

PLAN SONORA DE ENERGÍAS SOSTENIBLES

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE MITIGACIÓN DE GASES
Y COMPUESTOS DE EFECTO INVERNADERO (GyCEI)

2 0 2 4



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO





MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO



CODESO
Comisión para el Desarrollo Sustentable
SONORA



TABLA DE CONTENIDOS



TABLA DE CONTENIDOS

| | | | |
|--|-----------|---|-----------|
| TABLAS Y FIGURAS | 5 | Ampliación y modernización de carreteras | 35 |
| RESUMEN EJECUTIVO | 7 | Potencial de Mitigación por ampliación y modernización de carreteras | 35 |
| INSTRUMENTOS DE MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO | 10 | Ampliación y modernización de aduanas terrestres | 37 |
| Contribución Determinada a nivel Nacional | 10 | TALENTO HUMANO | 40 |
| Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre El Cambio Climático (COP 28) | 10 | MINERALES ESTRATÉGICOS | 42 |
| Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero | 11 | El litio como actor clave en la electromovilidad... | 42 |
| Contexto Estatal frente al Cambio Climático | 12 | Indicadores previstos en los proyectos del Plan Sonora de Energías Sostenibles | 42 |
| <i>Ley de Cambio Climático de Sonora</i> | 12 | Indicadores del Plan Sonora | 44 |
| <i>Programas Estatales de Cambio Climático del Estado de Sonora (PECCS)</i> | 12 | Relación del Plan Sonora con los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) | 45 |
| PLAN SONORA DE ENERGÍAS SOSTENIBLES | 13 | HIDRÓGENO VERDE EN SONORA | 47 |
| IDENTIFICACIÓN INICIAL DEL POTENCIAL DE MITI- GACIÓN DE LAS EMISIONES DEL PLAN SONORA ... | 15 | HUB DE HIDRÓGENO VERDE EN SONORA | 48 |
| GENERACIÓN ELÉCTRICA RENOVABLE | 16 | Proceso de Producción | 48 |
| Energía limpia renovable a gran escala: Planta Fotovoltaica de Puerto Peñasco | 16 | Demanda mundial y demanda en México | 50 |
| Sistema de Generación Social Distribuida | 18 | Usos futuros del hidrógeno verde | 51 |
| Generación solar en edificios públicos | 20 | Producción de hidrógeno gris en México | 52 |
| Generación solar en parques industriales | 21 | Costos de producción | 54 |
| CONSIDERACIONES | 24 | BENEFICIOS PARA EL ESTADO DE SONORA DEL HIDRÓGENO VERDE | 54 |
| RESUMEN MITIGACIÓN DEL EJE ENERGÍA | 25 | Créditos de carbono | 55 |
| INFRAESTRUCTURA | 26 | Créditos de carbono | 55 |
| Movilidad - Tren Guaymas-Nogales-Arizona y Guaymas-Mexicali | 26 | Beneficios socio-ambientales del proyecto Plan Sonora de Energías Sostenibles | 56 |
| Potencial de mitigación de emisiones por la ruta Guaymas-Nogales vs Panamá Galveston | 34 | Ventajas sociales | 56 |
| | | Ventajas ambientales | 56 |
| | | ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS | 57 |
| | | REFERENCIAS | 58 |

TABLAS Y FIGURAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Generación y emisiones evitadas por energías renovables | 18 |
| Tabla 2. Generación y emisiones evitadas por energías renovables en generación distribuida | 19 |
| Tabla 3. Capacidad requerida y emisiones evitadas en edificios públicos | 20 |
| Tabla 4. Usos de suelo en el parque industrial EPIC | 20 |
| Tabla 5. Consumos de agua energía y gas natural del parque industrial | 21 |
| Tabla 6. Capacidad potencial del parque industrial EPIC | 21 |
| Tabla 7. Generación y emisiones evitadas potenciales del parque industrial EPIC | 22 |
| Tabla 8. Consumo de energía por suministro de agua potable, por el tratamiento de aguas residuales y emisiones evitadas potenciales del parque industrial EPIC | 23 |
| Tabla 9. Generación y emisiones evitadas del Plan Sonora | 25 |
| Tabla 10. Segmentos de Importación y Exportación del ferrocarril Nogales – Guaymas | 26 |
| Tabla 11. Distancias entre fronteras y puertos en el Sistema de transporte de Sonora | 26 |
| Tabla 12. Distancias entre fronteras y puertos en el Sistema de transporte de Sonora | 27 |
| Tabla 13. Concesionarios | 27 |
| Tabla 14. Carga transportada por tipo de tráfico | 34 |
| Tabla 15. Distancias de rutas de transporte de carga considerando el modo marítimo y ferroviario | 40 |
| Tabla 16. Diagnóstico de oferta educativa de estudiantes a fines a las áreas estratégicas del Plan Sonora... | 40 |
| Tabla 17. Indicadores Ambientales y Sociales del Plan Sonora | 43 |

TABLAS Y FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Proyección del comportamiento del FE de red | 16 |
| Figura 2. Ubicaciones de pequeñas centrales de generación distribuida para comunidades | 17 |
| Figura 3. Línea Férrea Guaymas – Nogales que atraviesa la ciudad de Nogales. Densidad poblacional de la ciudad de Nogales desde 1880 | 25 |
| Figura 4. Evolución del tráfico de comercio exterior e interior, del periodo 2011-2021 | 27 |
| Figura 5. Exportaciones e importaciones del periodo 2011-2021 | 28 |
| Figura 6. Carga de Importación/exportación en puerto y fronteras en el año 2021 | 29 |
| Figura 7. Carga de Importación/exportación en puerto y fronteras en el año 2021. Sonora | 30 |
| Figura 8. Importaciones por tipo de producto en puerto y frontera | 31 |
| Figura 9. Exportaciones por tipo de producto en puerto y frontera | 32 |
| Figura 10. Estimación del movimiento de mercancías del Estado de Sonora por tipo modal | 33 |
| Figura 11. Proyección del crecimiento del movimiento de mercancías del Estado de Sonora favoreciendo el crecimiento en vías férreas | 33 |
| Figura 12. Porcentaje de reducción de gases y compuestos de efecto invernadero al realizar un cambio modal de transporte de carga de autobuses a trenes | 33 |
| Figura 13. Porcentaje de reducción de gases y compuestos de efecto invernadero al realizar un cambio de ruta de transporte de carga entre Hong Kong y San Diego | 34 |
| Figura 14. Potencial de mitigación por cambio de camino rural a urbano | 36 |
| Figura 15. Ejemplo de potencial de mitigación considerando una reducción del 30% del tiempo de viaje ... | 36 |
| Figura 16. Potencial de mitigación identificado por mejoras en el puerto fronterizo de Mariposa en Nogales .. | 39 |
| Figura 17. Egresados en 2022 de carreras afines al Plan Sonora | 39 |
| Figura 18. Ecosistema del Plan Sonora y ODS | 45 |
| Figura 19. Relación de los pilares del Plan Sonora con los ODS | 46 |
| Figura 20. Producción de hidrógeno a partir de energías renovables | 48 |
| Figura 21. Diagrama de flujo producción de H ₂ con electrolizadores PEM | 49 |
| Figura 22. Demanda global de Hidrógeno-verde (millones de toneladas) | 50 |
| Figura 23. Demanda de H ₂ verde en México 2020-2050 en (kton) | 51 |
| Figura 24. Usos finales probables del H ₂ -verde | 52 |
| Figura 25. Producción de H ₂ gris de PEMEX 2020-2023 | 52 |
| Figura 26. Ejemplo de un Hub de hidrógeno en el caso del Puerto de Hamburgo en Alemania | 54 |
| Figura 27. Costos de producción de Hidrógeno en USD 2019/kg | 54 |

RESUMEN EJECUTIVO



El Estado de Sonora cuenta con una política industrial denominada “Plan Sonora de Energías Sostenibles”, la cual busca la transición hacia una sociedad sustentable y potenciar las energías renovables, contribuyendo a la descarbonización de la economía de México.

Este documento analiza, en el primer apartado un recuento de los instrumentos normativos que se tienen a nivel internacional y Estatal para contribuir a la mitigación del cambio climático.

Se describe el Plan Sonora con sus cuatro ejes:

- 1) Energías limpias,
- 2) Infraestructura de punta;
- 3) Minerales estratégicos;
- 4) Talento Humano,

donde se identificaron los siguientes potenciales de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI) por cada eje:



1. ENERGÍA

La acción con mayor potencial de mitigar gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI) en el sector energía es instalar 5 GW provenientes de energías renovables, donde se podrían evitar alrededor de 3.5 MtCO₂e en el año 2030 y la generación solar en edificios públicos con lo que se podrían evitar alrededor de 0.037 MtCO₂e al 2030.

2. INFRAESTRUCTURA

Un cambio modal de autobuses y trenes (doble de trenes) en la ruta Guaymas-Nogales podría reducir el 18.5% de las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero relacionadas con la carga anual de 4.263 millones de toneladas. También existe potencial de mitigación por modernización de carreteras y aduanas.

3. TALENTO HUMANO

En el año 2022 en el Estado, se contabilizaron 33, 931 estudiantes matriculados en carreras afines al Plan Sonora, en las áreas de electromovilidad, electrónica-semiconductores y automatización. Se registraron 4,458 titulados y 5,101 egresados que se podrían incorporar a empleos verdes que responderán a las necesidades del ecosistema sostenible del Plan Sonora, garantizando la reducción del impacto ambiental, la conservación de recursos naturales y la promoción de prácticas más sostenibles en las industrias que se instalen.

4. MINERALES

Existe un potencial de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero por el uso de vehículos electrificados, principalmente sí se acompaña de fuentes de energía renovables y sí se enfoca al transporte público.

Se establece una relación del Plan con indicadores ambientales y sociales de: Calidad del aire, cambio climático, generación de residuos, consumo de recursos naturales, equidad, género y salud y los indicadores de la Agenda 2030. Finalmente, se identifican las potencialidades del estado de Sonora para la producción de Hidrógeno Verde.

MITIGACIÓN DE EMISIONES DE GyCEI

PLAN SONORA DE ENERGÍAS SOSTENIBLES



ENERGÍA

3.58 MtCO₂e



CARRETERAS

-16% CO₂
-23.4% CH₄
-18.5% CN
-33 %N₂O



MOVILIDAD VÍAS DEL TREN

18.5 % de emisiones de GyCEI que se podrían reducir por cambio modal



ADUANAS

-15% GyCEI
-18% NOX
-16% CN



PUERTO DE GUAYMAS

Potencial de mitigación 33.4% de la ruta Hong Kong- Guaymas- Nogales-San Diego, con respecto a la ruta Hong Kong- Panamá- Galveston-San Diego



PARQUES INDUSTRIALES Y CIENTÍFICOS

Energía 0.027 MtCO₂e

INSTRUMENTOS DE MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Contribución Determinada a nivel Nacional

México se ha comprometido a presentar ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la actualización de la Contribución Determinada a nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) en el marco de la Ley General de Cambio Climático (LGCC) y el Artículo 4, del Acuerdo de París. En la NDC el país se ha comprometido junto con las demás Partes y con la comunidad internacional a detener el calentamiento global en 1.5°C, por lo que se requiere que las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero a escala global se reduzcan en un 43% al 2030, alcanzando un punto máximo en 2025, de igual forma se requiere reducir en 30% las emisiones de metano (CH₄) y otros contaminantes climáticos de vida corta.

Durante el 2022¹ México actualizó su NDC, en la cual aumentó la meta de reducción del 22% al 30% de Gy-CEI al 2030 con respecto a la línea base, considerando sus propios recursos, misma que podría aumentar hasta un 35% con el acceso a recursos internacionales específicamente para energías limpias. De igual forma, México podría incrementar aún más su meta de manera condicionada, es decir con recursos internacionales, hasta un 40% en diferentes sectores.

Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre El Cambio Climático (COP 28)

En la última COP28² llevada a cabo en Dubái a finales del 2023, donde se reunieron 154 jefas y jefes de Estado y Gobierno, se sentaron las bases para una transición rápida y equitativa a la reducción de emisiones y un aumento de la financiación. El balance mundial fue uno de los resultados más importantes de la COP28, que en este balance se plasman los planes de acción climática más sólidos para el 2025. Los puntos principales de la COP28 fueron la preservación del objetivo de 1.5°C, meta establecida en el Acuerdo de París. Se reconoce la necesidad de alcanzar las cero emisiones netas en 2050, para lo cual llaman a los países a reducir un 43% en 2030 y un 60% en 2035, ambos objetivos relativos a 2019 y la intención de acelerar y reducir sustancialmente emisiones de otros gases además del CO₂, en particular las emisiones de metano.

Las delegaciones acordaron comenzar con la transición de combustibles fósiles para detener el aumento de temperatura. Una de las acciones clave fue triplicar la capacidad global de energías renovables hasta al menos 11.00 GW en 2030 y duplicar la tasa media anual de mejoras de eficiencia energética. Otro punto acordado previamente en la COP27, celebrada en Sharm el Sheik (Egipto), fue la crea un fondo de pérdidas y daños para apoyar a los países en desarrollo ante las consecuencias del cambio climático.

¹ SEMARNAT-INECC (2022). Contribución Determinada a nivel Nacional 2022. Gobierno de México. Recuperado el 18 de octubre de 2023 de: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/Mexico_NDC_UNFCCC_update2022_FINAL.pdf

² Ver: <https://www.un.org/es/climatechange/climate-ambition-summit> y <https://unfccc.int/cop28>

Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero

Para el cumplimiento al Artículo 74 de la Ley General de Cambio Climático (LGCC)³, se desarrolla el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI), a través de la Coordinación General de Mitigación del Cambio Climático (CGMCC) del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en conformidad con lo estipulado por la Convención y el Grupo Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) utilizando las directrices y mejoras del IPCC⁴.

La elaboración del INEGyCEI se basa en caracterizar e identificar las principales fuentes de emisión, una vez que son identificadas y cuantificadas, se pueden enfocar medidas y políticas públicas hacia la mitigación del cambio climático.

México tiene el compromiso ante la CMNUCC de elaborar, actualizar y publicar, así como también facilitar a la Conferencia de las Partes, de conformidad con el Artículo 12, los Inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas y la absorción por los sumideros de todos los GyCEI no controlados por el Protocolo de Montreal, utilizando metodologías comparables que habrán de ser revisadas y acordadas por la Conferencia de las Partes.

EL INEGyCEI PRESENTA LAS EMISIONES DE LOS SECTORES:

- Energía
- Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU, por sus siglas en inglés)
- Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés).
- Residuos y sus categorías, subcategorías y fuentes de emisión.

ESTA INFORMACIÓN DEBE CUMPLIRSE DURANTE LOS SIGUIENTES PLAZOS:

- Estimación de las emisiones de la quema de combustibles fósiles debe realizarse anualmente.
- La estimación de las emisiones, distintas a las de la quema de combustibles fósiles, con exclusión de las relativas al cambio de uso de suelo, deberán realizarse cada dos años.
- La estimación total de las emisiones por las fuentes y las absorciones por los sumideros de todas las categorías con las que cuenta el INEGyCEI, deberán realizarse cada 4 años.

En un esfuerzo conjunto el INEGyCEI requiere de la información de múltiples dependencias, entidades e instituciones que permitirán contar con la información para el desarrollo y actualización de los inventarios nacionales.

Durante el 2019⁵ en México se emitieron 714.047 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e) que representa la suma de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs), trifluoruro de nitrógeno (NF₃) y hexafluoruro de azufre (SF₆) multiplicados por su potencial de calentamiento global.

³ Ver: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>

⁴ Ver: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/>

⁵ Ver: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/737226/156_2022_INEGyCEI_1990-2019_NIR.pdf

Las actividades de reforestación y la permanencia de tierras como cultivos o praderas absorben el CO₂ de la atmósfera para generar oxígeno y biomasa, según el INEGyCEI en 2019 se tuvo una absorción de 201.9 millones de toneladas de CO₂, por lo que las emisiones netas (emisiones menos absorciones) del país fueron de 534.69 MtCO₂e. En el INEGyCEI también se incluyen las emisiones de Carbono Negro, considerado un contaminante climático de vida corta.

Contexto Estatal de Sonora frente al Cambio Climático

Ley de Cambio Climático de Sonora

El estado de Sonora cuenta con una Ley de Cambio Climático (Gobierno de Sonora, 2017), publicada en el Boletín Oficial del Estado de Sonora en el Número 43, Sección VII, el lunes 27 de noviembre de 2017, la cual establece las disposiciones generales para lograr la adaptación al cambio climático y mitigar las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. Esta Ley deriva de las disposiciones en materia de Medio Ambiente y Desarrollo de la Constitución Política del Estado de Sonora y es aplicada de conformidad con la Ley General de Cambio Climático.

Su objeto es garantizar el derecho de toda persona a un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar, establece las atribuciones de las dependencias y entidades competentes de la Administración Pública Estatal y de los ayuntamientos, así como los mecanismos de coordinación entre dichas autoridades con los demás órdenes de gobierno y otras entidades federativas.

En el Capítulo Cuarto, se establecen los lineamientos de los Programas Estatales de Cambio Climático (PECC), considerados los instrumentos de planeación de la política estatal en materia de cambio climático que se proyecta al inicio de cada periodo constitucional del Gobierno del Estado.

Programas Estatales de Cambio Climático del Estado de Sonora (PECCS)

El PECC se deriva del Plan Estatal de Desarrollo y debe ser congruente con la Estrategia Nacional de Cambio Climático, en éste se establecen las estrategias, políticas, directrices, objetivos, acciones, metas e indicadores que se implementarán y cumplirán durante el periodo de gobierno correspondiente.

El Gobierno del Estado a través de la Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (CEDES), lanzó en el año 2022 el Programa Estatal de Cambio Climático de Sonora 2022-2026 PECCS, en conjunto con la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, con la finalidad de fortalecer la política pública tendiente a reducir la vulnerabilidad ante el fenómeno del cambio climático en lo local e impulsar esquemas sectoriales de adaptación en el corto y mediano plazo.

Los objetivos del PECCS son dos, el primero establecer medidas de mitigación para los sectores de energía, transporte, residuos y tratamiento de aguas residuales, agropecuario y transversal, que incluye el desarrollo urbano y la gestión administrativa de la generación de emisiones de gas y compuestos de efecto invernadero. En un segundo término, busca transversalizar las políticas y acciones climáticas de la administración pública estatal con el fin de disminuir los efectos del cambio climático y coordinar esfuerzos para obtener mejores resultados en la aplicación de esta política pública. Está integrado por cinco capítulos que contienen la actualización del inventario de emisiones, escenarios climáticos de mitigación y adaptación, así como 47 medidas de acción climática por sector (Gobierno de Sonora, 2022).

