> emissions in global value chains. *Energy Economics*, 73, 24-42. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.05.013>
- Nikas, A., Gambhir, A., Trutnevyte, E., Koasidis, K., Lund, H., Thellufsen, J. y Mayer, D. (2021). Perspective of comprehensive and comprehensible multi-model energy and climate science in Europe. *Energy*, 215, 119153. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119153>
- Palacios, A., Martins, R., Palacios-Rosas, E., Castro-Olivera, P. M., Oros, A., Lizcano, F., Poblano, D., Enciso, A. y Bonilla, H. (2025). Hydrogen in Mexico: A technical and economic feasibility perspective for the transition to a hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 108(12), 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.116>
- Palacios, R., Masera, O., Ferrari, L. y Canales, D. (2024). *Futuros energéticos para México al 2050: El camino para una transición energética justa y sustentable*. Pronace ECC-Conahcyt.
- Pan, C., Peters, G., Andrew, R., Korsbakken, J., Li, S., Zhou, D. y Zhou, P. (2017). Emissions embodied in global trade have plateaued due to structural changes in China. *Earth's Future*, 5(8), 934-946. <https://doi.org/10.1002/2017EF000625>

- Probst, O. (2024). Clean Energy and Carbon Emissions in Mexico's Electric Power Sector: Past Performance and Current Trend. *Energies*, 17(23), 5859. <https://doi.org/10.3390/en17235859>
- Ramírez, J., Ortiz-Arango, F. y Rosellón, J. (2021). Impact of Mexico's energy reform on consumer welfare. *Utilities Policy*, 70, 101191. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101191>
- Rosas, J., Morillón, D. y Silva, R. (2024). Effects of removing energy subsidies and implementing carbon taxes on urban, rural and gender welfare: evidence from Mexico. *Energies*, 17(9), 2237. <https://doi.org/10.3390/en17092237>
- Shahnazi, R. y Dehghan Shabani, Z. (2021). The effects of renewable energy, spatial spillover of CO<sub>2</sub> emissions and economic freedom on CO<sub>2</sub> emissions in the EU. *Renewable Energy*, 169, 293-307. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.016>
- Sovacool, B. (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 13, 202-215. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020>
- Staffell, I., Scamman, D., Velázquez, A., Balcombe, P., Dodds, P., Ekins, P. y Shah, N. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463-491. <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>
- Steinhauser, D., Kittová, Z. y Khúlová, L. (2024). Relationship Between CO<sub>2</sub> Emissions and Trade: The Case of the EU. *Intereconomics*, 59(1), 41-47. <https://doi.org/10.2478/ie-2024-0009>
- Tacuba, A. (2022). *Pemex: oil price and financial management in the context of elevated fiscal burden*. Journal of Economics, Finance and Administrative Science, 27(53), 175-194. <https://doi.org/10.1108/JEFAS-06-2021-0094>
- Ueckerdt, F., Verpoort, P., Anantharaman, R., Bauer, C., Beck, F., Longden, T. y Roussanaly, S. (2024). On the cost competitiveness of blue and green hydrogen. *Joule*, 8(1), 104-128. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.12.004>
- Varela, A. y Carbajal, C. (2022). ¿Realmente fue positivo el saldo de la privatización de la Reforma Energética en México? *Revista Mexicana de Economía y Finanzas*, 17(3), 1-16.
- Vera, M., De la Vega, A. y Samperio, J. I. (2021). Climate change and income inequality: An IO analysis of the structure and intensity of the GHG emissions in Mexican households. *Energy for Sustainable Development*, 60, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.11.002>
- Vidal, J., Baena, R. y Therán, K. (2024). Implementation and feasibility of green hydrogen in Colombian kitchens: An analysis of innovation and sustainability. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 34(2), 726-744. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v34.i2.pp726-744>
- Zárate, E. (2023). Sociología de energías renovables y transformación energética en México. *Estudios Sociológicos*, 41(122), 441-470. <http://dx.doi.org/10.24201/es.2023v41n122.2271>
- Zhao, X., Yang, X., Peng, G. y Yue, S. (2023). International Trade and Carbon Emissions: Evaluating the Role of Trade Rule Uncertainty. *Sustainability*, 15(15), 11662. <https://doi.org/10.3390/su151511662>