



Instituto Mexicano para la Competitividad A.C.

Metodología para calcular *ex ante* externalidades asociadas a la generación de electricidad



ClimateWorks

Índice

1. Introducción.....	5
1.1 Antecedentes	7
1.2 ¿Qué se ha hecho en México?.....	8
2. Metodología.....	10
2.1 Cambio Climático.....	12
2.2 Salud.....	12
2.3 Biodiversidad.....	16
3. Resultados.....	18
4. Manual de uso.....	20
3.1 Análisis espacial.....	20
3.2 Estructura y contenido.....	21
3.3 Consultas.....	22
5. Anexo: Mapas resumen	24

Resumen Ejecutivo

El presente documento tiene como finalidad incorporar una estimación de las externalidades sociales y ambientales causadas por la generación de electricidad como criterio en la selección de tecnologías de generación en escenarios de planeación del sector eléctrico nacional. A diferencia de las metodologías actuales que estiman las externalidades de una planta de generación una vez construida, la presente metodología y calculadora pretenden estimar externalidades, en pesos por megawatt hora, antes de su construcción y en cualquier zona del país.

La estimación de externalidades desarrollada por el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) considera los impactos en salud, biodiversidad y cambio climático, de tal forma que permite mejorar la planeación de la generación eléctrica con base en dos criterios: la ubicación de una planta y la tecnología que dicha planta utilizará. De esta forma se pueden comparar las distintas externalidades de ubicar una planta en cierto lugar o bien, de usar diferentes tecnologías de generación.

Lo anterior pretende contribuir al aumento en la participación de tecnologías limpias a precios competitivos en dicha planeación, así como una mejor decisión de dónde ubicar las plantas de generación futuras en el país con base en un menor impacto social y ambiental que hoy no son considerados. Los impactos que considera la metodología son:

- Impactos a la salud con base en el modelo QUERI desarrollado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Dicho modelo es semi-empírico¹ basado en factores de ajuste para estimar el número de enfermedades respiratorias relacionadas con la inhalación de contaminantes que producen las plantas de generación eléctrica. Los costos que considera son los de atención médica, pérdida de productividad, voluntad a pagar y en su caso, mortalidad.
- Impactos al cambio climático basados en la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero con un valor acorde a los mercados de carbono.
- Impacto a la biodiversidad. Para esta estimación se establece un límite de concentración de contaminantes que se considera afecta el desarrollo de las plantas. En el siguiente paso se estima el área con cobertura vegetal alrededor de la planta que caería dentro de este radio de afectación y con base en un valor por hectárea establecido, de acuerdo al Programa de Servicios Ambientales del gobierno federal y al carbono capturado por hectárea, se estima el costo de dicha pérdida.

Para comparar cada uno de estos tres costos de acuerdo a la tecnología empleada en la producción de electricidad y su ubicación, el IMCO diseñó una calculadora en Excel que divide al país en 2,133 zonas (cuadros de 33 x 27 km) especificando para cada una su densidad poblacional y cobertura vegetal. De esta forma con sólo escoger: una de las seis tecnologías de generación², la capacidad de la planta (megawatts) y el cuadrante del país, el usuario obtiene el costo de la externalidad total, así como los cálculos, fórmulas, mapas guía, supuestos y un análisis de sensibilidad que respaldan los resultados.

¹ Semi-empírico se refiere al uso de factores de ajuste de plantas ya instaladas bajo características similares en Europa, dada la falta de información en México.

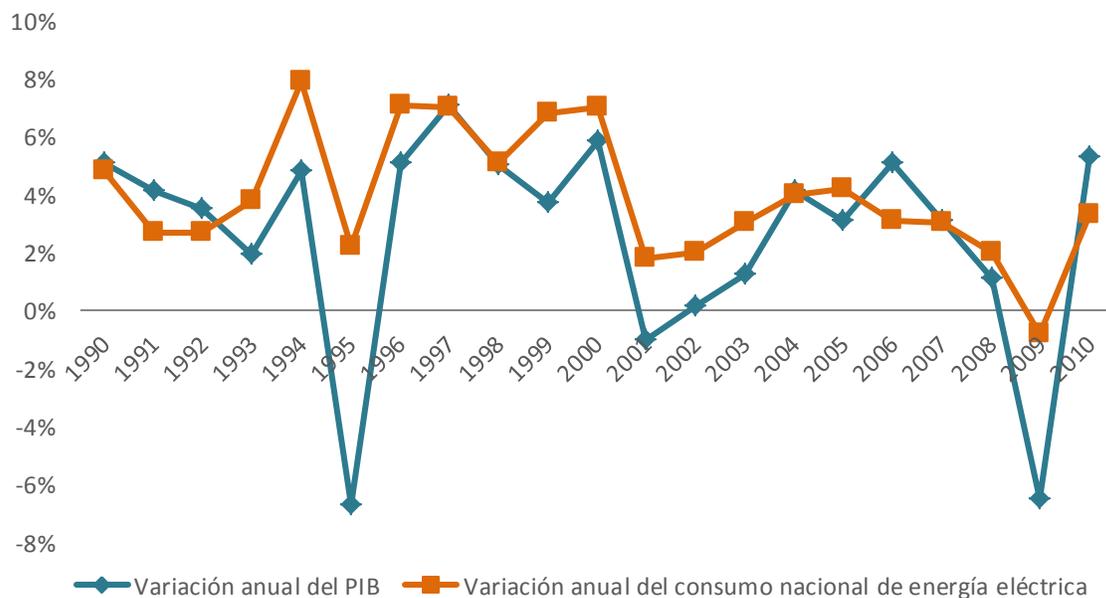
² Las tecnologías contenidas en el COPAR (Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión en el sector eléctrico) y que usan combustibles fósiles para generar electricidad.