PLAN SONORA DE ENERGÍAS SOSTENIBLES



El Gobierno del Estado de Sonora, en colaboración con el Gobierno Federal desarrolló una política industrial denominada “Plan Sonora de Energías Sostenibles”, la cual busca la transición hacia una sociedad sustentable y convertir a Sonora en potencia de energías verdes, contribuyendo a la descarbonización de la economía y colocando a México como referente en la lucha mundial contra el cambio climático⁶.

Una de las características fundamentales del Plan es que se pueda replicar en diferentes Estados del país, impulsando en cada uno de ellos las energías sostenibles y acelerando la economía, la competitividad, el talento y la investigación científica de manera local con repercusiones a nivel nacional.

El Plan conlleva esfuerzos para contrarrestar el cambio climático y con ello contribuir al cumplimiento de los compromisos ambientales nacionales e internacionales, por lo que el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) trabajará de manera coordinada con el Estado para la estimación de la mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI), en los sectores de energías limpias, infraestructura y transporte electrificado.

El Plan Sonora de Energías Sostenibles contempla cuatro ejes que se interrelacionan entre sí:



ENERGÍAS LIMPIAS

El principal objetivo será la generación de energía limpia a gran escala, promoviendo el uso de energía fotovoltaica para abastecer las necesidades energéticas por parte del Estado, reducir la dependencia a los combustibles fósiles y contrarrestar los efectos del cambio climático.



INFRAESTRUCTURA DE PUNTA

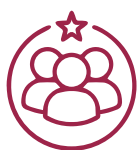
Desarrollar la infraestructura estratégica en varios ejes principalmente:

1. Modernización y vinculación del puerto de Guaymas con Asia y Norteamérica.
2. El desarrollo de parques científicos para estimular la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación.
3. Libramiento vías del ferrocarril en Nogales.
4. Modernización de seis puntos fronterizos y del punto de revisión en Querobabi.



MINERALES ESTRATÉGICOS

Impulsar la electromovilidad y generar un valor agregado a la cadena de valor de elementos estratégicos como el litio, desde la fase minera hasta la fabricación de baterías para vehículos eléctricos, así como la industria de semiconductores.



TALENTO HUMANO

Desarrollo de talento humano y empleos verdes, con la formación y capacitación de ingenieros para vincularlos a sectores de electromovilidad, semiconductores y automatización.

⁶ Fuente: Página web Plan Sonora: <https://plan.sonora.gob.mx/>

IDENTIFICACIÓN INICIAL DEL POTENCIAL DE MITIGACIÓN DE LAS EMISIONES DEL PLAN SONORA

Para identificar el potencial de mitigación es necesario entender los conceptos de GyCEI, emisión, absorción y mitigación, esto es fundamental en la formulación de acciones de mitigación. Sin embargo, no todas las acciones que se formulen tienen el mismo impacto en la reducción de emisiones, el impacto variará entre una acción y otra, por ello es imprescindible conocer el concepto de “potencial de mitigación”.

El potencial de mitigación o de abatimiento está asociado a una magnitud de reducción de emisiones de un sector o actividad determinada y se alinea con ciertas variables aceptadas por la comunidad internacional. Comúnmente se utilizan el crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB), el crecimiento de la población, el avance tecnológico o el costo de la tecnología entre otros. Las estimaciones del potencial de mitigación de las alternativas que se propongan deben considerar la evolución y costo de la tecnología, por ejemplo, las celdas solares, la energía eólica, los vehículos eléctricos, entre otras. Una acción de mitigación tiene mayor o menor potencial de mitigación o de abatimiento en función de la cantidad total de toneladas de CO₂ equivalente que se pueden reducir por su implementación. Dicho valor, comúnmente se asocia a la inversión de recursos económicos necesarios para mitigar una tonelada de CO₂ equivalente, y sus resultados se compararán con otros sectores en los que se debe invertir más o menos recursos para mitigar la misma tonelada.

Se dice que un sector tiene mayor costo de mitigación cuando la inversión para mitigar una tonelada de CO₂ equivalente es menor respecto a otros sectores que tienen un costo de mitigación menor, es decir, que el costo por mitigar 1 tonelada de CO₂ equivalente es proporcionalmente mayor.



GENERACIÓN ELÉCTRICA RENOVABLE

Actualmente, el Estado de Sonora cuenta con 15 plantas solares que producen 1,357.1 MW, que representan el 18% del total de la capacidad instalada en operación comercial de México, lo que la coloca en la vanguardia a nivel nacional (Asociación Mexicana de Energía Solar, 2023).

Energía limpia renovable a gran escala:

Planta Fotovoltaica de Puerto Peñasco

El programa eléctrico del gobierno de la República tiene como eje la atención prioritaria al Sistema Eléctrico Nacional con el fortalecimiento de la empresa del Estado mexicano, CFE, que garantiza el servicio eléctrico a toda la población a precios accesibles, como responsabilidad pública y social.

Parte de este programa es la instalación de una central eléctrica de 1 GW en Puerto Peñasco, Sonora para dar cumplimiento a las estrategias y metas de energías renovables del gobierno de México.

Proyecto Puerto Peñasco I, Sonora: será la central fotovoltaica más grande en Latinoamérica, con 1,000 megawatts (MW)⁷ de capacidad y un sistema de almacenamiento de electricidad de vanguardia de 192 MW para mitigar la intermitencia de la radiación solar. La central también contará con 4 subestaciones eléctricas y 648 km-c de 5 líneas de transmisión aéreas y construirá una línea de transmisión de 315 kilómetros de longitud que correrá de Puerto Peñasco a Mexicali, con lo que se establecen las bases para una próxima interconexión eléctrica entre el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y el Sistema Baja California (CFE, 2023, CFE, 2022).

⁷ Ver: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=3781>

⁸ La etapa inicial, construida por la empresa mexicana SESELEC, producirá 120 MW más 12 MW en baterías como respaldo. El parque fotovoltaico consta de 278 mil paneles solares de alta eficiencia instalados sobre un sistema integrado por más de 2,500 seguidores solares que maximizan la producción de energía. Ver: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=3788>

Se construye en cuatro Secuencias:

- **Secuencia I**, 120 MW: aportará electricidad para el estado de Sonora; entrada en operación abril de 2023, ya en operación, (CFE, 2023b).
- **Secuencia II**, 300 MW: Llevará energía hasta Baja California. Con la línea de transmisión que la acompañará, se romperá el aislamiento que ha sufrido esta península, y se abatirá la carestía energética en la región; entrada en operación febrero de 2024.
- **Secuencia III**, 300 MW: Un segundo corredor de electricidad que duplicará la electricidad inyectada en Sonora; entrada en operación abril de 2026.
- **Secuencia IV**, 280 MW: permitirá disponer de toda la capacidad del campo fotovoltaico, con 1,000 MW que ampliarán la confiabilidad, la seguridad y la potencia del suministro eléctrico; entrada en Operación abril de 2028.

La Secuencia I inició obras el 13 octubre de 2022. Ya se han instalado 16,800 módulos y equipamiento básico⁸. **De la Secuencia II** se firmó el contrato de construcción el 2 de septiembre de 2022 y se avanza en la preparación del sitio.

Como parte del acuerdo bilateral México – Estados Unidos celebrado en Sonora el 28 de octubre del 2022, (Presidencia de la República 2022) (Presidencia de la República 2022b) (Gobierno de Sonora 2023), se consideró: que se replicará la planta de Puerto Peñasco en 5 centrales, que agregarán 5,000 MW adicionales de energía renovable. De acuerdo con el “Plan Sonora”, presentado en dicho encuentro, se ubicarán en:

- Puerto Peñasco II: 1,000 MW
- Cajeme: 1,000 MW
- San Luis Río Colorado: 1,000 MW
- Nogales: 1,000 MW
- Ciudad Obregón: 1000 MW

El acuerdo prevé además 450 MW de energía eólica en otros Estados del país. Así mismo se ha anunciado que el Plan Sonora podría tener incentivos fiscales⁹ similares a los del Istmo de Tehuantepec (Bloomberg, 2023). Para el proyecto que comprende 5,000 MW se ha estimado la mitigación por emisiones evitadas.

Tabla 1. Generación y emisiones evitadas por energías renovables

| OPCIÓN | CAPACIDAD (GW) | | 2030 |
|-----------------|----------------|---|-------|
| En 4 sub-etapas | 1 | Generación en 2030 (GWh) | 1,949 |
| | | Emisiones en 2030 (MtCO ₂ e) | 0.9 |
| En 4 etapas | 4 | Generación en 2030 (GWh) | 7,514 |
| | | Emisiones en 2030 (MtCO ₂ e) | 3.5 |

Fuente: Elaboración INECC, 2024

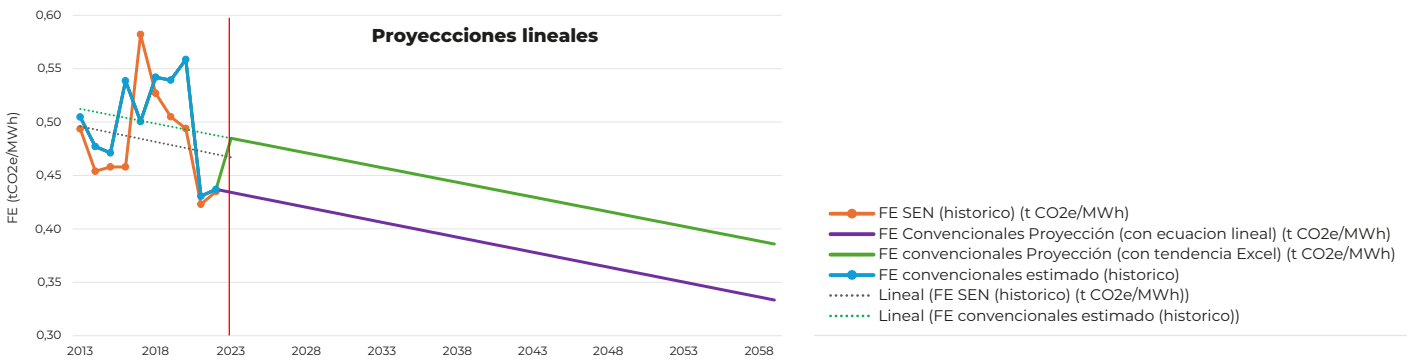
Los supuestos considerados para esta estimación fueron los siguientes:

1. Se aplicó una proyección del comportamiento del FE (factor de emisión) basado en convencionales con base en datos históricos de 2014 a 2022 (se obtienen dividiendo generación total/emisiones totales del INGyCEI), ver gráfico más abajo (SEMARNAT-CRE, 2023), (INECC, 2023), (SENER, 2023).
2. Se considera un factor de planta de 26.80% para el primer 1 GW del proyecto¹⁰.
3. Se considera un factor de planta de 24.45% para los siguientes 4 GW del proyecto
4. Se considera una eficiencia de 85%.
5. La primera etapa del proyecto de Plan Sonora consideraba una capacidad de 1 GW. En esta etapa se consideraron 4 subetapas: empieza en 2023 (etapa IA = 120 MW), 2024 (etapa IB = 300 MW), 2026 (Etapa IC = 300 MW) y 2027 (etapa ID = 280 MW).
6. Una instalación por etapas significa que la capacidad total de una etapa se instaló en fracciones en distintos años (esto aplica para la etapa I).
7. Para todo el proyecto con cuatro etapas se consideró que las etapas II (entra en operación en 2026); la etapa III (entra en operación en 2027); etapa IV (entra en operación en 2028).

⁹ Ver: <https://www.bloomberglinea.com/latinoamerica/mexico/gobierno-de-amlo-decretara-incentivos-fiscales-para-el-plan-sonora/>

¹⁰ Para identificar el factor de planta se utilizó el modelo Renewables.ninja desarrollado por investigadores de la Universidad ETH de Zurich y del Imperial College de Londres, en el que se estima con datos de la NASA y EUMETSAT. Ver: <https://www.renewables.ninja/> Las ubicaciones de la central se orientaron a lo señalado en (CFE, 2022) y (Gobierno de Sonora, 2023) y (Gobierno de Sonora, 2023b). Para el caso de los equipos, se considera un sistema fotovoltaico típico con pérdidas de sistema 0.1; seguimiento: de 1 eje; inclinación: 35°; Azimut: 180°.

Figura 1. Proyección del comportamiento del FE de red



Fuente: Elaboración INECC

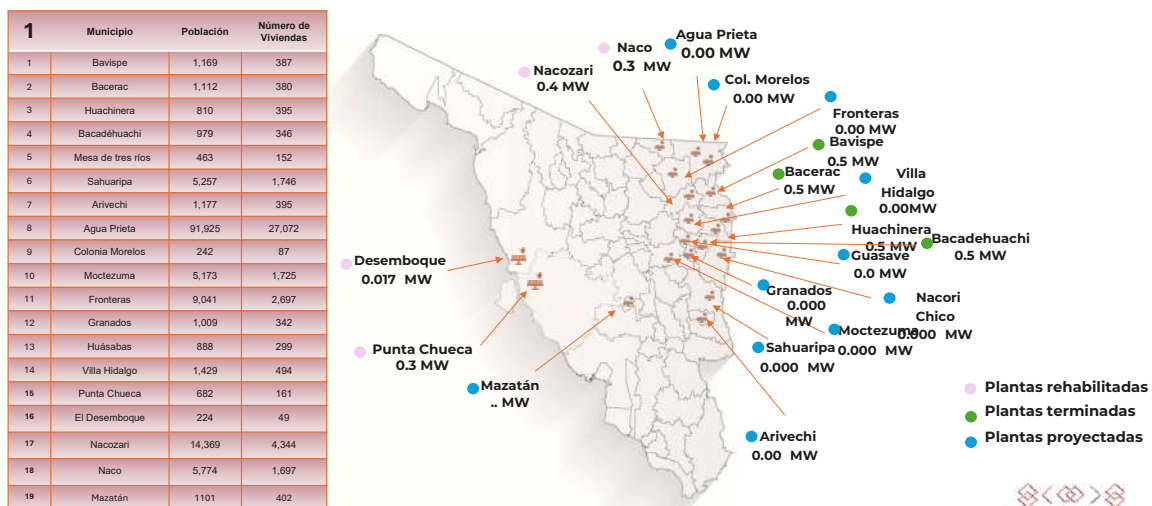
Sistema de Generación Social Distribuida

El Programa Generación Social Distribuida (Gobierno de Sonora, 2024), contempla la construcción de 40 plantas fotovoltaicas, con capacidades entre 0.3 – 0.5 MW, en distintos territorios de Sonora, comenzando por pueblos de la Sierra, donde existe un bajo o nulo acceso, al servicio de electricidad. Este plan abarca un periodo del 2021 al 2027, en total tiene la meta de beneficiar a habitantes de zonas marginadas, reduciendo los gastos de las familias por el consumo de energía.

En el 2023 se concluyó la construcción de las plantas en los municipios de Bavispe, Bacadéhuachi y Huachinera, con capacidad menor a 0.5 MW. Las plantas de Bavispe y Huachinera han sido interconectadas a la red de distribución eléctrica. También se realizaron labores de rehabilitación en dos plantas solares ubicadas en las comunidades Desemboque y Punta Chueca.

Se han realizado diagnósticos para la rehabilitación de las próximas plantas en los municipios de Naco y Nacozari de García avanzando en la integración de proyectos ejecutivos en las plantas solares (Figura 2) en Agua Prieta, Fronteras, Moctezuma, Sarahuipa, Arivechi, Mazatlán, Huásabas, Granados, Villa Hidalgo, y Nácori Chico en la Mesa de Tres Ríos, los estudios de facilidad técnica, formalización de terrenos, la orientación y capacitación a los municipios beneficiados para avanzar en las tareas de operación y mantenimiento de plantas (Gobierno de Sonora, 2023b).

Figura 2. Proyección del comportamiento del FE de red



Fuente: Elaboración Gobierno del Estado de Sonora



Actualmente se trabaja en el diseño de un modelo de Estructura Legal y Gobernanza Aplicable a las plantas de Energía Solar Distribuida, en colaboración con organizaciones de la sociedad civil, este trabajo incluye la formulación del Reglamento, las Reglas de Operación.

Así como los esquemas para la distribución de beneficios a la población mediante la puesta en marcha del “Fondo de Aprovechamiento de las Fuentes de Fomento de Energía Renovables y Eficiencia Energética del Estado de Sonora contemplado en la Ley de Fomento de Energía Renovables y Eficiencia Energética del Estado de Sonora (Gobierno de Sonora, 2023b).

A continuación, se presentan los supuestos aplicados en la estimación de la generación y la mitigación de emisiones evitadas y sus resultados.

1. Alternativa de cálculo 1: Se aplicó el FE red de 2022 constante a lo largo de la vida útil, esto por ser sistemas desconectados de la red (SEMARNAT-CRE, 2023).
2. Alternativa de cálculo 2: Se aplicó una proyección del comportamiento del FE basado en convencionales (generación y emisiones) con base en datos históricos de 2014 a 2022 (se obtienen dividiendo generación total/emisiones totales del INGyCEI), (INECC, 2023), (SENER, 2023).
3. Se considera un factor de planta promedio de 26.0 % para las ubicaciones 1 a 6; 25.59% para las ubicaciones 7 a 16; y 25.82% para las ubicaciones de 17 a 40 (Gobierno de Sonora, 2024), (Gobierno de Sonora, 2023b), (RN, 2024).
4. Se consideró que si no había una indicación específica cada central de gran demanda (GD) tiene una capacidad de 0.5 MW
5. Se considera una eficiencia de 85%.
6. Se dividió la instalación de las 40 centrales de GD en el proyecto de Plan Sonora en 4 etapas la instalación.
 - En la etapa I con una capacidad de 2.55 MW, se instalan en 2023;
 - En la etapa II con una capacidad de 5.5 MW, se instalan en 2024;
 - En la etapa III con una capacidad de 7.0 MW, se instalan en 2025; y
 - En la etapa IV con una capacidad de 4.5 MW, se instalan en 2026

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Generación y emisiones evitadas por energías renovables en generación distribuida

| ETAPA | Capacidad (mw) | 2030 | 2030 | 2030 | 2030 |
|--------------|----------------|------------------|--|----------------------------|---|
| | | Generación (gwh) | Emisiones evitadas (mtco _{2e}) | Generación acumulada (gwh) | Emisiones evitadas acumuladas (mtco _{2e}) |
| I | 2.55 | 4.77 | 2.07E-03 | 38.81 | 0.0169 |
| II | 5.50 | 10.21 | 4.44E-03 | 72.55 | 0.0316 |
| III | 7.00 | 13.13 | 5.71E-03 | 79.76 | 0.0347 |
| IV | 4.50 | 8.48 | 3.69E-03 | 51.27 | 0.0186 |
| TOTAL | 19.6 | 36.6 | 0.016 | 242.39 | 0.102 |

Fuente: Elaboración INECC

Al aplicar la segunda opción de cálculo de los factores de emisión (FE) como se ha indicado previamente se identificó una variación de las emisiones evitadas a 2030 muy reducida de 0.002%.

Generación solar en edificios públicos

Es un programa que busca implementar un sistema de generación solar distribuida en edificios públicos seleccionados con condiciones óptimas para la instalación de paneles solares y promover con ello el uso de prácticas sustentables en edificios públicos priorizando rescatar aquellos de mayor consumo y fomentando el uso de la energía solar como política amigable con el medio ambiente, y que represente un paso de avance en la reducción de la huella de carbono del Estado y sus instituciones.

La iniciativa apunta a lograr hasta un 80% de ahorro en el gasto energético anual del gobierno estatal de aproximadamente 107,142.86 MWh (equivalente a 300 millones de pesos) luego de la amortización de la inversión por parte de las entidades privadas. Se seleccionarán edificios públicos con tarifas elevadas y disponibilidad de techo o aparcamiento para instalar paneles solares. Se consideran para esta medida módulos con una capacidad nominal de 499 kW. (Gobierno de Sonora 2024i).

En la Tabla 3, se muestra la mitigación que podría obtenerse anualmente una vez que se alcanzara a cubrir el 80% del consumo anual en 2030 mediante energía solar fotovoltaica y una vez amortizado el costo de inversión.

Tabla 3. Capacidad requerida y emisiones evitadas en edificios públicos

| PARÁMETRO | VALOR | UNIDAD |
|---|---------------|--------------------|
| Consumo | 107,142.86 | MWh/año |
| Consumo diario teórico promedio | 293.54 | MWh/día |
| Costos anuales | \$300,000,000 | Pesos |
| Costo por MWh | \$2,800.00 | Pesos/MWh |
| Ahorro estimado | 80% | |
| Consumo ahorrado | 85,714.29 | MWh/año |
| Consumo ahorrado diario teórico promedio | 234.83 | MWh/día |
| Capacidad estimada requerida | 45.75 | MW |
| Generación en 2030 | 85,792 | MWh |
| Emisiones evitadas en 2030 | 37,319.38 | tCO ₂ e |
| Ahorro anual estimado en 2030 a costos de enero 2024 | \$303,990,962 | Pesos |
| Ahorro anual estimado en 20230 considerando Precios Marginales Locales (PML) enero 2024 | \$20,283,069 | Pesos |

Fuente: Elaboración INECC

Para esta estimación se aplicaron los siguientes supuestos:

- Se identificó la capacidad requerida a partir del requerimiento de generación anual a ahorrar.
- Se aplicó la tarifa APMT (Alumbrado público en media tensión) identificada en el portal de CFE y el aumento anual porcentual entre 2023 y 2024 de 3%.
- Se consideró que CFE “adquiere” la generación y la compensa al mismo costo de la tarifa APMT a través de uno.
- Se consideró para la estimación del Ahorro los Precios Marginales Locales total (PML) de la energía en 2 nodos de Hermosillo.
- La instalación de la capacidad requerida concluye en 2025.
- El Factor de Emisión es constante, aplicándose el FE de 2022 = 0.435 tCO₂e/MWh.
- Se aplicó el factor de planta del 25.8% promedio de las ubicaciones de las plantas de generación distribuida en el Estado de Sonora. Los paneles solares tienen una degradación de 0.5% anual.

Generación solar en Parques Industriales

Respecto del potencial de mitigación de los parques industriales se ha tomado como ejemplo el “Eco-Parque Industrial y Científico Hermosillo (EPIC)”, este parque tiene un área total de 325 hectáreas, se encuentra ubicado al noroeste del municipio de Hermosillo en el Estado de Sonora. Está sobre la carretera federal México 15 (carretera a Nogales) entre la intersección del boulevard Gustavo Mazón López con esta misma, delimitado hacia el oriente con el centro de población San Pedro el Saucito a 2.5 kilómetros de la caseta de cobro CAPUFE No. 152 Hermosillo (Gobierno de Sonora, 2023c). En la siguiente Tabla 4, se muestra la división por tipo de uso del proyecto, y en la Tabla 5, se muestran las estimaciones de consumos de energía, agua y gas natural del parque.

Tabla 4. Usos de suelo en el parque industrial EPIC

| | Superficie (ha) | Superficie (m ²) |
|----------------------------|-----------------|------------------------------|
| Uso de suelo | 325 | 3,250,000 |
| Lotes industriales | 200 | 2,000,000 |
| Investigación y Desarrollo | 32.5 | 470,000 |
| Reserva | 47 | 263,000 |
| Vialidades | 26.3 | 79,000 |
| PTAR | 7.9 | 3,250,000 |
| Red Pluvial | 2.7 | 27,000 |
| GEE y Subestación | 8.6 | 86,000 |
| TOTAL | 325 | 3,250,000 |

Fuente: Elaboración INECC

Tabla 5. Consumos de agua energía y gas natural del parque industrial

| SERVICIO | Estimaciones por hectárea | Estimaciones para el parque (200 ha de lotes industriales) |
|-------------|---------------------------|--|
| Gas natural | 5,390 m ³ /día | 1,077,347.89 m ³ /día |
| Agua | 0.75 L/s | 150 L/s |
| Energía | 0.73 MW | 150 MW |

Fuente: Elaboración Gobierno del Estado de Sonora

Con base en la información contenida en el documento antes mencionado (Gobierno de Sonora, 2023c) se estimaron las emisiones evitadas. Para ello se aplicaron los siguientes supuestos.

- Se utilizan para la generación de energía eléctrica (GEE) 6.0 de las 8.6 hectáreas destinadas a la Generación de Energía Eléctrica y Subestación; también se utiliza el 60% de la superficie destinada para naves industriales (techos de las naves) también para la GEE y el 42.5% de la reserva para este fin.
- Se requiere 30% de toda la superficie destinada a la instalación de paneles solares para vialidades de servicio de los paneles y otras instalaciones.
- Se considera que para cada MW de capacidad instalada se requieren 3.1 ha de terreno.
- Los paneles requeridos para toda la capacidad se instalarán en 2024.
- Se consideró un Factor de Planta de 25.82% y el Factor de Emisión de red de 2022.

En la siguiente Tabla 6 se muestra que bajo estos supuestos el parque industrial podría contar con una superficie de 102.2 ha para la instalación de paneles en vez de solo 6 ha, con ello podrían instalarse 33 MW y con esto cubrir el 22.0% de la demanda total de capacidad. En este supuesto se estimó la mitigación que la generación de 33 MW podría representar y las emisiones evitadas.

Tabla 6. Capacidad potencial del parque industrial EPIC

| PARÁMETRO | VALOR | UNIDAD |
|---|-------|--------|
| Factor de Planta | 25.8% | |
| Contribución respecto de la demanda | 22.0% | |
| Superficie destinada a naves industriales | 200 | ha |
| Porcentaje de aprovechamiento de superficies de naves | 60% | |
| Superficie destinada a techos de naves | 120 | ha |
| Superficie destinada a la GEE y Subestación | 8.6 | ha |
| Porcentaje destinado a instalación de paneles | 70% | |
| Superficie total de los paneles | 6.0 | ha |
| Superficie en la reserva potencialmente para paneles solares | 20.0 | ha |
| Superficie total potencial aprovechable para paneles | 146.0 | ha |
| Superficie requerida por MW | 3.1 | ha |
| Porcentaje de la superficie destinada a servicios y vialidades en paneles solares | 30% | |
| Superficie destinada a paneles | 102.2 | ha |
| Demanda de capacidad | 150.0 | MW |
| Capacidad en MW posibles | 33.0 | MW |

Fuente: Elaboración INECC con datos del Gobierno del Estado de Sonora

En la siguiente Tabla 7 se muestran los resultados de aplicar estos supuestos.

Tabla 7. Generación y emisiones evitadas potenciales del parque industrial EPIC

| PARÁMETRO | EN 2030 | UNIDADES |
|--------------------------------------|---------|---------------------|
| Generación en 2030 | 61.52 | GWh |
| Generación acumulada | 437.2 | GWh |
| Emisiones evitadas en 2030 | 26,762 | tCO ₂ e |
| Emisiones evitadas acumuladas a 2030 | 0.190 | MtCO ₂ e |

Fuente: Elaboración INECC con datos del Gobierno del Estado de Sonora

En relación con el suministro de agua potable, el tratamiento del agua residual y la captación pluvial (Tabla 8) se han estimado las emisiones evitadas en el caso de que el consumo eléctrico por estas actividades fuera cubierto con energía renovable. Para esto se consideraron los siguientes supuestos:

- Se ha supuesto que del total de la captación pluvial teórica solamente se puede utilizar el 50%.
- Se ha supuesto que se genera 60% de agua residual a partir del caudal suministrado de agua potable, esto debido a la evaporación y otros usos.
- Se utilizan las intensidades energéticas en kWh/m³ de agua de la ciudad de Mexicali, Baja California correspondientes al suministro y tratamiento de agua.

Tabla 8. Consumo de energía por suministro de agua potable, por el tratamiento de aguas residuales y emisiones evitadas potenciales del parque industrial EPIC

| PARÁMETRO | VALOR | UNIDAD |
|---|-----------|------------------------|
| Energía consumida por m ³ de agua potable producido en (kWh/m ³) (*) | 0.27 | kWh/m ³ |
| Energía consumida por m ³ de agua residual tratado en (kWh/m ³) (*) | 0.36 | kWh/m ³ |
| Demanda anual de agua | 4,300,000 | m ³ /a |
| Captación pluvial anual teórica | 1,272,388 | m ³ /a |
| Eficiencia utilización | 50% | |
| Captación pluvial anual teórica | 636,194 | m ³ /a |
| Caudal por suministrar | 3,663,806 | m ³ /a |
| Porcentaje de agua residual producida | 60% | |
| Caudal de agua residual | 2,580,000 | m ³ /a |
| Demanda de energía por el suministro | 988,975 | kWh/a |
| Demanda de energía por tratamiento de agua residual | 923,898 | kWh/a |
| Consumo de energía por suministro y tratamiento de agua | 1,913 | MWh/a |
| FE SEN (2022) | 0.435 | tCO ₂ e/MWh |
| Emisiones por suministro de agua | 832 | tCO ₂ e |

*Nota: Valores de la ciudad de Mexicali. Ver estudio "Análisis de Oportunidades Potenciales de Eficiencia Energética (EE) y Energías Renovables (ER) en los Servicios de Agua Municipales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/690390/INFORME_An_lisis_de_oportunidades_potenciales_de_eficiencia_energ_tica-CC.pdf

Fuente: Elaboración INECC con datos del Gobierno del Estado de Sonora

GENERACIÓN ELÉCTRICA RENOVABLE

CONSIDERACIONES

- La generación solar fotovoltaica en Sonora es favorable, sin embargo, este potencial se ve limitado por la capacidad de la red de transmisión desde los puntos de generación a los centros de carga.
- El potencial de mitigación se encuentra entre los 0.9 MtCO₂e para 1 GW (etapa I) hasta aproximadamente 3.5 MtCO₂e para 4 GW (etapa II a V).
- Actualmente algunas de las líneas de transmisión congestionadas se encuentran en la gerencia de Control Regional que incluye al estado de Sonora, así mismo la carencia de conexiones al sistema aislado Baja California o a los Estados Unidos de América y una ampliación de la capacidad de transmisión en dirección al sur del Estado se pueden ver como uno de los obstáculos principales.
- Los planes evaluados incluidos en el Plan Sonora consideran usos directos de la energía en centros de carga como son los parques industriales, el puerto de Guaymas y posiblemente su exportación (que no contribuiría a la descarbonización de los usos finales de la energía en México sino en los Estados Unidos). Estos planes podrían verse complementados al incluir el uso de la energía renovable no solo para los fines ya previstos sino que se podría adquirir un valor agregado al aplicarla a la desalinización de agua para suministro industrial/residencial/agrícola, la generación de hidrógeno y amoniaco verde, que son la base para la producción de fertilizantes y combustibles sintéticos de forma local en el puerto de Guaymas, la producción de combustibles para la navegación, o la utilización para suministro de vehículos eléctricos de carga.
- En cuanto a la generación distribuida esta contribuye directamente al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sustentable y al desarrollo social, la ampliación de este programa podría traer grandes beneficios sociales.
- La generación solar en edificios públicos y parques industriales puede contribuir con 0.037 y 0.027 MtCO₂e respectivamente a la mitigación del Plan Sonora.
- Se podría estimar la mitigación de otras medidas si se contara con los datos necesarios.





RESUMEN MITIGACIÓN DEL EJE ENERGÍA

En la siguiente Tabla 9, se resumen los datos de generación y mitigación de los cuatro rubros relacionados con la generación limpia del Plan Sonora.

Tabla 9. Generación y emisiones evitadas del Plan Sonora

| EMISIONES EVITADAS POR: | Generación (GWh) | Mitigación en (MtCO ₂ e) |
|---|------------------|-------------------------------------|
| Planta fotovoltaica 1 GW Puerto Peñasco etapa I | 1,949 | 0.9 |
| Plantas fotovoltaicas 4 GW Puerto Peñasco etapas II a IV | 7,514 | 3.5 |
| 40 centrales de generación distribuida | 36.6 | 0.016 |
| Generación solar en edificios públicos | 85.8 | 0.037 |
| Generación solar en parques industriales | 61.52 | 0.027 |
| Total, considerando primera etapa de Puerto Peñasco I | 2,133 | 0.98 |
| Total, considerando cuatro etapas de Puerto Peñasco II a IV | 7,698 | 3.58 |

Fuente: Elaboración INECC con datos del Gobierno del Estado de Sonora

La central de Puerto Peñasco I, puede producir tanta energía como una central de ciclo combinado de 284 MW o como una central a turbina de gas de 750 MW. En total solo con los elementos considerados se podría tener una mitigación de aproximadamente un 1 MtCO₂e en 2030.

INFRAESTRUCTURA

La Puerta Logística del Noroeste contempla una serie de inversiones en infraestructura de punta que facilitarán la eficiencia comercial y suplirá el incremento en el flujo de mercancías proveniente de las nuevas industrias.

La infraestructura que se desarrollará en este proyecto tiene como objetivo convertir a Sonora en un Hub Comercial atractivo para inversores de todo tipo, brindándoles la posibilidad de mejorar la movilidad de sus productos de manera eficiente. Esto se logrará mediante la implementación de una alternativa comercial que se adapte a sus necesidades específicas. Para alcanzar este propósito, se ampliarán y optimizarán las carreteras para facilitar el transporte terrestre de carga, agilizando así los trámites comerciales a través de la implementación de 6 aduanas modernas con una amplia cobertura de atención. Además, se llevará a cabo la expansión y equipamiento de 2 aeropuertos de carga para mejorar el transporte aéreo de mercancías. Por otro lado, se garantizará un aumento en la cobertura del transporte ferroviario mediante la mejora de las vías del tren en Nogales y la modernización del Puerto de Guaymas, lo que facilitará el movimiento eficiente de la carga a través de la red ferroviaria. Todo esto favorecerá un flujo comercial eficiente, rápido y moderno por cualquiera que sea la vía más efectiva para los inversionistas, reduciendo los tiempos de entrega y permitiendo mejores condiciones para el comercio internacional.

Movilidad - Tren Guaymas-Nogales-Arizona y Guaymas-Mexicali

Desde el punto de vista comercial, Nogales opera 6 trenes diarios que atienden segmentos industriales agrícolas, mineros entre otros (Tabla 10), convirtiéndose la ciudad en el 17% de los intercambios fronterizos de Sonora y el 6.5 % del país.

Tabla 10. Segmentos de Importación y Exportación del ferrocarril Nogales – Guaymas

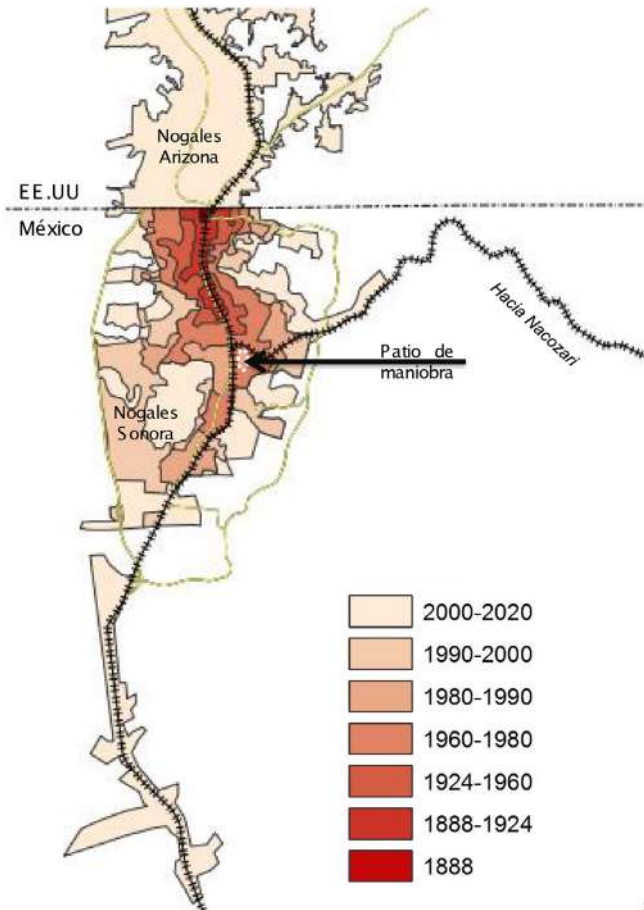
| SEGMENTO | Importación | Exportación | Total |
|--------------------------|----------------------------|-------------|------------|
| | (MILES DE TONELADAS, 2021) | | |
| Agrícolas | 960 | 39 | 999 |
| Industriales | 179 | 663 | 842 |
| Minerales | 664 | 40 | 705 |
| Químicos y Fertilizantes | 57 | 595 | 652 |
| Energía | 469 | 0 | 469 |
| Otros | 70 | 526 | 596 |
| TOTAL | 400 | 863 | 263 |

Fuente: Gobierno del Estado de Sonora

El continuo crecimiento poblacional de la ciudad ha ocasionado que los asentamientos se localizan alrededor de las vías ferroviarias que atraviesan la ciudad dividiéndola en tres partes (Figura 3).



Figura 3. Línea Férrea Guaymas – Nogales que atraviesa la ciudad de Nogales. Densidad poblacional de la ciudad de Nogales desde 1880



Fuente: Gobierno del Estado de Sonora

El Plan Sonora prevé un aumento significativo en el flujo de mercancías, lo que se espera que impulse el comercio a través de la vía férrea. Este incremento podría resultar en un aumento de entre 3 y 10 veces en los cruces diarios de trenes por la ciudad de Nogales. Esta situación podría provocar períodos más prolongados de congestión vehicular en la ciudad, ya que los automóviles esperarían mientras el tren realiza sus operaciones, lo que a su vez generaría mayores emisiones de CO₂ debido a la combustión de vehículos detenidos.