Una clasificación de las zonas, de acuerdo a los resultados para cada tecnología de generación, arroja que el 55% del territorio presenta un nivel de impacto muy bajo o bajo, 34% un nivel medio y sólo el 11% de las zonas evaluadas llegan a un nivel alto o muy alto. Al desagregar por tecnología de generación, el monto promedio de las externalidades en pesos por megawatt hora y el valor presente de la externalidad fue de: \$943 y \$24,453 pesos/Mwh en una carboeléctrica, \$300 y \$8,239 pesos/Mwh para una termoeléctrica, \$262 y \$7,196 pesos/Mwh para plantas de combustión interna, \$222 y \$6,344 pesos/Mwh para una planta de turbogás con diesel, \$148 y \$4,304 pesos/Mwh para una planta de turbogás con gas, \$101 y \$2,941 pesos/Mwh en un ciclo combinado.

1. Introducción

La energía eléctrica juega un papel fundamental en el desarrollo económico y social del país, una muestra de ello es la relación existente entre las variaciones en el producto interno bruto (PIB) y el consumo de energía eléctrica (ver gráfica 1). Durante la crisis financiera de 2009, donde se experimentó una importante caída en el PIB de la mayoría de los sectores económicos del país, (diminución del 10% del PIB de la industria manufacturera que representa casi el 60% de las ventas internas de electricidad) registró un decremento del 0.8% en el consumo nacional de energía eléctrica. Por ello, contar con un sector eléctrico que opere de manera eficiente, confiable y segura es fundamental para la competitividad del país.

Gráfica 1. Evolución histórica del PIB y consumo nacional de energía eléctrica (variación anual)



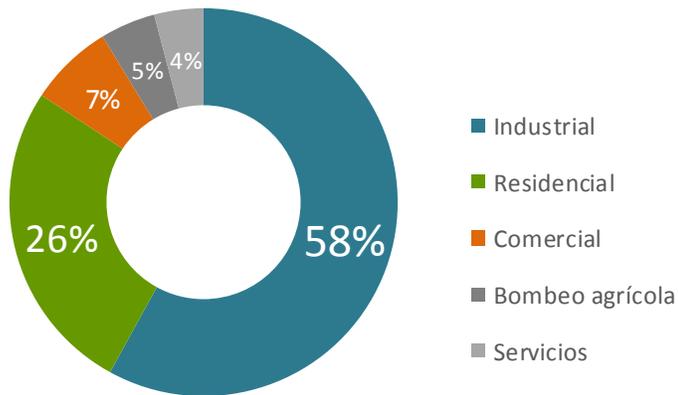
Fuente: Secretaría de Energía

La energía eléctrica se divide en cinco sectores: industrial, residencial, comercial, servicios y bombeo agrícola. El sector industrial es el principal consumidor de energía eléctrica con el 58% del consumo (109,015 Gwh) según datos de 2010, seguido por el sector residencial que representa el 26.3%. Sin embargo este último muestra el mayor crecimiento anual promedio en los últimos 10 años, con el 3.2%, en contraste con el agrícola que creció a una tasa del 0.9% anual.

De acuerdo a estimaciones de la Secretaría de Energía (SENER), se espera que la demanda de energía continúe creciendo a una tasa sostenida anual de 4.6% para llegar a ventas del servicio público nacional de 370,226 Gwh en 2025.³ Para este año los sectores industrial y residencial se mantendrían como los principales consumidores de electricidad, con una participación del 61% y 22% respectivamente, mientras que el resto de los sectores se repartirían el resto de las ventas prácticamente en las mismas proporciones que en el 2010.

³ Prospectiva del sector eléctrico 2011-2025, SENER.