Para mitigar este impacto, se propone la reubicación de las vías férreas hacia las afueras de la ciudad. Esta medida ayudaría a evitar la congestión y reducir las emisiones de CO₂ al disminuir el tiempo en que los vehículos permanecen inactivos. De hecho, se estima que la movilización de las vías permitiría evitar el paso de hasta 402 mil camiones por Nogales cada año. En cuanto a la infraestructura de comunicaciones en el Estado de Sonora, se dispone tanto de un sistema carretero como de una red ferroviaria, como se detalla en las tablas siguientes:

Tabla 11. Distancias entre fronteras y puertos en el Sistema de transporte de Sonora

| Km Carretera / Vía Férrea | Mexicali | Nogales | Guaymas | Topolobampo | Ciudad Juárez | Ojinaga |
|---------------------------|----------|---------|---------|-------------|---------------|---------|
| Mexicali | - | 590 | 834 | 1212 | 1,101 | 1,456 |
| Nogales | sr | - | 417 | 795 | 573 | 909 |
| Guaymas | 808 | 419 | - | 455* | 874 | 961 |
| Topolobampo | 1,234* | 795* | 390* | - | 1,274 | 909 |
| Ciudad Juárez | sr | sr | 887* | 1,265* | - | 577 |
| Ojinaga | sr | sr | 976* | 943 | sr | - |

*Distancias por carretera. Los datos sin asterisco son por vía férrea. sr= Sin ruta (dentro del territorio mexicano)

Fuente: Elaboración INECC, 2024 con datos de Google Maps

Con base en la información contenida en el documento antes mencionado (Gobierno de Sonora, 2023c) se estimaron las emisiones evitadas. Para ello se aplicaron los siguientes supuestos.

Tabla 12. Distancias entre fronteras y puertos en el Sistema de transporte de Sonora


| DE GUAYMAS A: | Km Vía Férrea | Km Carretera |
|----------------|---------------|--------------|
| Manzanillo | 1 714 | 1 465 |
| Ciudad Juárez | - | 874 |
| Mexicali | 808 | 834 |
| Mazatlán | 756 | 761 |
| Topolobampo | - | 455 |
| Nogales | 419 | 419 |
| Hermosillo | 386 | 386 |
| Ciudad Obregón | - | 129 |
| Empalme | 148 | 148 |

Fuente: Elaboración INECC, 2024 con información de ASIPONA Guaymas y Google Maps

El sector del autotransporte de carga en Sonora ha tenido un crecimiento con una tasa promedio anual de la flota del 3%, impulsada por la demanda de servicios de transporte hacia puertos marítimos y zonas con alta actividad turística o industrial (Instituto Mexicano del Transporte, 2016).

En comparación, el transporte por ferrocarril representa aproximadamente el 0.3% de las emisiones directas de CO₂ a nivel mundial, según la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, su eficiencia se destaca en informes como "The Positive Environmental Effects of Increased Freight by Rail Movements in America", que indica que el transporte de carga por ferrocarril es de tres a cuatro veces más eficiente en el consumo de combustibles que el transporte por carretera, con una capacidad de reducción de emisiones de hasta un 75% en promedio (Asociación Americana de Ferrocarriles, AAR).

Tabla 13. Concesionarios

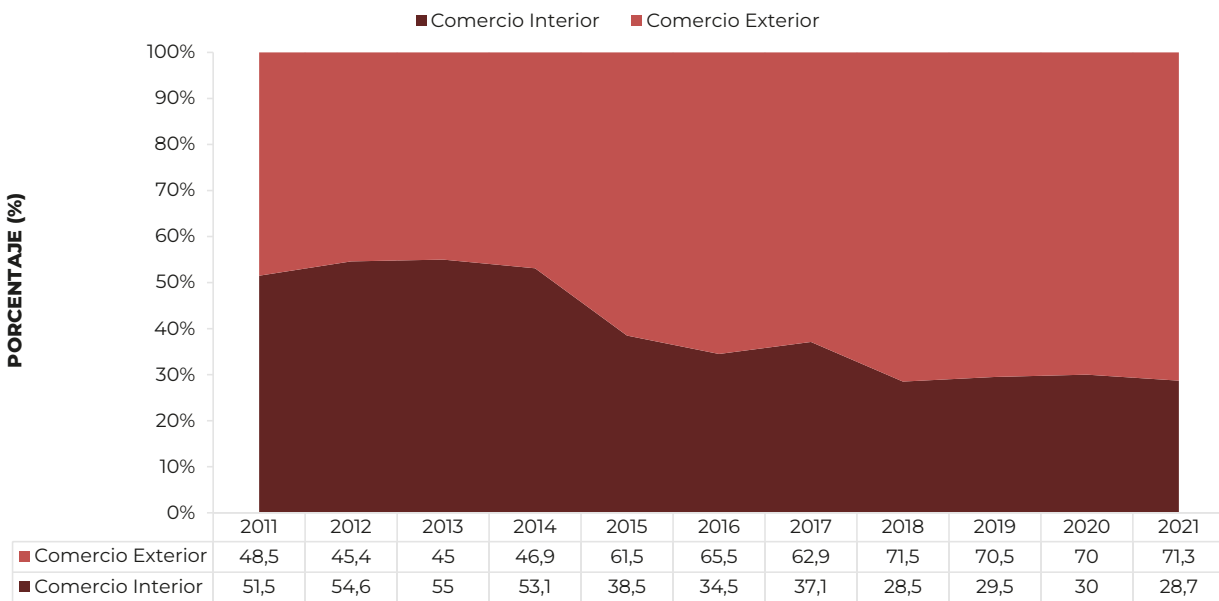
| CONCESIONARIO / ASIGNATARIO | Vía concesionada (Troncales y Ramales) | Fecha de otorgamiento del Título | Última Modificación al Título | Km de vía |
|---|--|----------------------------------|-------------------------------|-----------|
|  | Pacífico-Norte | 22-jun-97 | 31-ene-17 | 6,867 |
| | Ojinaga-Topolobampo | 22-jun-97 | | 943 |
| | Vía corta Nacoziari | 22-jun-97 | | 320 |

Fuente: Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario

El tráfico dominante en el transporte de mercancías es el relacionado con comercio exterior, junto con el detalle del tipo de tráfico de comercio exterior dominante, figura 4, en la que se presenta la evolución histórica de los porcentajes de importaciones y exportaciones. Donde se aprecia que las importaciones representan la gran mayoría del tráfico, consolidándose como el principal movimiento de carga en el Servicio Ferroviario Mexicano (SFM).

Tan sólo en 2021, se movilizaron 70.3 millones de toneladas en mercancías de importación, valor que constituye el 76.0% del total de tráfico de comercio exterior y el 54.2% del volumen de carga transportada en el SFM en el año.

Figura 4. Evolución del tráfico de comercio exterior e interior, del periodo 2011-2021



Fuente: Modificado INECC, 2024 con información de la Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario

La carga de importación ha aumentado considerablemente durante los últimos años, pasando de 43.2 millones de toneladas en 2011 a la cifra de 70.3 millones de toneladas en 2021, lo cual representa un incremento global de 62.8% en una década (Figura 5, tabla 14).

Figura 5. Exportaciones e importaciones del periodo 2011-2021



Fuente: Modificado INECC, 2024 con información de Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario

Tabla 14. Carga transportada por tipo de tráficos

| Tipo de tráfico | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 21 VS 20 |
|-------------------|-------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | (Millones de toneladas / año) | | | | | | | | | | | |
| Importaciones | 43.2 | 41.1 | 37.9 | 41.3 | 54.8 | 61.2 | 61.2 | 67.2 | 66 | 62.9 | 70.3 | 11.8% |
| Exportaciones | 9.5 | 9.7 | 12.5 | 12.8 | 18.0 | 18.7 | 18.6 | 24.3 | 22.3 | 21.3 | 22.3 | 4.5% |
| Comercio exterior | 52.7 | 50.7 | 50.3 | 54.1 | 72.8 | 79.9 | 79.8 | 91.5 | 88.3 | 84.2 | 92.6 | 10.0% |
| Tráfico local | 55.8 | 60.9 | 61.6 | 61.4 | 45.6 | 42.1 | 47.1 | 36.5 | 36.9 | 36.2 | 37.3 | 3.1% |
| Tráfico total | 108.9 | 111.7 | 11.9 | 115.5 | 118.5 | 122.0 | 126.9 | 128.0 | 125.2 | 120.4 | 129.9 | 7.9% |

Fuente: Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario

Las exportaciones han experimentado un crecimiento sostenido en términos tanto de volumen de carga transportada como de porcentaje de participación, en el total del comercio exterior. En 2021, el movimiento de exportaciones fue de 22.3 millones de toneladas transportadas, lo que equivale al 24.0% del total de tráfico de comercio exterior y a 17.1% de toda la carga movilizada en el SFM durante el año. La distribución de las importaciones y exportaciones por puerto y frontera, donde destacan las fronteras de Nuevo Laredo y Piedras Negras y los puertos de Veracruz y Manzanillo con el mayor volumen de productos de importación (figura 6 y 7).

Figura 6. Carga de Importación / exportación en puerto y fronteras en el año 2021



Fuente: Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario

Figura 7. Carga de Importación / exportación en puerto y fronteras en el año 2021. Zona de Sonora



Fuente: Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario

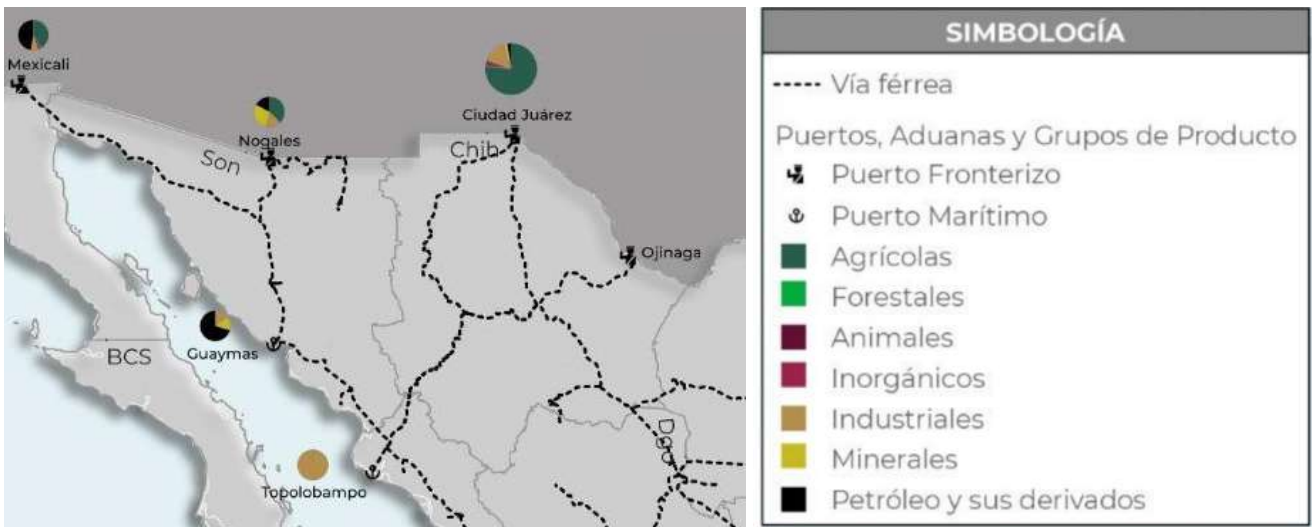
En términos de importaciones

- Por la frontera, Nogales en el 2021 reportó 2.4 millones de toneladas, que representa el 4.5% de las 52.1 millones de toneladas de importaciones por fronteras reportadas en el 2021 a nivel nacional.
- El puerto de Guaymas reportó 0.3 millones de toneladas, que representa el 1.7% de las 18.2 millones de toneladas de importaciones por puertos reportadas en el 2021 a nivel nacional (Figura 8).

En términos de exportaciones

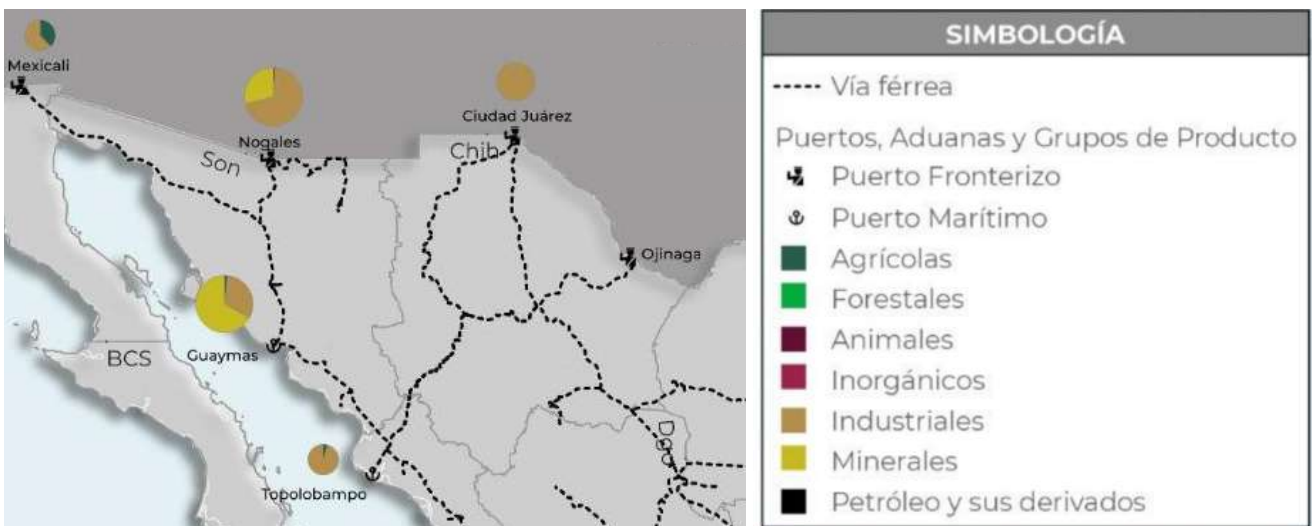
- Por la frontera, Nogales en el 2021 reportó 2.5 millones de toneladas, que representa el 15.1% de las 16.76 millones de toneladas de exportaciones por fronteras reportadas en el 2021 a nivel nacional. Las mercancías que dominan el tráfico de exportaciones en Piedras Negras y Nogales son la cerveza, con cerca de 4.1 millones de toneladas.
- Por el puerto de Guaymas se reportó 2.4 millones de toneladas, que representa el 43.6% de las 5.5 millones de toneladas de exportaciones por puertos reportadas en el 2021 a nivel nacional. El producto que domina la exportación por el puerto de Guaymas son los minerales de hierro, con aproximadamente 1.0 millón de toneladas (figura 9).

Figura 8. Importaciones por tipo de producto en puerto y frontera



Fuente: Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario

Figura 9. Exportaciones por tipo de producto en puerto y frontera



Fuente: Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario

El cambio modal del transporte de carga de la carretera al ferrocarril tiene un potencial significativo para reducir las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. Según el informe "Freight Rail & Climate Change: Reducing Emissions, Building Resiliency" de la AAR, este cambio puede mitigar emisiones en un rango de 0.041 a 0.302 MtCO₂e para diferentes escenarios, al evitar que la carga, en lugar de ser transportada por carretera, se movilice por ferrocarril.

Además, el informe "Transport and environment report 2020" de la Agencia Ambiental Europea destaca que el transporte ferroviario, especialmente los trenes de alta velocidad emiten significativamente menos gases y compuestos de efecto invernadero que el transporte por carretera y aire.

En la Unión Europea, el ferrocarril contribuye solo con el 0.4% de las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero del transporte, en comparación con el 13.2% de la aviación y el 71.8% del transporte por

carretera (Transport and environment report 2020). Un cambio modal hacia el tren puede, por lo tanto, ofrecer beneficios sustanciales para reducir las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero y minimizar otros impactos ambientales negativos asociados con el transporte.

Tomando en cuenta el crecimiento del 3% reportado por el Instituto del Transporte del sector autotransporte de carga y suponiendo que la carga ferroviaria guarda la misma tasa de crecimiento, aplicado al volumen de carga transportado en el Estado, en un plazo de 10 años y fomentando que el crecimiento se favorezca únicamente al transporte ferroviario, bajo esta consideración se estima un crecimiento de cerca de 2.61 millones de toneladas acumuladas en 10 años (Figura 10 y 11).

Figura 10. Estimación del movimiento de mercancías (exportación + importación) del Estado de Sonora por tipo modal en Millones de toneladas

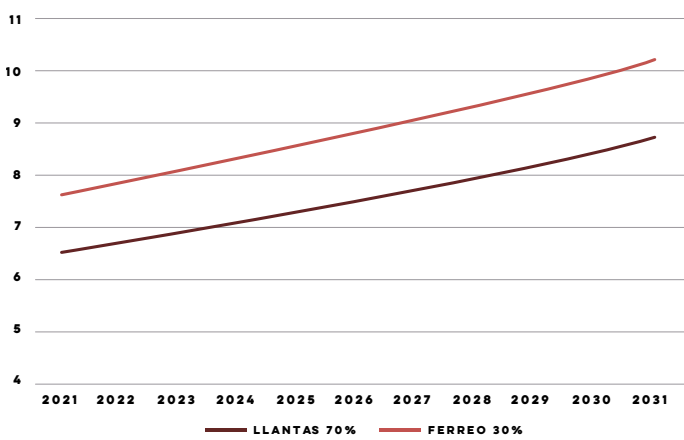
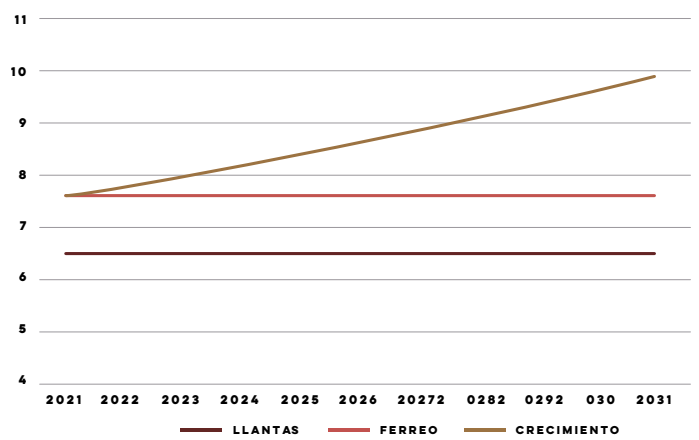


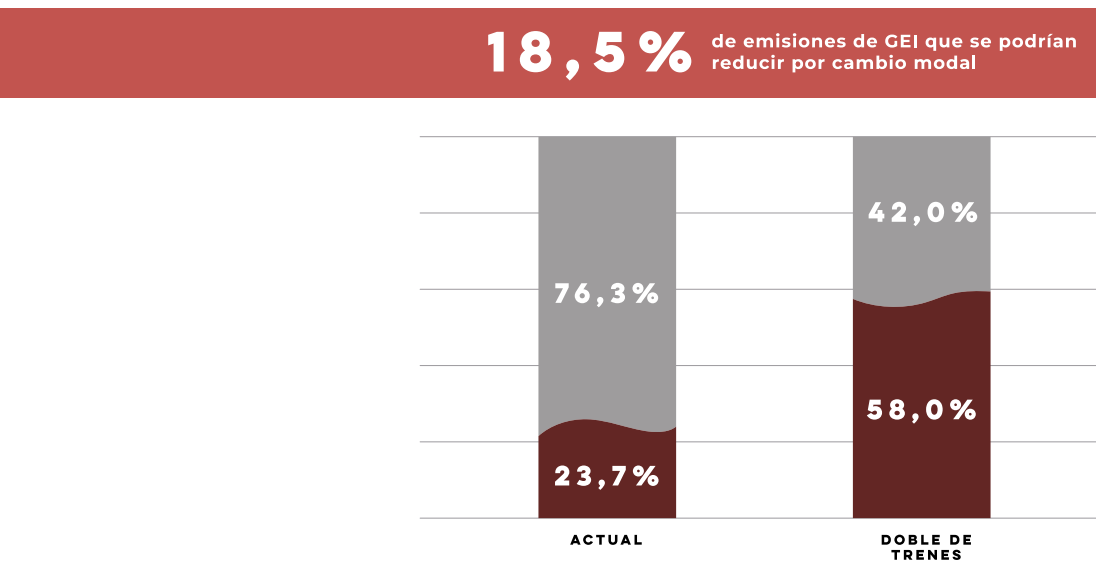
Figura 11. Proyección del crecimiento del movimiento de mercancías del Estado de Sonora favoreciendo el crecimiento en vías férreas



Fuente: Elaboración INECC, 2024

Un cambio modal de autobuses a trenes (doble de trenes) en la ruta Guaymas-Nogales podría reducir el 18.5% de las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero relacionadas con la carga anual de 4.263 millones de toneladas. La distancia entre Guaymas y Nogales es de 419 km, y se operan diariamente 6 trenes de capacidad de 17 carros cada uno (Figura 12).

Figura 12. Porcentaje de reducción de gases y compuestos de efecto invernadero al realizar un cambio modal de transporte de carga de autobuses a trenes



Fuente: Elaboración INECC, 2024 con información de Gobierno del Estado de Sonora

Potencial de mitigación de emisiones por la ruta Guaymas-Nogales vs Panamá Galveston

La propuesta de cambiar la ruta del transporte de carga entre Hong Kong y San Diego podría reducir las emisiones de CO₂ equivalente, lo que contribuiría a la mitigación del cambio climático. La ruta propuesta es Hong Kong-Guaymas-Nogales-San Diego en lugar de la ruta Hong Kong-Panamá-Galveston-San Diego y la respectiva comparación de emisiones de CO₂ equivalente en las dos rutas.

La ruta marítima Hong Kong-Panamá-Galveston y su conexión por medio de trenes de Galveston a San

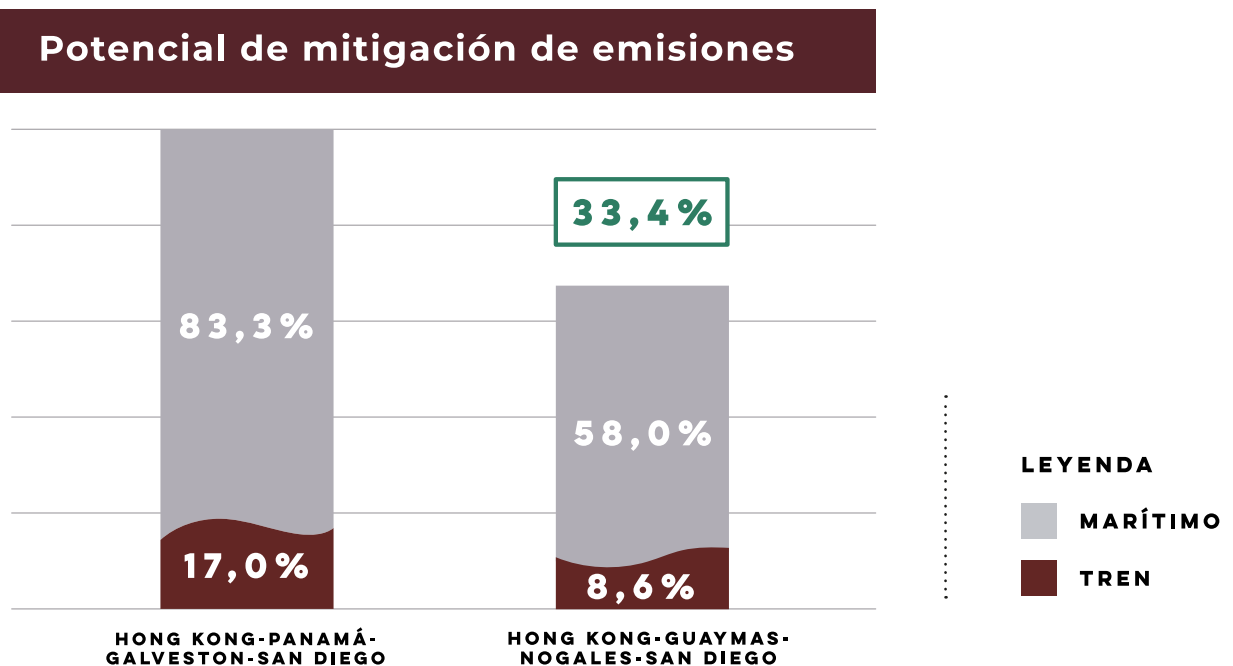
Tabla 15. Distancias de rutas de transporte de carga considerando el modo marítimo y ferroviario

| DISTANCIAS | Marítimo (km) | Trenes (km) |
|--------------------------------------|---------------|-------------|
| Hong Kong Panamá Galveston San Diego | 17902 | 2640 |
| Hong Kong Guaymas Nogales San Diego | 12510 | 1333 |

Fuente: Elaboración INECC, 2024 con información de ASIPONA Guaymas. BNSF rail. Google Maps.

Diego genera un 33.4% más de emisiones de CO₂, al compararla con la ruta marítima Hong Kong-Guaymas y su conexión por vía férrea Guaymas-Nogales-San Diego, por lo tanto, la ruta Hong Kong-Guaymas-Nogales-San Diego presenta una reducción de emisiones de CO₂ equivalente (Figura 13).

Figura 13. Porcentaje de reducción de gases y compuestos de efecto invernadero al realizar un cambio de ruta de transporte de carga entre Hong Kong y San Diego



Fuente: Elaboración INECC, 2024 con datos Commission for Environmental Cooperation. Sustentabilidad. Reducción de las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero generadas por el transporte de carga en América del Norte, 2011

Ampliación y modernización de carreteras

El Plan Sonora, contempla dentro de sus proyectos de infraestructura de punta, la ampliación y modernización de dos carreteras:

Modernización de carretera Guaymas-Chihuahua

La ampliación y modernización de la carretera Guaymas-Chihuahua, forma parte de las obras de modernización del Puerto de Guaymas. Permite mayor flujo de mercancías, y abre una vía en el ámbito turístico, principalmente para el destino San Carlos. El proyecto carretero considera una distancia de más de 400 kilómetros entre ambos estados, se espera derivará en una gran derrama económica en materia de exportación de productos, turismo, puntos de salida para la producción agropecuaria, manufacturera e industrial y beneficio social para los dos estados. (Gobierno del Estado de Sonora, 2024d).

Modernización de la carretera Agua Prieta-Bavispe

La nueva Agua Prieta – Bavispe es un proyecto que busca propiciar el desarrollo de las poblaciones de la sierra sonorenses. Su construcción se lleva a cabo con concreto hidráulico para darle resistencia y durabilidad. Además de las ventajas económicas y sociales de la nueva carretera, es una ventaja para la cadena de valor del litio, dado que en la sierra es donde se encuentran las mayores reservas sonorenses de este mineral estratégico para industrializar y comercializar el Litio en la entidad con la fabricación de baterías y de automóviles eléctricos, aunado a la producción de medicamentos con este mineral. Beneficiará a más de 77,000 habitantes de las comunidades de Agua Prieta, Colonia Morelos, La Morita, Bavispe y de la Sierra Alta de Sonora, que, al mismo tiempo, optimizará el traslado de mercancías agrícolas y ganaderas (Gobierno del Estado de Sonora, 2024e).

Potencial de Mitigación por ampliación y modernización de carreteras

En el marco del compromiso continuo de México con la mitigación del cambio climático, el sector transporte juega un papel crucial debido a su significativa contribución a las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero y otros contaminantes nocivos. Según la última actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero de México, en el 2021 el autotransporte fue responsable de emitir 139 millones de toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e). Esto lo convierte en la segunda mayor fuente de emisiones en el país, solo superada por la generación de energía eléctrica. Por lo tanto, las emisiones del transporte representaron el 19.5% del total de GyCEI emitidos por México en ese año.

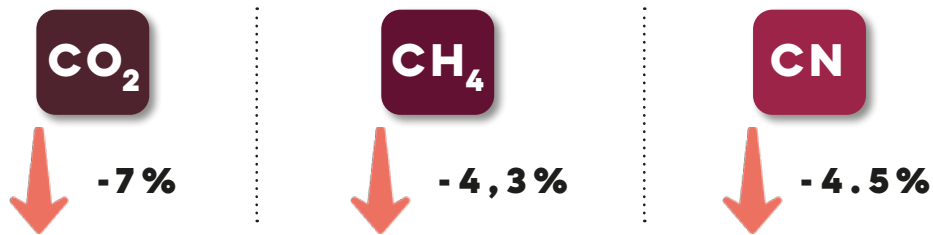
La inversión en infraestructura de carreteras permite una conducción más eficiente, disminuyendo las emisiones de gases, lo que coadyuva en la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, a través de:

Pasar de caminos rurales a carreteras pavimentadas

El tipo y la calidad de los caminos por los que circulan los vehículos influye en la cantidad de emisiones que se generan. Los caminos pavimentados y con mantenimiento frecuente, permiten realizar el traslado de los vehículos de una forma más eficiente, aún si se recorren las mismas distancias, existen diferencias en las emisiones si el recorrido se realiza en caminos rurales o en caminos urbanos.

Para evaluar este efecto, se utilizó el modelo de simulación MOVES (*Motor Vehicle Emissions Simulator*) en su versión adaptada para las condiciones de México (MOVES-México)¹¹, las simulaciones realizadas permitieron obtener factores de emisión para cada tipo de camino (rural y urbano) y se observó la siguiente mitigación al cambiar de un camino rural a uno camino urbano:

Figura 14. Potencial de mitigación por cambio de camino rural a urbano



Fuente: Elaboración INECC, 2024

Por mejorar la velocidad

La nueva infraestructura en carreteras y caminos, además de mejorar el estado del camino, generalmente genera beneficios importantes en los tiempos de recorrido, ya sea por hacer un camino más eficiente en cuestión de distancia o por la incorporación de nuevas carreteras que permitan desahogar el tráfico vehicular y mejoren las velocidades de recorridos.

El potencial de mitigación de esta medida dependerá de cuánto se reduzcan los tiempos de recorrido para los futuros usuarios, por ejemplo, considerando una reducción del 30% del tiempo de viaje se tiene la siguiente reducción de emisiones:

Figura 15. Ejemplo de potencial de mitigación considerando una reducción del 30% del tiempo de viaje



Fuente: Elaboración INECC, 2024

¹¹ La Guía de usuario y las especificaciones de la adaptación del modelo MOVES-México se pueden consultar en: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pa00mbg7.pdf



Ampliación y modernización de aduanas terrestres

Con una inversión de 5 mil millones de pesos, las aduanas de Nogales, Agua Prieta, Naco, Sonoyta, San Luis Río Colorado y Guaymas serán modernizadas para mejorar y agilizar los procesos que en cada una se realizan.

SAN LUIS RÍO COLORADO

Proyecto de renovación de Aduana. Se invertirán 626 millones en la modernización del cruce fronterizo con Estados Unidos, en la incorporación de vialidades, pues la mancha urbana ha absorbido a la aduana y además se instalarán equipos de rayos X.

SONOYTA

Tiene contemplado destinar 538 millones de pesos para modernizar las instalaciones y se tiene contemplado a través del Servicio de Administración Tributario (SAT) adquirir un predio de 3.7 hectáreas. La ampliación de la aduana busca hacer más eficiente la entrada y salida de mercancías y particularmente, de turistas que se dirigen a Puerto Peñasco, de forma que se reduzcan los tiempos de espera.

AGUA PRIETA

Inversión de 720 millones de pesos para la construcción de nuevos edificios en los dos puentes y se busca la creación de un nuevo cruce fronterizo exclusivamente para uso de carga pesada. Se pretende sea una aduana complementaria con la de Nogales para evitar saturaciones en épocas de mayor flujo donde los transportes de carga experimentan más de 48h de espera.

GUAYMAS

Se construirá el muelle número uno con una inversión de 500 millones de pesos y 6 millones de pesos para la modernización al alojamiento para el personal de la Secretaría de Marina. El proyecto de impacto recaudatorio en el puerto mediante corredor fiscal Guaymas- Nogales para que la mercancía recibida pueda entrar al país vecino sin revisiones subsecuentes.

NOGALES

Aduana de Nogales se invertirán 2 mil 252 millones de pesos, y el proyecto comprende la demolición de las instalaciones actuales, se dará un reordenamiento integral y mantenimiento a los tres puentes y se instalará más equipo.

NACO

Dada su vocación mixta, se invertirán 358 millones de pesos en la reconfiguración de todas las áreas. (Gobierno del Estado de Sonora, 2024g).

Las emisiones de GyCEI derivadas del tráfico vehicular son la principal fuente de emisión en las zonas fronterizas con E.E. U.U., el gran intercambio comercial, social y turístico que se tiene entre E.E.U.U. y México genera grandes flujos de movimiento y filas de vehículos con el motor encendido.

Los cruces fronterizos de vehículos entre México y Estados Unidos generan cantidades significativas de emisiones de GyCEI así como de contaminantes criterio y compuestos tóxicos que tienen efectos perjudiciales a la salud de las personas derivados por la continua exposición a estos contaminantes por parte de las personas que laboran en los puertos, por los conductores, peatones y personas que habitan en las áreas adyacentes.

De acuerdo con el Departamento de Estadística de Transporte de E.E. U.U. (BTS, por sus siglas en inglés) durante 2015 los 25 cruces fronterizos terrestres de México a Estados Unidos procesaron 74 millones de vehículos de uso personal, 200 mil autobuses y 41.2 millones de peatones.

Si bien estos puertos de entrada terrestres desempeñan un papel vital en la mejora de la relación económica entre los dos países, su tráfico puede presentar desafíos ambientales y de salud notables (Olvera et al., 2013).

Existen posibilidades de reducir las emisiones mediante una combinación de mejoras logísticas, cambios tecnológicos y la transición a combustibles más limpios.

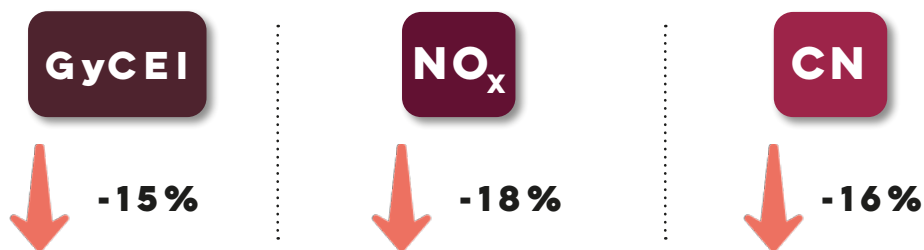
Generar la implementación de nueva infraestructura en los pasos fronterizos se puede evitar la emisión de importantes cantidades de GyCEI, a través de varias estrategias:

- 1.** Desarrollo de infraestructura que facilite la fluidez del tránsito vehicular.
- 2.** Mejora en la eficiencia de los controles de los pasos fronterizos para acelerar el paso de los vehículos.
- 3.** Programas de verificación del estado físico de la flota vehicular.
- 4.** Inversiones en sistemas de transporte público más eficientes.
- 5.** Inversión en mejores tecnologías vehiculares y aplicación de planes de manejo eficiente.

En un estudio realizado en 2016 se evaluó el potencial de mitigación del puerto fronterizo Mariposa en Nogales, Arizona (Reyna, 2016), se analizaron las emisiones de vehículos livianos y pesados con el objetivo de identificar estrategias efectivas de reducción de emisiones. Entre las medidas examinadas estaban la simplificación de las inspecciones, las mejoras en la infraestructura física y el cambio de combustible. Para este propósito, se utilizaron datos históricos del tráfico y observaciones de campo para desarrollar un modelo de simulación del movimiento vehicular.

Los resultados del estudio indicaron que medidas como el procesamiento acelerado y la reducción de las colas podrían disminuir las emisiones significativamente en escenarios de alta congestión: hasta un 16% en partículas PM2.5, 18% en óxidos de nitrógeno (NO_x), 20% en hidrocarburos no metánicos (NMHC), 7% en dióxido de azufre (SO₂) y 15% en GyCEI y monóxido de carbono (CO). Otras estrategias de mitigación consideradas incluyen la actualización de la flota vehicular, cambios en los tipos de combustible utilizados y mejoras en las tecnologías de combustión.

Figura 16. Potencial de mitigación identificado por mejoras en el puerto fronterizo de Mariposa en Nogales



Fuente: Elaboración INECC, 2024 con datos de (Reyna, 2016)¹²

La implementación de estas mejoras en la infraestructura de los pasos fronterizos no sólo reduciría las emisiones en los puntos de entrada, sino que también tendría beneficios en la calidad del aire para las poblaciones cercanas tanto en Estados Unidos como en México. Los cambios a nivel de flota podrían tener mejoras de gran alcance en la calidad del aire en ambos lados de la frontera.

¹² *Reyna, J., Vadlamani, S., Chester, M., & Lou, Y. (2016). Reducing emissions at land border crossings through queue reduction and expedited security processing. Transportation Research Part D: Transport and Environment.