Gráfica 2. Distribución de las ventas internas por sector, 2010

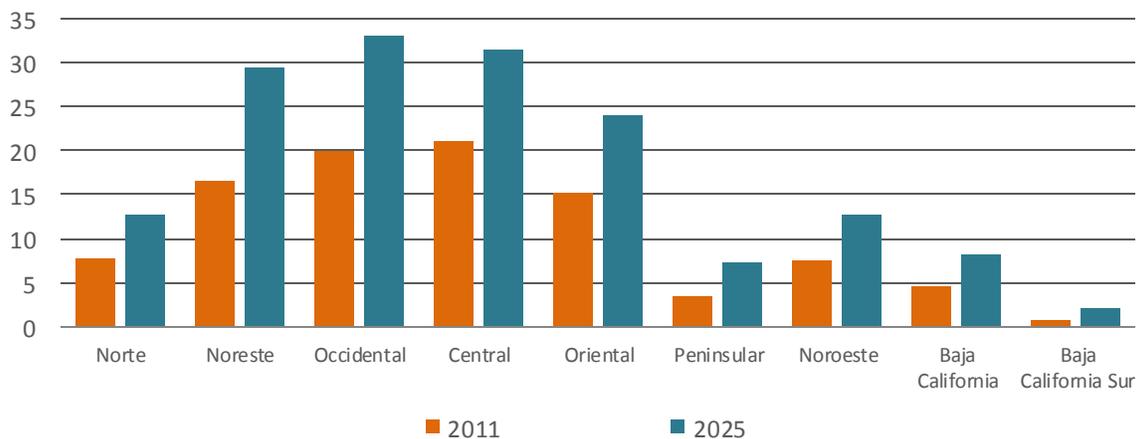


Fuente: Secretaría de Energía⁴

Por otro lado, la demanda de electricidad no es ni será igual en todo el país. Los cambios que se esperan a nivel regional en la demanda futura se muestran en la gráfica 3. Si bien esto nos responde el dónde y cuánto se consume de electricidad falta responder el cómo, pregunta dirigida directamente al gobierno como principal responsable de la generación de electricidad.

De acuerdo al Programa de obras e inversiones del sector eléctrico (POISE) en 2009 el 73.3%⁵ de la capacidad bruta instalada del sistema público quemaba combustibles fósiles (gas natural, diesel, combustóleo o carbón) para la generación de electricidad, lo cual se traduce en un factor de emisión de 0.487 tCO₂e/Mwh y se espera que para 2025 este valor caiga a 0.35 tCO₂e/Mwh⁶ ante un decremento en la participación de estas tecnologías de generación al 57.5%.

Gráfica 3. Demanda bruta en Twh/h por área de control, 2011 y 2025



Fuente: Secretaría de Energía

⁴ Prospectiva del sector eléctrico 2011-2025, SENER.

⁵ Programa de obras e inversiones del sector eléctrico 2011-2025, CFE.

⁶ Calculado por IMCO con información del IPCC y CFE.

Para satisfacer los cambios en dicha demanda, la Estrategia nacional de energía 2012-2026 se ha planteado cuatro objetivos para el sector:

1. Diversificar las fuentes de energía, incrementando la participación de tecnologías limpias.
2. Incrementar los niveles de eficiencia en el consumo de energía.
3. Reducir el impacto ambiental del sector energético.
4. Operar de forma eficiente, confiable y segura la infraestructura eléctrica.

Para cumplir dichos objetivos, el IMCO considera se requiere de un cambio en los criterios y parámetros empleados en la selección de las tecnologías de generación para que estos consideren los costos sociales y ambientales de las distintas opciones de generación. Con esto en mente se presenta la siguiente metodología para estimar las externalidades⁷ de la producción de electricidad a ser incorporadas en la planeación del sector eléctrico nacional.⁸

1.1 Antecedentes

A principios de los noventa la Comisión Europea y el Departamento de Energía de Estados Unidos iniciaron una colaboración para diseñar una metodología que permitiera cuantificar en términos monetarios las externalidades producidas por la generación de electricidad. De esta forma surgió la metodología conocida como ExternE (Externalities of Energy), esfuerzo que se ha transformado en un referente internacional y deriva en la cooperación entre diversos países, universidades e institutos de investigación.

En la instrumentación de dicha metodología se encontró que la falta de información es uno de los principales obstáculos para analizar externalidades en distintos países. Por ello, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)⁹ desarrolló unas “Metodologías simplificadas”, creadas a partir de la metodología “Vías de impacto” con el fin de cuantificar externalidades por quema de combustibles fósiles.

A partir de esto se crearon distintos programas para estimar externalidades acorde al nivel de información disponible, cada uno considera distintos contaminantes y factores de impacto. En la tabla 1 se muestran las principales características de los programas más conocidos.

⁷ La Ley para el aprovechamiento de energías Renovables y el financiamiento de la transición energética (LAERFTE) define externalidades como “Los impactos positivos o negativos que genera la provisión de un bien o servicio y que afectan o que pudieran afectar a una tercera persona. Las externalidades ocurren cuando el costo pagado por un bien o servicio es diferente del costo total de los daños y beneficios en términos económicos, sociales, ambientales y a la salud, que involucran su producción y consumo”.

⁸ Si bien, la metodología fue diseñada para cuantificar externalidades producto de la generación de electricidad puede adaptarse a cualquier fuente fija de emisión.

⁹ Organismo autónomo de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) que representa el principal foro intergubernamental para la cooperación científica y técnica en el uso de energía atómica con fines pacíficos.

Tabla 1. Programas desarrollados para calcular externalidades

	EXMOD	EcoSense	SIMPACTS
Fuentes Evaluadas	Calderas de combustibles fósiles, centrales nucleares, aerogeneradores	Calderas de combustibles fósiles, instalaciones nucleares	Calderas de combustibles fósiles, instalaciones nucleares, hidroeléctricas
Contaminantes	Partículas, Sulfatos, CO, Nitratos, Mercurio, Plomo, Radionuclidos	Partículas, SO _x , NO _x , Sulfatos, CO, Nitratos, Metales pesados, Radionuclidos	Partículas, SO _x , NO _x , Sulfatos, CO, Nitratos, Metales pesados, Radionuclidos
Impacto en Salud	✓	✓	✓
Impacto en Cultivos	✓	✓	✓
Impacto en Materiales	✓	✓	✓
Impacto en Ecosistemas	✗	✓	✗
Aplicado en...	Estados Unidos, Sudáfrica	Europa, América del Sur, Rusia, China	Países en desarrollo, en general en cualquier país

Fuente: Simplified approach for estimating impacts of electricity generation (SIMPACTS)

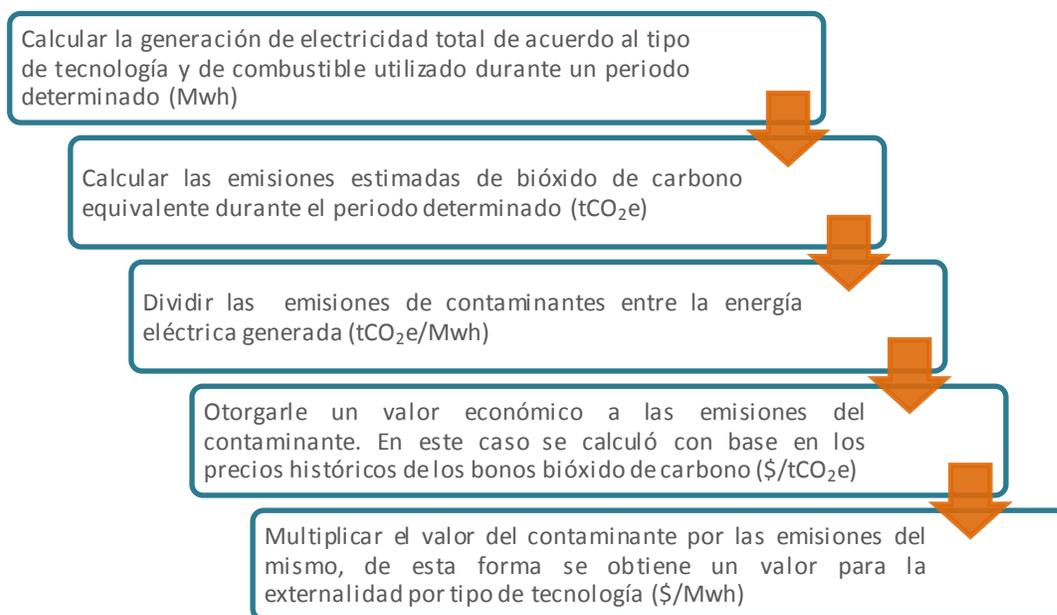
1.2 ¿Qué se ha hecho en México?

En junio de 2011 el gobierno federal mexicano reformó el artículo 36 BIS de la Ley de servicio público de energía eléctrica, con el fin de incorporar las externalidades ambientales de producir electricidad en su costo de producción. Esto es especialmente relevante ya que dicho artículo compromete a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a producir energía con la tecnología de menor costo disponible. Por ende, contar con una metodología que estime las externalidades para incluirlas como parámetro de decisión en la construcción de nuevas plantas de generación con base en la ley es fundamental. Lo anterior es especialmente relevante debido a que los escenarios de planeación de la SENER y CFE cuentan con un horizonte de planeación de 15 años.

El desarrollo de dicha metodología, de acuerdo a la Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética (LAERFTE), corresponde a la Secretaría de Energía, con la opinión de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y de la Secretaría de Salud (SSa).

Actualmente SENER cuenta con una primera metodología que se enfoca en internalizar los costos por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) o CO₂e.¹⁰ Sin embargo, dicha metodología es considerada provisional, ya que se está generando la información necesaria para sumarle los costos de impactos a la salud pública y medio ambiente. En la figura 1 se describen los pasos a seguir para implementar la metodología que actualmente está en uso.