TALENTO HUMANO

El Plan Sonora de Energías Sostenibles tiene como eje central el Talento Humano, identificando a los jóvenes como el pilar básico de la transformación hacia una sociedad con un desarrollo basado en las energías limpias. Este eje es transversal al resto del Plan ya que garantiza la expansión de los proyectos con la ventaja de contar con profesionistas preparados para acometerlos.

El principal objetivo del Talento Humano es garantizar que los ingenieros del país, y principalmente los del Estado de Sonora, tengan un gran incentivo para formar parte de las nuevas industrias, garantizándoles una participación en la economía, una preparación profesional de gran nivel y el acceso a trabajos dignos que le reporten bienestar. Las industrias que busca atraer el Plan Sonora son industrias de alto valor agregado, con gran derrame tecnológico que sobrepasan las limitantes de la industria maquiladora tradicional, proporcionando grandes beneficios ambientales, económicos, tecnológicos y sociales, así como empleos de mayor remuneración, prestaciones de seguridad, salud y protección en el trabajo, así como un gran nivel profesional.

En un Diagnóstico Estatal de Carreras afines al Plan Sonora en instituciones públicas de educación superior (Tabla 16) en las tres áreas profesionales principales (electromovilidad, electrónica-semiconductores y automatización), se identificó que como promedio anualmente, la oferta anual de ingenieros en Sonora es de aproximadamente 4200 titulados y 5100 egresados (Gobierno del Estado de Sonora, 2024).

Tabla 16. Diagnóstico de oferta educativa de estudiantes a fines a las áreas estratégicas del Pan Sonora

| AÑO | Matrícula | Nuevo Ingreso | Titulados | Egresados |
|------|-----------|---------------|-----------|-----------|
| 2022 | 33,931 | 9,157 | 4,458 | 5,101 |
| 2021 | 34,248 | 8,425 | 4,304 | 5,759 |
| 2020 | 36,957 | 9,510 | 3,458 | 4,737 |
| 2019 | 37,474 | 11,674 | 3,983 | 5,442 |
| 2018 | 33,516 | 9,528 | 4,229 | 5,118 |

Fuente: Gobierno del Estado de Sonora, 2024

De igual modo es una prioridad la incorporación de jóvenes en situación de vulnerabilidad, garantizando igualdad de oportunidades para discapacitados e indígenas, así como la igualdad de género y la participación de las mujeres en sectores de alta innovación y desempeño tecnológico. En el año 2022, se identificó que, del total de egresados del Estado de Sonora, el 1648 (32.31%) son mujeres. Del universo de estudiantes egresados en este año, se identificó además 76 estudiantes discapacitados y 13 hablantes de lenguas indígenas listos para acometer las funciones pertinentes al instalarse las nuevas industrias.

Figura 17. Egresados en 2022 de carreras afines al Plan Sonora



Fuente: Elaboración Gobierno del Estado de Sonora, 2024



Mediante un Ecosistema de Capacitación Técnica Especializada del Gobierno del Estado de Sonora, las instituciones públicas de Educación Superior y el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), se garantizará una preparación de máximo nivel a los jóvenes, orientada a especializaciones que aporten las habilidades, conocimientos y experiencias necesarias para asumir los retos que supone el incorporarse a industrias de gran complejidad. Esto se refuerza además con intercambios académicos en universidades y centros de alto prestigio de Arizona y Taiwán a través de convenios de colaboración y movilidad. Actualmente en el Estado, se encuentran 52 estudiantes matriculados en las nuevas Licenciaturas en Semiconductores y 4 en Especialidad, de los cuales 10 son mujeres.

Muchos de los estudiantes egresados se incorporarán a empleos verdes que responderán a las necesidades del ecosistema sostenible del Plan Sonora, garantizando la reducción del impacto ambiental, la conservación de recursos naturales y la promoción de prácticas más sostenibles en las industrias que se instalen. El manejo de residuos en las empresas, el cumplimiento de normas ambientales, las energías renovables, la eficiencia energética son algunas de las áreas que ofrecerán este tipo de empleos.

MINERALES ESTRATÉGICOS

El litio como actor clave en la electromovilidad

En México, como en el resto del mundo, la reducción del uso de combustibles fósiles no es sólo una aspiración sino una urgente necesidad, la quema de gasolina y diésel en vehículos de combustión interna es la segunda fuente de emisión más importante en México, superada sólo por la generación de energía eléctrica. La transición hacia un transporte más sustentable es una vía clara en la lucha contra el cambio climático.

El litio, al ser un metal muy ligero, pero con una alta densidad, permite almacenar de forma muy eficiente la energía, lo que lo convierte en un elemento privilegiado para la movilidad eléctrica al poder producir baterías más livianas y con menos afectaciones a la autonomía de los vehículos eléctricos.

A nivel internacional el aumento de la demanda de litio es innegable, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA) la demanda por la extracción del litio aumentará 42 veces para 2040, lo que evidencia la necesidad de anticipar futuras demandas y proteger tanto los recursos naturales como los mecanismos de desarrollo económico de nuestro país.

En México, al contar con un organismo público descentralizado de la Administración Pública Federal, dedicado a la exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento del litio, como LITIOMX tiene beneficios en el desarrollo económico de nuestro país que permite llevar a cabo la protección, aprovechamiento controlado y un manejo y distribución de este recurso, cuidando los intereses de todos los mexicanos.



Es importante mencionar que la extracción y aprovechamiento del litio debe ser de forma controlada y regulada, fomentando mejoras en la eficiencia de los procesos productivos con tecnologías de extracción alternativas que permitan tener mayor recuperación de agua, un correcto manejo de los residuos y un uso eficiente de la energía, así como un adecuado reciclaje y disposición final de las baterías al finalizar su vida útil.

Existe un potencial de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero por el uso de vehículos electrificados, principalmente sí se acompaña de fuentes de energía renovables y sí se enfoca al transporte público, además es un sector que conlleva un importante crecimiento en las capacidades técnicas y científicas del país y en la generación de empleos que contribuyan a la mitigación del cambio climático.

Indicadores previstos en los proyectos del Plan Sonora de Energías Sostenibles

Los indicadores ambientales y sociales son medidas o variables que proporcionan información sobre el estado, la calidad del medio ambiente y su influencia en la sociedad. Estos indicadores son herramientas clave para evaluar la salud y la sostenibilidad de los ecosistemas, así como para monitorear el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente. Se contemplaron los siguientes indicadores ambientales y sociales:

Calidad del aire: Son los niveles relacionados con las concentraciones de los contaminantes criterio, que son regulados por las normas oficiales mexicanas para los siguientes contaminantes atmosféricos: dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NOx), partículas suspendidas, ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), entre otros.

Cambio climático: Este indicador muestra las aportaciones sobre las principales fuentes de emisión de los gases y compuestos de efecto invernadero como son; dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos nitrosos (N₂O) y carbono negro (CN).

Generación de residuos sólidos: Son los materiales que tras su vida útil son desechados y tienen pérdida de su valor económico, así como la gestión y manejo adecuado de los mismos.

Consumo de recursos naturales: Extracción y consumo de recursos naturales como agua, suelo, minerales y combustibles fósiles.

Equidad: Este indicador social refleja las condiciones de desarrollo y el progreso y nos permitirá identificar las desigualdades de pobreza con respecto al promedio nacional.

Género: Indicador social que permitirá identificar los cambios en el rol de las mujeres, hombres y medir la igualdad de oportunidades a través de acciones planificadas.

Salud: Identificará los beneficios máximos a la salud de la población dentro de las acciones y estrategias realizadas que reduzcan los riesgos y exposiciones potenciales a la salud humana.



INDICADORES DEL PLAN SONORA

Tabla 17. Indicadores Ambientales y Sociales del Plan Sonora

| AMBIENTALES | | | | | SOCIALES | | |
|--|--|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|--|---|
| Sector | Calidad del aire | Cambio Climático | Generación de Residuos sólidos | Consumo de recursos naturales | Equidad | Género | Salud |
| ENERGÍA | | | | | | | |
| Puerto Peñasco | No se generan contaminantes Criterio | No se generan GyCEI | No | No | Incremento al acceso de energía limpia en comunidades vulnerables | Disminuye exposición a contaminantes (PST y gases) de mujeres, niños, niñas y adultos mayores intramuros | Si, se reduce la exposición a contaminantes |
| Energía Social distribuida | No | No | No | No | Incremento al acceso de energía limpia en comunidades rurales | Disminuye exposición a contaminantes (PST y gases) de mujeres, niños, niñas y adultos mayores intramuros | Si, se reduce la exposición a contaminantes |
| Generación solar en edificios públicos | No | No | No | No | Incremento al acceso de energía limpia | Mayor cantidad de población con acceso a energía limpia | Si, se reduce la exposición a contaminantes |
| INFRAESTRUCTURA | | | | | | | |
| Guaymas | Reducción de emisiones de Contaminantes Criterio | Reducción de emisiones de GyCEI | No | No | Mayor acceso a empleos mejor remunerados | Mayor participación de las mujeres en la actividad económica | Reducción de riesgos laborales por actividades formales |
| Trenes | Reducción de emisiones de Contaminantes Criterio | Reducción de emisiones de GyCEI | No | No | Generación de empleos | Mayor participación de las mujeres en la actividad económica | Reducción de exposición a Contaminantes Criterio |
| Carreteras | Reducción de emisiones de Contaminantes Criterio | Reducción de emisiones de GyCEI | No | No | Generación de empleos | Mayor participación de las mujeres en la actividad económica | Reducción de exposición a emisiones de GyCEI y Contaminantes Criterio |
| Puertos fronterizos | Reducción de emisiones de Contaminantes Criterio | Reducción de emisiones de GyCEI | No | No | Generación de empleos | Mayor participación de las mujeres en la actividad económica | Reducción de riesgos laborales por actividades formales |
| Parque científico | Reducción de emisiones de Contaminantes Criterio | Reducción de emisiones de GyCEI | No | No | Generación de empleos | Mayor participación de las mujeres en la actividad económica | Reducción de riesgos laborales por actividades formales |

Nota: Todo el material para el caso de la energía eléctrica deberá ser reintegrado al proceso mediante estrategias de economía circular. Realizar el Plan de manejo de riesgos laborales por actividad extractiva.

Fuente: Elaboración INECC

Relación del Plan Sonora con los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS)

El Plan coadyuva al cumplimiento de los ODS 4, 6, 7, 9, 11, 13 y 17 como se presenta a continuación:

Figura 18. Ecosistema del Plan Sonora y ODS



Fuente: Gobierno del Estado de Sonora

De manera transversal el Plan y sus proyectos están encauzados al resto de los objetivos, dado que cada una de sus estrategias busca favorecer a la población más vulnerable (ODS 1), contribuir a la sustentabilidad en todas las actividades económicas incluida la agricultura (ODS 2), mejorar la calidad de vida y salud de los ciudadanos para que se desarrollen en un medio ambiente libre de contaminantes (ODS 3), la igualdad de derechos y oportunidades (ODS 5), el crecimiento económico basado en industrias de alto valor agregado y empleos dignos (ODS 8), disminuir la brecha de desigualdades e incrementar la seguridad (ODS 10), producción y procesos industriales responsables y sostenibles (ODS 12), el respeto a los ecosistemas marítimo (ODS 14) y terrestre (ODS15); todo bajo una gobernanza institucionalmente responsable, comprometida y transparente (ODS 16). En total sus proyectos contribuyen en 49 indicadores y 35 metas.

A continuación, se desglosa la contribución a los ODS por cada uno de los proyectos del Plan Sonora:

Figura 19. Relación de los pilares del Plan Sonora con los ODS

| | 1 DE LA POBREZA | 2 HAMBRE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA | 3 SALUD Y BIENESTAR | 4 ENERGÍA Y ENERGÍA AFECTIVA | 5 EQUIDAD DE GÉNERO | 6 AGUA LIMPA Y SANEAMIENTO | 7 ENERGÍA LIMPIA Y ACCESIBLE | 8 INDUSTRIAS PRODUCTIVAS Y EMPLEOS DIGNOS | 9 INDUSTRIA INNOVATIVA Y ESTRUCTURAS PRODUCTIVAS | 10 REDUCCIÓN DE LAS DESIGUALDADES | 11 INDUSTRIAS SOSTENIBLES Y ESTRUCTURAS PRODUCTIVAS | 12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES | 13 ACCIÓN POR EL CLIMA | 14 VIDA SUBMARINA | 15 VIDA TERRESTRE | 16 PAZ, JUSTICIA E INSTITUCIONES SÓLIDAS | 17 ALIANZAS PARA LOS OBJETIVOS |
|--|--------------------|---|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---|--|---|---|---|------------------------------|-------------------------|-------------------------|---|---|
| Planta Fotovoltaica de Puerto Peñasco | | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | |
| Sistema de Generación Social Distribuida | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | |
| Generación Solar en edificios públicos | | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | | | | |
| Modernización del Puerto de Guaymas | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | | | | | | | ✓ | |
| Movilidad Vías del tren de Nogales | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | | | |
| Ampliación de Carreteras | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | |
| Modernización de puertos fronterizos | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | |
| Ampliación de Aeropuertos | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | | |
| Parque Industrial y Científico | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | |

Fuente: Elaboración INECC

.....

HIDRÓGENO VERDE EN SONORA



La Asociación Mexicana de Hidrógeno (AMH)¹³, realiza trabajos para promover proyectos basados en hidrógeno verde, así mismo la Sociedad Mexicana del Hidrogeno (SMH)¹⁴ reúne a la comunidad científica nacional con el propósito de realizar investigación y desarrollo. Ambas agrupaciones se enfocan en sus respectivos ámbitos al impulso de tecnologías basadas en el hidrógeno verde para su uso en la generación de electricidad basada en una mezcla de gas natural e hidrógeno, la síntesis de productos en la industria química, la producción de hierro/acero, la producción de amoníaco y metanol o su uso la producción de vidrio flotado, entre otras iniciativas.

El documento *“Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación”*¹⁵ (GIZ, 2021) reporta que una de las ventajas del hidrógeno como vector energético es transformar la energía eléctrica (renovable) en energía química. Como el hidrógeno tiene una alta densidad de energía por unidad de masa, se puede utilizar como una fuente de calor para aplicaciones industriales. La combustión de hidrógeno puede alcanzar temperaturas superiores a 1000°C, por lo que, dependiendo de la configuración, el H₂ se puede utilizar para producir altas (>400 °C), medias (150-400 °C) y bajas temperaturas.

Este reporte también informa que, desde la década de 1990, las empresas productoras de hidrógeno residual han utilizado este elemento para generar electricidad a través de turbinas. La empresa obtiene hidrógeno como subproducto de la producción de cloro y quema H₂ mezclado con diésel en sus calderas. El documento concluye que el hidrógeno no es una fuente de energía; es un integrador de sectores y un búfer de intermitencia de energía renovable que proporciona energía confiable para procesos críticos y continuos.

En este contexto la medida de repotenciación a gas natural¹⁶ asociada con la capacidad para incorporar hidrógeno técnicamente permitirá aprovechar la infraestructura que inicialmente solo está asociada a los combustibles fósiles, para incorporar un energético renovable, hidrógeno verde, y lograr reducir el porcentaje de combustibles fósiles y gas natural en la matriz energética. Esta medida no obstaculiza la transición hacia actividades alineadas con el Acuerdo de París.

HUB DE HIDRÓGENO VERDE EN SONORA

El hidrógeno (H₂) es el más ligero de todos los elementos. El H₂ tiene una densidad energética extremadamente alta: un kilogramo de hidrógeno contiene aproximadamente tres veces más energía que un kilogramo de petróleo. El hidrógeno se encuentra exclusivamente en formas químicamente ligadas, por ejemplo, como agua (H₂O), o en compuestos orgánicos como por ejemplo en los hidrocarburos (petróleo, gas natural, carbón, biomasa, etc.).

Proceso de Producción

El hidrógeno verde se produce a través de la electrólisis del agua y a partir de energías renovables, la electrólisis tiene como insumos principales agua y electricidad.

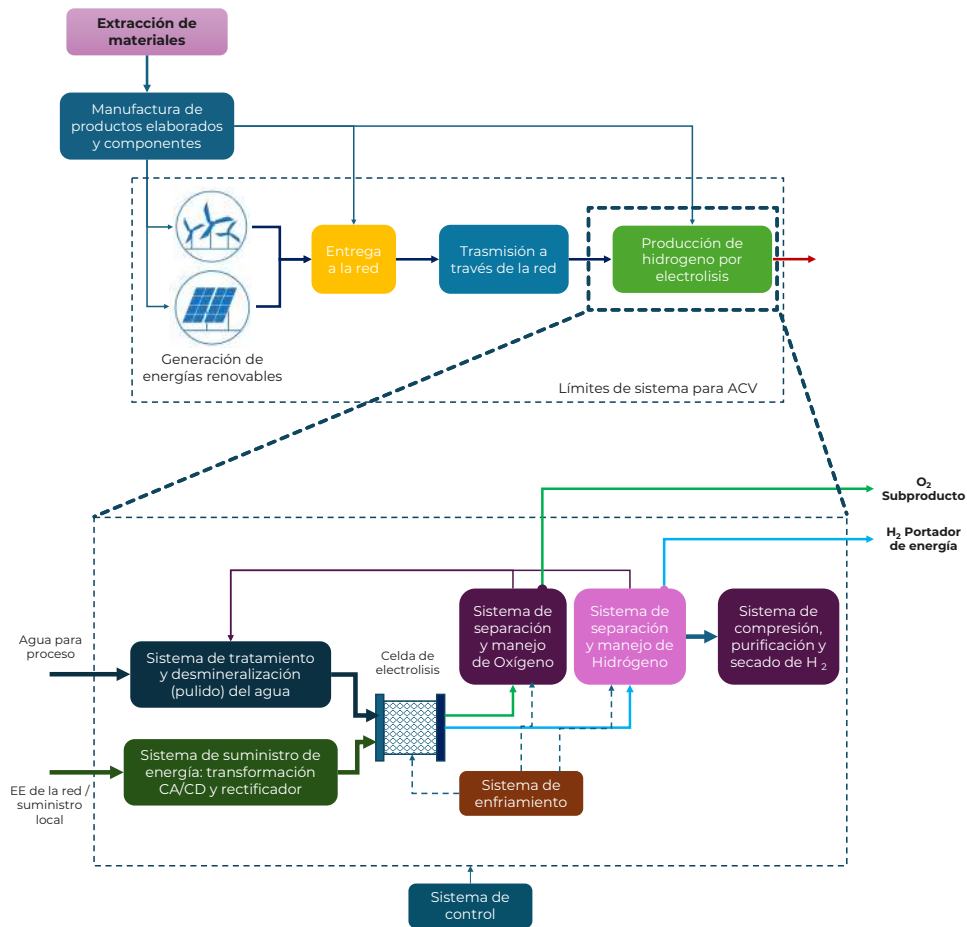
¹³ Ver: <https://h2mex.org/>

¹⁴ Ver: <https://hidrogeno.org.mx/>

¹⁵ Ver: https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user_upload/mexico/media_elements/reports/Hidro%CC%81geno_AE_Tomo_1.pdf

¹⁶ En el capítulo IV del PRODESEN 2023-2037 se indica esta medida de repotenciación de los ciclos combinados podría alcanzar una participación de 4.08% a 2037. Ver: <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037>

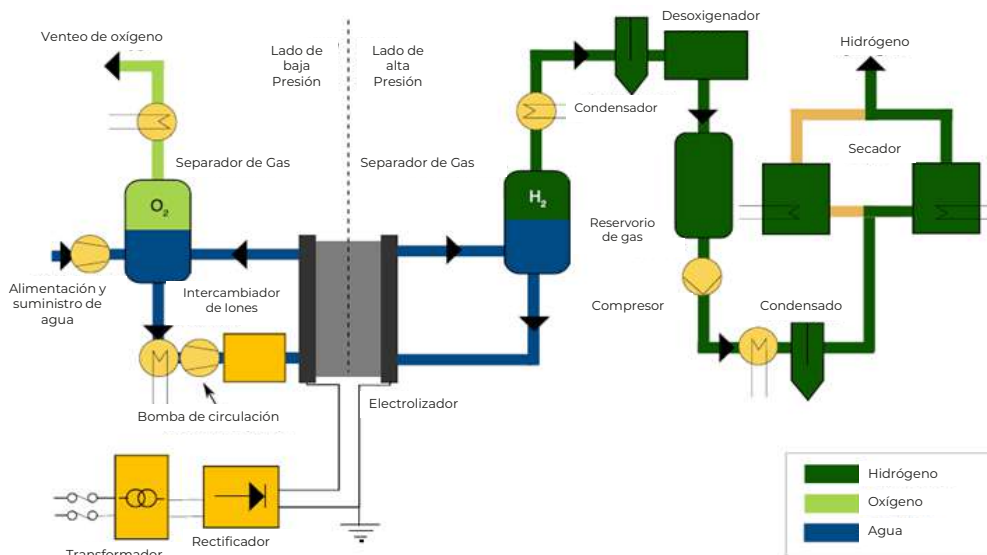
Figura 20. Producción de hidrógeno a partir de energías renovables



Fuente: Elaboración INECC con base en (FCH JU, 2016)

En la producción de hidrógeno verde se utilizan electrolizadores que pueden ser principalmente de dos tipos: electrolizadores alcalinos (Alk) o Electrolizador con membranas electrolíticas poliméricas (PEM).