Figura 1. Pasos a seguir para cuantificar externalidades por generación de electricidad



Fuente: SENER¹¹

Además de dicha metodología, se han hecho otros estudios para estimar las externalidades de plantas de generación en México. Por ejemplo, en el año 2003, el Instituto Nacional de Ecología (INE) publicó un estudio¹² que cuantifica las externalidades en salud de la termoeléctrica de Tuxpan, Veracruz, para lo que utilizaron estadísticas meteorológicas y emisiones medidas en la planta. Por otro lado, en los años 2004 y 2007, la SEMARNAT y la Comisión Económica para América Latina (CEPAL) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) publicaron dos estudios en los que cuantificaron las externalidades generadas durante la producción de electricidad basados en los impactos a la salud que tienen las principales termoeléctricas del país¹³ y en particular las termoeléctricas y refinerías localizada en Tula, Hidalgo y Salamanca, Guanajuato.¹⁴

¹⁰ Concentración de CO₂ que podría causar el mismo nivel de daños a la atmósfera que la concentración de diversos gases de efecto invernadero (óxido nitroso: N₂O, bióxido de carbono: CO₂ y metano: CH₄).

¹¹ Metodología para valorar externalidades asociadas con la generación de electricidad en México, SENER.

¹² Evaluación del impacto de las emisiones de la termoeléctrica de Tuxpan en la calidad del aire de la región, usando el sistema de modelado de dispersión CALMET-CALPUFF, INE.

¹³ Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México, CEPAL-SEMARNAT.

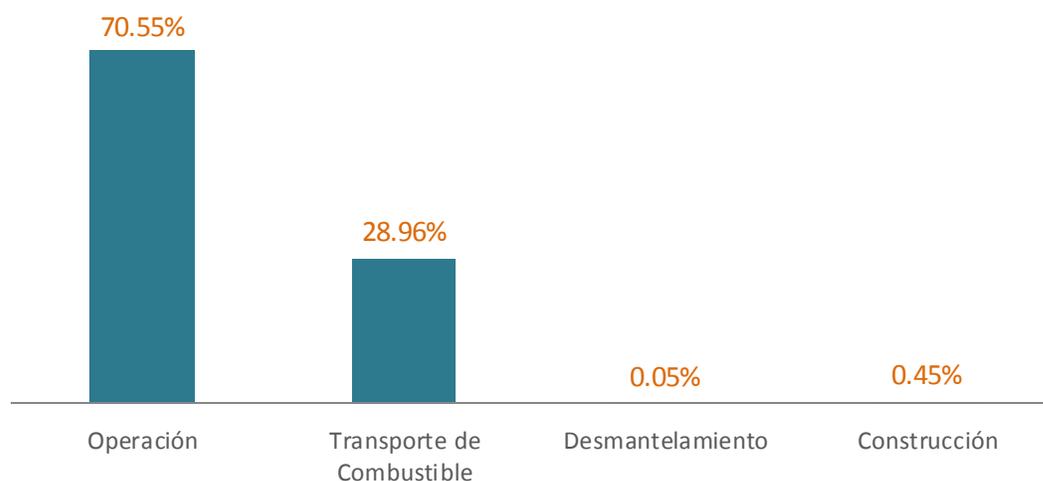
¹⁴ Evaluación de externalidades ambientales del sector energía en las zonas críticas de Tula y Salamanca, CEPAL-SEARNAT.

2. Metodología

Con el fin de enriquecer la metodología para calcular externalidades utilizada actualmente por SENER, sin la necesidad de generar nueva información, proponemos una metodología simple, aplicable en el corto plazo y que busca agregar valor centrándose en las externalidades generadas durante la operación de la planta.

En lugar de incluir un Análisis del ciclo de vida (ACV) donde se consideran los impactos generados en todo el proceso de una planta de generación¹⁵, lo cual requiere de información detallada. La presente metodología se centra en la operación de la planta por ser cuando se producen la mayor parte de las externalidades (70%) de las plantas que usan combustibles fósiles (ver gráfica 4). En contraste, en las plantas de energías renovables el 57% de las externalidades se presentan durante la construcción de la planta.¹⁶

Gráfica 4. Nivel de participación en las externalidades por etapa de las plantas de generación eléctrica con combustibles fósiles.



Fuente: Cost Assessment for Sustainable Energy System, Unión Europea (UE)

Con este criterio estimamos las externalidades de seis tecnologías que usan diesel, gas, carbón o combustóleo para generar electricidad de acuerdo a los documentos de planeación del sector POISE y COPAR, éstas son:

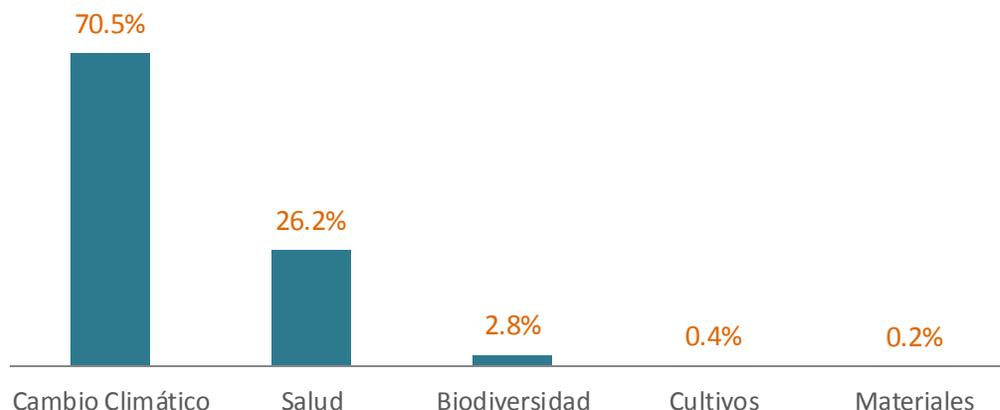
- Carboeléctrica
- Ciclo combinado
- Combustión interna
- Termoeléctrica convencional
- Turbogás con gas
- Turbogás con diesel

¹⁵ Dicho análisis considera los costos de construcción y desmantelamiento de la planta, así como el transporte de combustibles y deshechos, disposición de los residuos, la explotación del combustible y otros materiales, además de la transmisión y distribución de electricidad.

¹⁶ Cost Assessment for Sustainable Energy System, UE.

Cabe mencionar que la metodología propuesta no incluye impactos en cultivos o materiales de construcción, (considerados en ExternE), debido a los requerimientos de información adicional son altos y realmente representan muy poco (menos del 1%) en comparación con otras fuentes de externalidades¹⁷ (ver gráfico 5). Además el SO₂ a concentraciones bajas se comporta como fertilizante, por lo que llegan a presentarse externalidades positivas.

Gráfica 5. Participación de impactos en la externalidad de la generación eléctrica

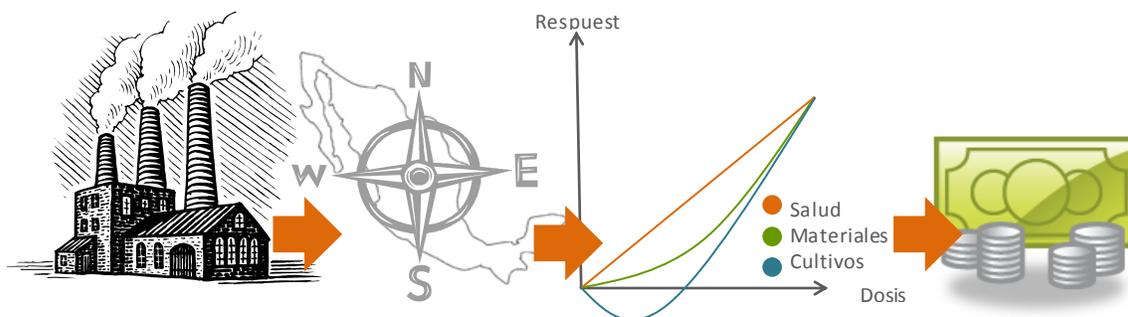


Fuente: Cost Assessment for Sustainable Energy System, EU

En resumen, las principales características de la presente metodología son:

1. Partir de una metodología que es una referencia internacional “Vías de impacto” desarrollada en ExternE.
2. Centrarse en el proceso operativo de la planta.
3. Cumplir cuatro pasos (ver figura 2):
 - a. Definir las características de la fuente de emisión: localización de la planta, características de la chimenea, combustible y capacidad, factor que determina el flujo de contaminantes.
 - b. Estimar la zona de impacto de acuerdo a modelos de dispersión de contaminantes.
 - c. Evaluar los impactos a través de funciones dosis-respuesta, las cuales relacionan el número de casos o afectaciones con la exposición de contaminantes atmosféricos.
 - d. Estimar costos monetarios de dichos impactos.

Figura 2. Etapas de la metodología vías de impacto



Fuente: ExternE

¹⁷ Cost Assessment for Sustainable Energy System, EU.

2.1 Cambio Climático

La metodología para cuantificar las externalidades relacionadas al cambio climático es prácticamente la misma que la empleada actualmente por SENER, excepto que esta identifica el factor de emisión por tipo de combustible y lo multiplica por el combustible necesario para producir una unidad de energía. En cambio, la metodología usada por SENER, divide el total de emisiones de la planta entre la energía generada en ese periodo. Por ejemplo, una planta carboeléctrica, donde para generar un megawatt hora se queman 553 kg de carbón¹⁸, cuyo factor de emisión es $1.73E^{-3}$ tCO₂e por kilogramo¹⁹, nos arroja que su factor de emisión, obtenido de multiplicar el factor de emisión del combustible por el consumo específico, es de 0.95 tCO₂e/Mwh.

Entre las características más importantes de esta estimación es que, contrario a la estimación de las otras externalidades, para ésta no importa la localización de la planta (al ser un impacto global), sino el tipo de planta y su combustible. Por lo tanto, en dicha estimación no se requiere de modelos complejos de dispersión de contaminantes.

2.2 Salud

Para estimar los costos en salud se tomó como base el modelo QUERI (Quick Estimation of Respiratory Health Impacts), desarrollado por la OIEA, considerado una “Metodología simplificada” para calcular los impactos en la salud.

El punto de partida para dicha estimación es la ecuación de impacto SUWM (Simple Uniform World Model), ajustada por diversos factores²⁰ que consideran variaciones en la temperatura, flujo de los gases, densidad poblacional, localización y altura de la chimenea.²¹

A su vez, este modelo tiene tres niveles de análisis dependiendo de la información existente, estos son:

- Inferior: sólo requiere de información sobre densidad poblacional regional (considera un radio de 1,000 km).
- Intermedio: requiere de las densidades de población locales (radio de 50km) y regionales, así como la altura de la chimenea.
- Superior: requiere un gran detalle en el nivel de información, que va desde variables meteorológicas locales hasta parámetros de la chimenea para hacer uso de modelos dispersión.

Se seleccionó el nivel intermedio con el fin de aprovechar la información existente de densidad local generada en el Censo Económico y de Vivienda 2010 del INEGI. No se pudo usar el nivel superior ya que se requiere de información meteorológica muy detallada, la cual no existe para todo el país (ver figura 3).

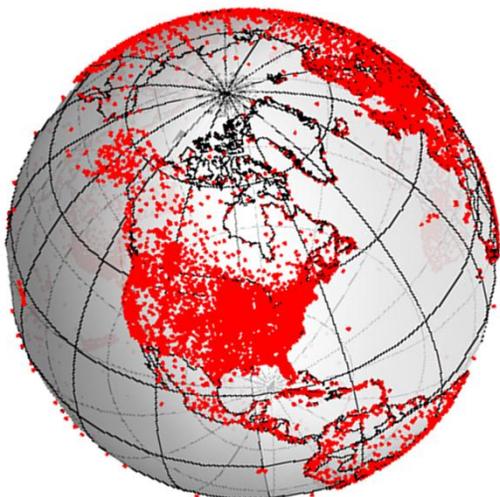
¹⁸ COPAR 2011, CFE.

¹⁹ 2005 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change.

²⁰ Estos factores están sujetos a actualizaciones.

²¹ Metodologías simplificadas: SIMPACTS.

Figura 3. Mapa de las estaciones meteorológicas en el mundo

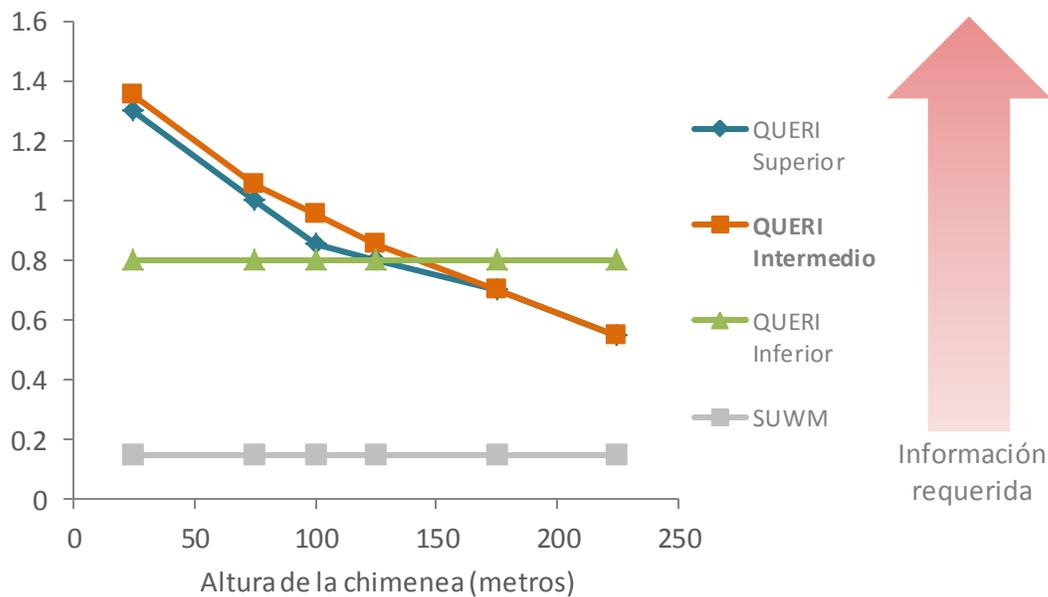


Fuente: Mathematica Weather Data

Sin embargo la diferencia entre los resultados de los modelos intermedio y superior no son tan distintos como muestra la gráfica 6.