Figura 21. Diagrama de flujo producción de H₂ con electrolizadores PEM

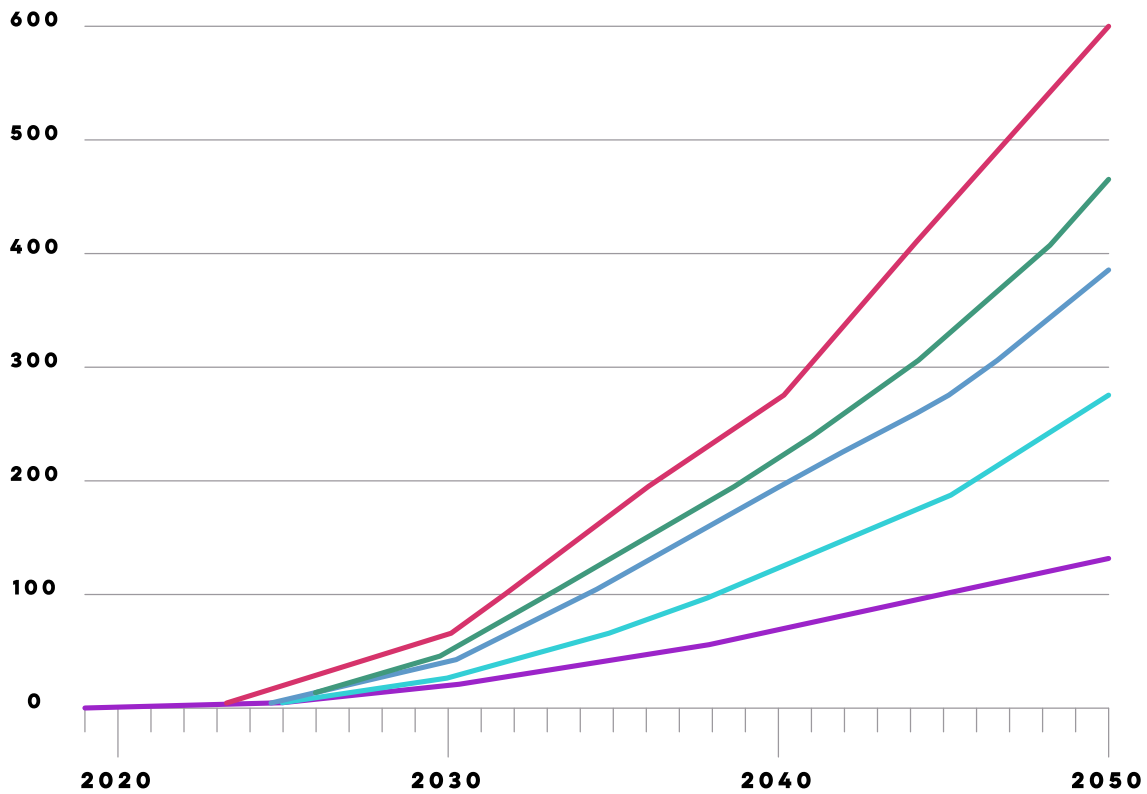


Fuente: Traducido de (IRENA, 2020)

Demanda mundial y demanda en México

De acuerdo con el estudio “Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación” (GIZ, 2021) y otros estudios y publicaciones como el “Global Energy Perspective 2023: Hydrogen Outlook”¹⁷ (McKinsey & Company, 2024) la demanda de hidrogeno en el mundo aumentara significativamente en los próximos años.

Figura 22. Demanda global de Hidrógeno-verde (millones de toneladas)



Fuente: (McKinsey& Co, 2023)¹⁸

De acuerdo con el mapa de ruta de hidrógeno verde publicado por la Asociación Mexicana de Hidrógeno en el documento “Hidrógeno Verde: El vector energético para descarbonizar la economía de México”¹⁹ (AMH, 2022) la demanda de hidrógeno verde en el país puede alcanzar los 228 miles de toneladas en 2030, alcanzaría los 1,219 miles de toneladas para 2040 y para 2050 la demanda podría alcanzar los 2,673 miles de toneladas, esto considerando la demanda de los sectores:

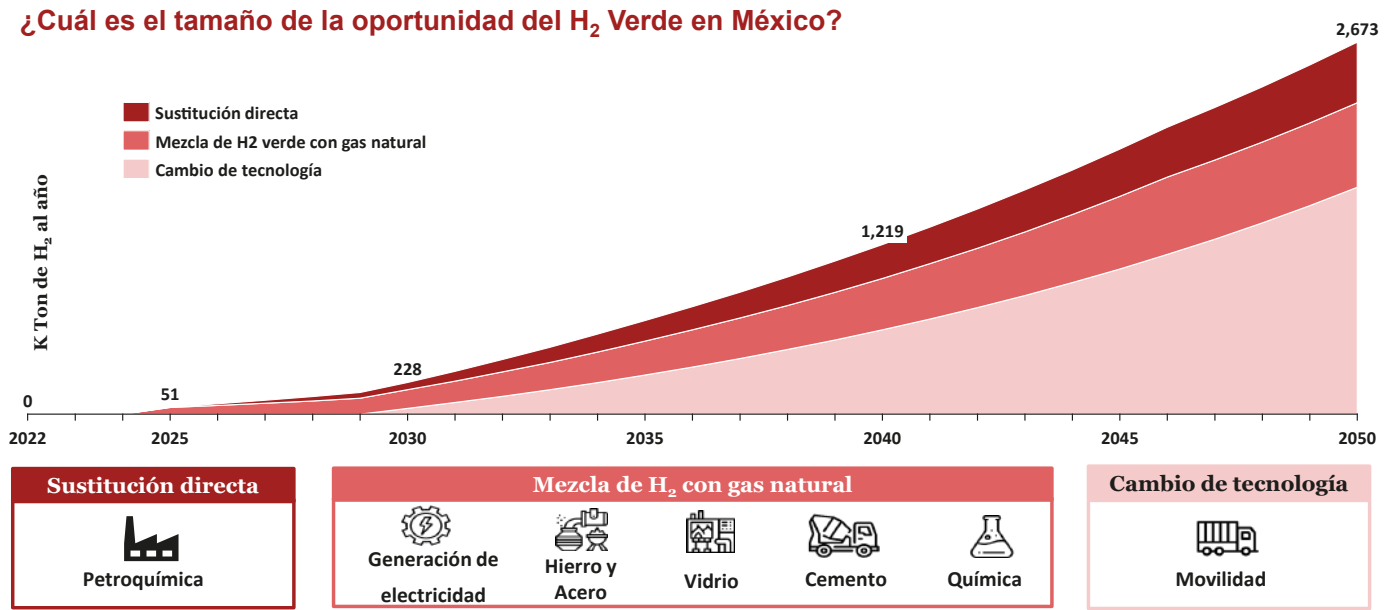
- Petroquímica,
- Generación de electricidad,
- Transporte, y
- Sector industrial las ramas de hierro y acero, vidrio, cemento y química.

¹⁷ Ver: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook#/>

¹⁸ Ver: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook#/>

¹⁹ Ver: https://h2mex.org/wp-content/uploads/HidrogenoVerde_Estudio_H2mex.pdf

Figura 23. Demanda de H₂ verde en México 2020-2050 en (kton)



Fuentes: Anuarios estadísticos de Pemex 2016-2020, INDC de México 2015, INEGYCEI 2013-2019, El Economista, Argonne National Laboratory, PRODESEN 2021-2035, CFE, Statista, Knoema, PIIRCE 2018-2032, SENER, CEMEX, INECC, Naturgy, Statista, Análisis Interno.

Fuente: (AMH, 2022)

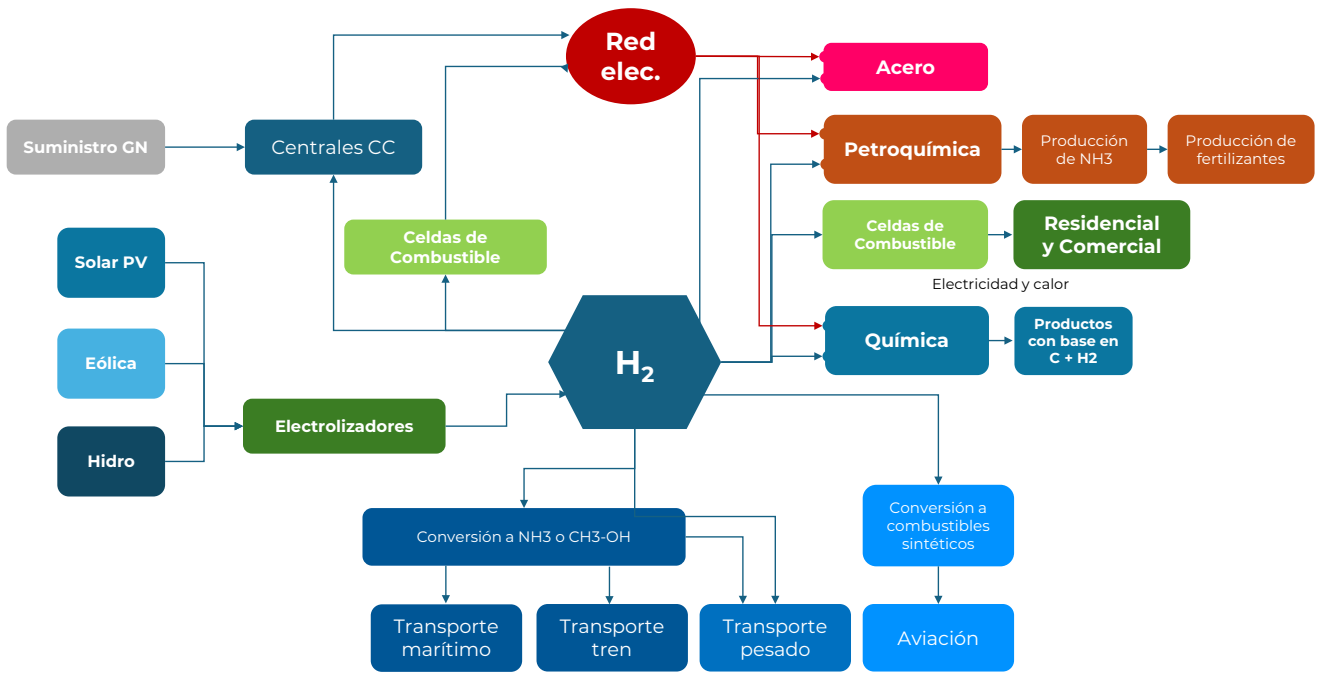
Usos futuros del hidrógeno verde

Una de las ventajas del hidrógeno como vector energético es transformar la energía eléctrica (renovable) en energía química. Los usos del hidrógeno incluye no solo su uso como combustible en la generación de energía en centrales de ciclo combinado sustituyendo gas natural sino tiene otras aplicaciones que se enmarcan bajo el concepto de “Power to X” como, por ejemplo:

- Uso como combustible para vehículos de carga pesada,
- Como insumo para la producción de:
 - productos químicos verdes,
 - amoníaco cuyas aplicaciones van desde la producción de urea (fertilizantes) hasta su uso como combustible en el Transporte marítimo,
 - metanol y etanol renovables, o
 - combustibles sintéticos para la aviación.



Figura 24. Usos finales probables del H₂-verde

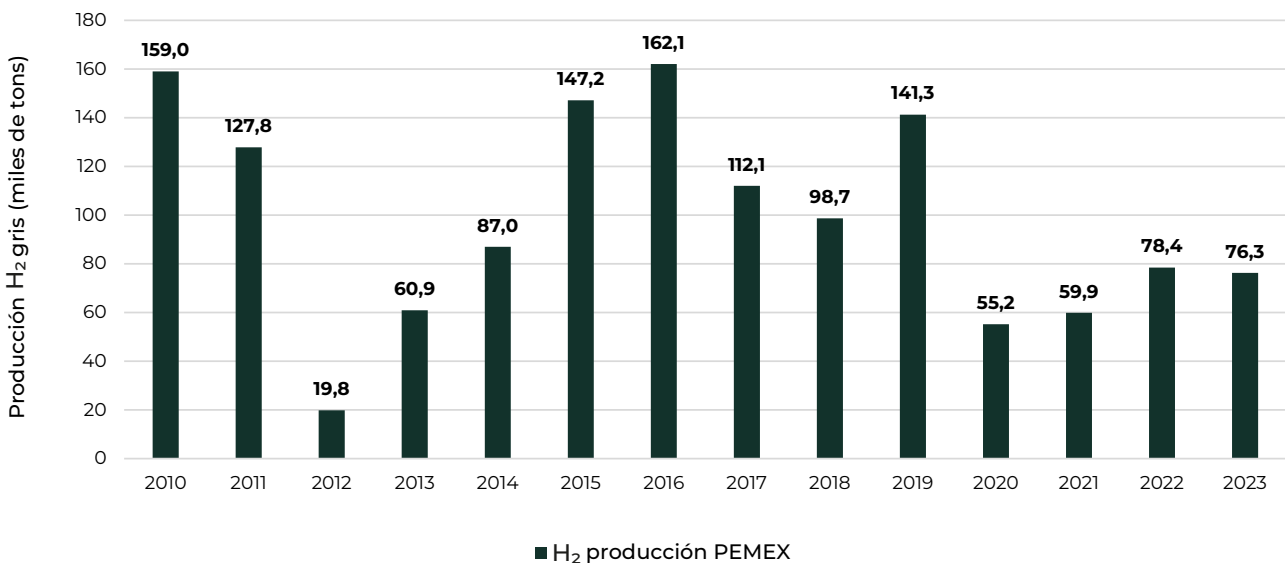


Fuente: Elaboración INECC con base (Siemens, 2022)

Producción de hidrógeno gris en México

De acuerdo con el estudio de la GIZ antes mencionado en México (GIZ, 2021), el mercado de hidrógeno existente está consumiendo más de 220.000 toneladas/año en 2020, de los cuales 98.6% proviene de PEMEX. Los datos de la producción de hidrógeno de PEMEX hasta 2021 de 2010 hasta 2023 se muestran a continuación.

Figura 25. Producción de H₂ gris de PEMEX 2020-2023



Fuente: Elaboración INECC con datos de PEMEX (PEMEX BDI, 2024)

En el caso de Sonora, la generación de electricidad a partir de energías renovables a través de centrales solares fotovoltaicas en el estado, así como su ubicación representan características que lo hacen especialmente favorable para la implementación de un “Hub” de producción de hidrógeno verde, esto por los siguientes motivos:

- Alta disponibilidad de radiación solar, con altos factores de planta.
- Disponibilidad de puerto para su almacenamiento y comercio (exportación tanto a los EU, como Asia) y su utilización en la industria local.
- La demanda de fertilizantes en el estado es alta, por lo que se tendría un mercado interno para su consumo.
- La demanda de agua potable para actividades económicas y la población es también alta, el agua potable puede ser un subproducto para consumo humano que se deriva de la desalinización de agua de mar con energías limpias que se requiere para la producción de hidrógeno verde.
- Cercanía con los Estados Unidos en particular California como un mercado que demandará este insumo de forma creciente en el futuro para la movilidad y otros usos.

De acuerdo con diversos estudios como, por ejemplo “Seaports as green hydrogen hubs: advances, opportunities and challenges in Europe”²⁰ “Un buen número de puertos marítimos desempeñan un papel esencial como centros de importación o exportación de energía, manejando grandes flujos de combustibles fósiles como carbón, petróleo crudo y gas natural. El gas llega, ya sea a través de buques (transportadores de GNL), utilizando terminales especializadas en aguas profundas, o a través de gasoductos, que terminan en la zona portuaria. Los puertos marítimos suelen albergar grandes plantas de energía. La disponibilidad de tierra y agua de refrigeración, y la presencia de grandes clientes industriales, son algunas de las razones para que las empresas productoras de energía establezcan negocios en zonas portuarias”.

Figura 26. Ejemplo de un Hub de hidrógeno en el caso del Puerto de Hamburgo en Alemania



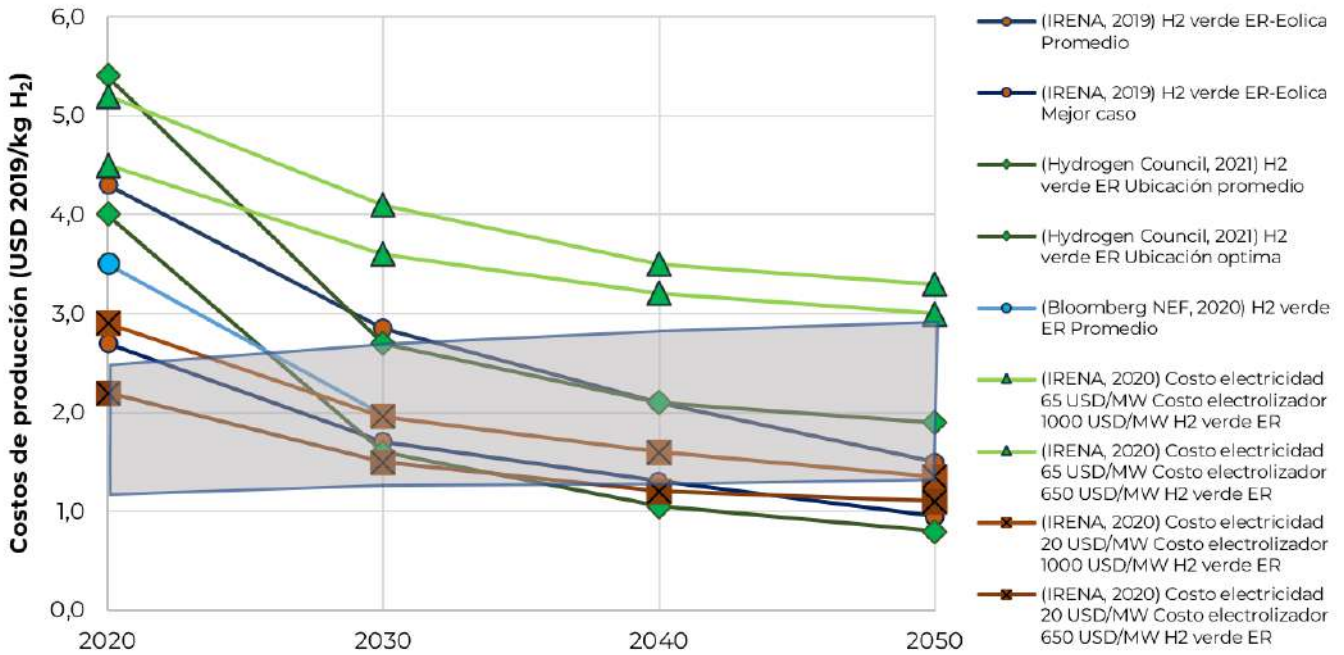
Fuente: <https://www.hghh.eu/en>

²⁰ <https://link.springer.com/article/10.1057/s41278-023-00253-1>

Costos de producción

En la siguiente Figura se muestran las proyecciones de los costos de producción de hidrógeno en USD 2019/kg de hidrógeno o en USD2019/MW de distintas organizaciones y considerando distintos aspectos como lo son el costo de la energía, el costo de los electrolizadores o la ubicación (p. e. Bloomberg, IRENA, EU, Hydrogen Council).

Figura 27. Costos de producción de Hidrógeno en USD 2019/kg



Nota: el área gris refleja la banda de costos proyectados del hidrógeno gris de IRENA y el Hydrogen Council

Fuente: Elaboración INECC con datos de (IRENA, 2019), (IRENA, 2020), (Hydrogen Council, 2021), (Bloomberg NEF, 2020)

De acuerdo con el estudio de GIZ (GIZ, 2021) indica que “la región de América Latina tendrá un promedio de 2-2.5 USD/kg, donde el potencial de hidrógeno verde más alto está en Chile, con una previsión de precio por debajo de 1.6 USD/kg, seguido de Brasil, Perú, Argentina y México en el rango de 1.6 – 2 USD/kg. Algunas regiones específicas de países como México podrían lograr costos de hidrógeno tan bajos como 1.2 USD/kg.

BENEFICIOS PARA EL ESTADO DE SONORA DEL HIDRÓGENO VERDE

- Algunos de los beneficios de la posible implementación de un “Hub” de hidrógeno verde en el estado se muestran a continuación
- Incremento del desarrollo industrial del estado y en particular del puerto de Guaymas,
- Aumento del suministro de agua a través de centrales desalinizadoras al diversificar una parte de su producción para consumo humano y otra para la producción de hidrógeno,
- Aumento de las exportaciones de energía del estado,
- Utilización eficiente de la energía vertida asociada con la generación fotovoltaica, es decir en vez de desperdiciar la energía cuando hay un exceso al medio día (causa de congestión en las líneas de transmisión), se utiliza esta energía para la producción de hidrógeno (almacenándola en forma de combustible/ insumo industrial con valor agregado),

- Impulso al desarrollo industrial del puerto de Guaymas alrededor de la producción de hidrógeno, urea (fertilizantes), metanol, etanol y combustibles sintéticos que pueden sustituir miles de toneladas de fertilizantes y otros productos que actualmente se importan a través del puerto, con lo que se reduciría, por ejemplo, el costo de suministro de fertilizantes a las actividades agrícolas del estado.
- Incremento a las actividades comerciales portuarias, así como la oferta de empleo especializado.
- Posiblemente el costo de producción de H₂ en Sonora sea bajo con lo que se tendría una ventaja competitiva frente a otras fuentes de suministro, así mismo por su ubicación se tendría una ventaja adicional respecto a los costos de transporte con puertos de Chile o Brasil.

Créditos de carbono

Un crédito de carbono representa una tonelada de CO₂ equivalente reducido o eliminado, aunque no siempre es así debido a imperfecciones en la acreditación de metodologías o su implementación, o a una falta de adicionalidad.

Créditos de carbono

Puede ser generado por proyectos que hacen una de dos cosas:

1. Reducir las emisiones de GyCEI frente al escenario más probable, que pronostica las emisiones en ausencia del proyecto de mitigación.
2. Eliminar de la atmósfera el CO₂ previamente emitido. Proyectos de eliminación como soluciones o tecnologías basadas en la naturaleza (por ejemplo, forestación o reforestación).

En ambos casos, los desarrolladores de proyectos suelen utilizar los ingresos de la venta de carbono para financiar parcialmente la operación de sus proyectos, y deberán justificar – antes de que se emitan los créditos de carbono – que estos ingresos son esenciales para el proyecto para llegar a buen término.

Para recibir créditos de carbono, como procedimiento estándar, los desarrolladores de proyectos deben registrar sus proyectos de reducción o eliminación en un programa de créditos de carbono, como Gold Standard o Verra, en el mercado voluntario de carbono (VCM), mientras un organismo gubernamental centralizado define las directrices y normas y supervisa su aplicación y cumplimiento.

Los desarrolladores acceden a varios tipos de metodologías de acreditación que permiten al proyecto. Los desarrolladores estiman cuántos créditos de carbono podrían emitir a partir de un determinado proyecto. Estas metodologías, y sus parámetros, varían entre diferentes programas, siendo algunos más estrictos que otros. Elegir un programa sobre otro puede afectar la cantidad de créditos de carbono emitidos para el mismo proyecto.

Como procedimiento estándar, los auditores externos independientes deben verificar que el/los desarrolladores del proyecto han aplicado correctamente la metodología del programa elegida, que también incluye la obligación de monitorear y reportar las emisiones del proyecto. Solo una vez que se completa el proceso de verificación, ¿puede el programa permitir la emisión de créditos de carbono, generalmente a cambio de una tarifa²¹.

²¹ Fuente: IEA, 2024. The Role of Carbon Credits in Scaling Up Innovative Clean Energy Technologies. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-carbon-credits-in-scaling-up-innovative-clean-energy-technologies>

Beneficios socio-ambientales del proyecto Plan Sonora de Energías Sostenibles

La energía renovable ha surgido como un sistema de múltiples beneficios, aporta beneficios ambientales como la mitigación del cambio climático con oportunidades económicas como la creación de valor local basada en el desarrollo, la producción, la instalación y el mantenimiento de tecnología, y aportaciones sociales en el aumento del acceso a la energía de manera oportuna y la reducción de los conflictos por los recursos naturales²².

Ventajas sociales:

1. La posibilidad de llevar energía eléctrica a comunidades remotas.
2. Promoción del desarrollo económico del territorio.
3. Proveer energía eléctrica en comunidades aisladas, debido a la colocación de paneles solares en una amplia diversidad de ubicaciones²³.
4. Fortalecer la autosuficiencia energética, promoviendo la estabilidad del suministro de energía a las comunidades aledañas al proyecto.
5. Reducción de las tarifas en los servicios de luz, agua y gas.
6. Generación de empleos directos (trabajadores de la construcción, desarrolladores, fabricantes de equipo, diseñadores, instaladores, recicladores de baterías de litio²⁴).
7. La reducción del costo de los servicios municipales de energía eléctrica (alumbrado público, bombeo de agua y edificios públicos).



Ventajas ambientales:

1. La principal ventaja de la energía fotovoltaica es la prácticamente nula emisión de gases y compuestos de efecto invernadero y otros contaminantes que contribuyen al cambio climático.
2. Ayudan a disminuir enfermedades relacionadas con la contaminación.
3. No necesitan grandes cantidades de agua para su funcionamiento.
4. Reducen la necesidad de industrias extractivas en la medida que se evita el uso de combustibles fósiles.
5. Los paneles solares pueden ser reciclados o reutilizados en su la mayoría de sus componentes²⁵.
6. Favorecer la economía circular al priorizar el reciclaje de baterías de iones litio para crear una cadena de suministro que valore las prácticas éticas y promover la transparencia en cada etapa.
7. Se maximiza el impacto positivo de la energía renovable al extender la vida útil de las baterías más allá de su uso inicial en vehículos eléctricos o productos electrónicos²⁶.
8. Reduce la dependencia a las importaciones de materia prima para la elaboración de baterías de litio.

²² <https://www.rifs-potsdam.de/en/blog/2016/10/social-benefits-renewable-energies1703>

²³ <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2682>

²⁴ <https://lohumi.com/media/blog/environmental-and-social-benefits-of-lithium-battery-recycling/>

²⁵ <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/beneficios-de-usar-energias-renovables-172766>

²⁶ <https://lohumi.com/media/blog/environmental-and-social-benefits-of-lithium-battery-recycling/>

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

| | |
|-----------------------|---|
| AFOLU | Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, por sus siglas en inglés. |
| CFE | Comisión Federal de Electricidad |
| CEDES | Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora |
| COP 28 | Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre El Cambio Climático |
| CMNUCC | Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático |
| CGMCC | Coordinación General de Mitigación del Cambio Climático |
| CO₂ | Dióxido de Carbono |
| CODESO | Consejo para el Desarrollo Sostenible |
| CH₄ | Metano |
| EE | Eficiencia Energética |
| EPIC | Ecoparque Industrial y Científico |
| ER | Energías Renovables |
| FE | Factor de Emisión |
| HFCS | Hidrofluorocarbonos |
| ICM | Iniciativa Climática de México |
| INECC | Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático |
| INEGyCEI | Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero |
| IPPU | Procesos Industriales y Uso de Productos, por sus siglas en inglés |
| IRENA | International Renewable Energy Agency |
| GyCEI | Gases y compuestos de efecto invernadero |
| NDC | Contribución Determinada a nivel Nacional, por sus siglas en inglés |
| N₂O | Óxido nitroso |
| NF₃ | Trifluoruro de nitrógeno |
| LGCC | Ley General de Cambio Climático |
| LNG | Natural Gas Licuado, por sus siglas en inglés |
| MW | Megawatts |
| ODS | Objetivos de Desarrollo Sustentable |
| PECCS | Programa Estatal de Cambio Climático de Sonora 2022-2026 |
| PFCs | Perfluorocarbonos |
| SF₆ | Hexafloruro de azufre |

REFERENCIAS

- Asociación Mexicana de Energía Solar. (2023). Sonora número uno en generación de energía fotovoltaica en México. Recuperado el 13 de febrero de 2024, de <https://www.sonora.gob.mx/gobierno/acciones/gobernador/sonora-numero-uno-en-generacion-de-energia-fotovoltaica-en-mexico>
- AMH. (2022). Hidrógeno Verde: El vector energético para descarbonizar la economía de México. Asociación Mexicana de Hidrogeno. Recuperado el 6 de mayo de 2024, de https://h2mex.org/wp-content/uploads/HidrogenoVerde_Estudio_H2mex.pdf
- Bloomberg. (2023). Gobierno de AMLO decretará incentivos fiscales para el Plan Sonora. Bloomberg en línea de 12 de julio de 2023. Recuperado el 31 de enero de 2024, de <https://www.bloomberglia.com/latinoamerica/mexico/gobierno-de-amlo-decretara-incentivos-fiscales-para-el-plan-sonora/>
- CFE. (2022). Proyecto Central Fotovoltaica Puerto Peñasco. Presentación del proyecto "CFE Generación III, Ing. Especializada", Documento compartido por el Gobierno del Estado de Sonora.
- CFE. (2023). Visitan Representantes de 80 Naciones y de 25 Organismos Internacionales la Central Fotovoltaica Puerto Peñasco. Comisión Federal de Electricidad, Boletín 2 de febrero de 2023. Recuperado el 31 de enero de 2023, de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=3781>
- CFE. (2023b). Más Energía limpia de CFE para México; Entra en operación la primera etapa de la central fotovoltaica Puerto Peñasco. Comisión Federal de Electricidad, Boletín de prensa 17 de febrero de 2023. Recuperado el 31 de enero de 2024, de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=3788>
- Eco-Parque Industrial y Científico Hermosillo (EPIC). Plan General de Proyecto (PGP). (s.f.).
- GIZ. (2021). Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación. Tomo I. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Recuperado el 6 de mayo de 2024, de https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user_upload/mexico/media_elements/reports/Hidro%CC%81geno_AE_Tomo_I.pdf
- Gobierno de Sonora. (2023). Plan Sonora de Energías Sostenibles. Portal del Gobierno de Sonora. Recuperado el 31 de enero de 2024, de <https://plan.sonora.gob.mx/energia-fotovoltaica>
- Gobierno de Sonora. (2023b). Informe Anual de Resultados Dirección General de Energía, Secretaría de Economía. Gobierno del Estado de Sonora. Documento proporcionado por CODESO.
- Gobierno de Sonora. (2023c). Eco-Parque Industrial y Científico Hermosillo (EPIC), Plan general de proyecto. Documento Suministrado por CODESO del Gobierno del Estado de Sonora.
- Gobierno de Sonora. (2024). Programa Social de Generación Distribuida. Presentación proporcionado por CODESO del gobierno del Estado de Sonora.

- Gobierno de Sonora. (2024b). Planta de Licuefacción de Gas Natural en Guyamas, Sonora. Documento suministrado por CODESO del Gobierno del Estado de Sonora.
- Gobierno de Sonora. (2024c). Modernización del Puerto de Guaymas . Documento Suministrado por CODESO del Gobierno del Estado de Sonora.
- Gobierno de Sonora. (2024d). Carretera Guaymas-Chihuahua. Documento suministrado por CODESO del Gobierno del Estado de Sonora.
- Gobierno de Sonora. (2024e). Modernización de la carretera Agua Prieta-Bavizpe. Documento Suministrado por CODESO del Gobierno del Estado de Sonora.
- Gobierno de Sonora. (2024f). Movilización de vías del tren de Nogales. Documento Suministrado por CODESO del Gobierno del Estado de Sonora.
- Gobierno de Sonora. (2024g). Ampliación y modernización de aduanas terrestres:. Documento Suministrado por CODESO del Gobierno del Estado de Sonora.
- Gobierno de Sonora. (2024h). Ampliación pista Aeropuerto Obregón. Documento Suministrado por CODESO del Gobierno del Estado de Sonora.
- INECC. (2023). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, (INEGyCEI) 2020-2021 y 1990-2019. Recuperado el 10 de octubre de 2023, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/853373/10-2023_INEGyCEI_2020_2021.xlsx
- INECC. (2023). Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Inventarios de 2014 a 2022. Recuperado el 31 de enero de 2024, de <https://www.gob.mx/inecc/documentos/investigaciones-2018-2013-en-materia-de-mitigacion-del-cambio-climatico>
- McKinsey & Company. (2024). Global Energy Perspective 2023: Hydrogen outlook. McKinsey & Company. collaborative effort by Chiara Gulli, Bernd Heid, Jesse Noffsinger, Maurits Waardenburg, and Markus Wilthaner, representing views from McKinsey Energy Solutions. Recuperado el 6 de mayo de 2024, de <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook#/>
- PEMEX BDI. (2024). Consulta a la base de Datos Institucional. Pemex. Recuperado el 6 de mayo de 2024, de <https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=temas>
- Presidencia de la República. (2022). México y Estados Unidos firmarían plan bilateral sobre energía, informa presidente López Obrador. Presidencia de la República, Boletín de prensa de 29 de octubre de 2022. Recuperado el 31 de enero de 2024, de <https://www.gob.mx/presidencia/prensa/mexico-y-estados-unidos-firmarian-plan-bilateral-sobre-energia-informa-presidente-lopez-obrador>

- Presidencia de la República. (2022b). Presidente de la República encabeza encuentro con enviado especial presidencial para el clima de Estados Unidos. Presidencia de la República, boletín de 28 de octubre de 2022. Recuperado el 31 de enero de 2024, de <https://www.gob.mx/presidencia/prensa/presidente-de-la-republica-encabeza-encuentro-con-enviado-especial-presidencial-para-el-clima-de-estados-unidos>
- RN. (2024). Renewables Ninja. Consulta al portal público del sistema. Recuperado el 31 de enero de 2024, de <https://www.renewables.ninja/>
- SEMARNAT-CRE. (2023). Factores de Emisión. Registro Nacional de Emisiones RENE. SEMARNAT, en el portal se encuentran los factores de emisión de 2014 a 2022. Recuperado el 6 de febrero de 2024, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/registro-nacional-de-emisiones-rene>
- SENER. (2023). Programas de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional de 2014 a 2023. Secretaría de Energía. doi:<https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037-335360>
- SM. (2022). Programa maestro de Desarrollo Portuario del Puerto de Guaymas 2022-2027. Secretaría de Marina, Puertos y marina mercante. Suministrado por CODESO del Gobierno del Estado de Sonora. Recuperado el 6 de febrero de 2024, de <https://www.puertodeguaymas.com.mx/pmdp-y-poa>

PLAN SONORA DE ENERGÍAS SOSTENIBLES

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE MITIGACIÓN DE GASES
Y COMPUESTOS DE EFECTO INVERNADERO (GyCEI)

PLAN SONORA

DE ENERGÍAS SOSTENIBLES



2024