Gráfica 6. Relación entre el número de casos y la altura de la chimenea

Impacto (#casos)



Fuente: SIMPACTS

De esta forma los pasos que se requieren para alimentar el modelo y estimar los impactos en la salud son:

1. Identificar los contaminantes que emiten las plantas, así como los daños a la salud o consecuencias derivadas de su concentración. En la tabla 2 se muestran los principales contaminantes y enfermedades consideradas.
2. Determinar la tasa de emisión por contaminante de acuerdo a las características de la planta: tipo de planta y combustible a quemar, capacidad instalada, unidades de combustible requeridas para producir una unidad de energía, y factor de emisión por unidad quemada.
3. Delimitar las características ligadas de la localización de la planta de generación, básicamente densidad poblacional local y regional.

Tabla 2. Contaminantes considerados y efectos en la salud

	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	Sulfatos	Nitratos
Bronquitis crónica	✗	✗	✓	✓	✓
Enfermedades respiratorias (hospital)	✓	✗	✓	✓	✓
Días de actividad restringida	✗	✗	✓	✓	✓
Visitas a sala de urgencia	✗	✗	✓	✓	✓
Crisis aguda de asma	✗	✗	✓	✓	✓
Tos crónica	✗	✗	✓	✓	✓
Enfermedades cardiovasculares (hospital)	✗	✗	✓	✓	✓
Mortalidad crónica	✗	✗	✓	✓	✓
Mortalidad aguda	✓	✗	✓	✓	✓

Contaminante primario ● Contaminante secundario ●

Fuente: CEPAL-SEMARNAT²²

Una vez identificados los *inputs* del modelo, se aplicó el modelo QUERI que determina el número de casos de enfermedades relacionados con la construcción de una planta eléctrica. Las ecuaciones del modelo en su nivel intermedio y sus significados se resumen en la figura 4 a continuación.

²² Evaluación de externalidades ambientales del sector energía en las zonas críticas de Tula y Salamanca, CEPAL-SEMARNAT.

Figura 4. Ecuaciones de evaluación de impacto para la estimación intermedia del QUERI²³

$$I = \frac{\rho_{reg} * f_{er} * Q}{k} * C_P * C_K * C_F * C_T * F_S * F_\rho$$

- Diferencia en las densidades regionales

$$C_P = \frac{\rho_{reg_ref}}{\rho_{reg}} * \left[\gamma_{local} + (1 - \gamma_{local}) * \frac{\rho_{reg}}{\rho_{reg_ref}} \right]$$
- Velocidades de decaimiento del contaminante

$$C_K = \frac{k}{k_{ref}} * \left[\gamma_{local} + (1 - \gamma_{local}) * \frac{k_{ref}}{k} \right] \quad \gamma_{local} = 0.2574 * \left(\frac{\rho_{local}}{\rho_{reg}} \right)^{0.4715}$$
- Diferencia en los flujos de los gases

$$C_F = R_F^{b_i} \quad R_F = \frac{F_{gases}}{F_{ref}}$$
- Diferencia en las temperatura de los gases

$$C_T = a_i R_T^{b_i} \quad R_T = \frac{T_{gases}}{T_{ref}}$$
- Altura de la chimenea

$$F_S = a_i * h_S^{b_i}$$
- Densidad poblacional y localización geográfica

$$F_\rho = a_i * h_S^{b_i} * C_{ST} \quad C_{ST} = \frac{[\gamma_{local} * \rho_{local} + (1 - \gamma_{local}) * \rho_{reg}]_{nueva}}{[\gamma_{local} * \rho_{local} + (1 - \gamma_{local}) * \rho_{reg}]_{referencia}}$$

I número de casos por efecto en la salud por tipo de contaminante.

ρ densidad poblacional (reg:regional, ref: referencia).

γ fracción del impacto total correspondiente al dominio local.

k velocidad de decaimiento por contaminante.

a_i, b_i constantes elegidas de acuerdo a la localización de la fuente, varían por factor de ajuste.

R_F relación entre el flujo (F) de los gases estimado y de referencia.

R_T relación entre la temperatura (T) de los gases estimado y de referencia.

h_s altura de la chimenea.

C_{ST} relación entre la población local y regional de referencia y la real.

f_{er} pendiente de la función exposición-respuesta.

Q tasa de emisión por contaminante específico.

Fuente: AIRPACTS, Equations for impact and damage cost assessments.

²³ Usada en contaminantes primarios, en los secundarios no se aplican los factores de ajuste.

Para determinar los valores de las constantes a ser utilizadas en los factores de ajuste se empleó la clasificación propia del modelo que resultó de dividir la densidad poblacional local entre la densidad regional. A continuación se muestran los valores de las constantes a incluir con respecto a la clasificación y los parámetros para su selección.

Tabla 3. Constantes usadas de acuerdo a la clasificación por densidad poblacional.

Clasificación	C_F		C_T		F_S		F_p	
	b	a	b	a	b	a	b	
Zonas rurales ($x < 2$)	-0.0568	1.02	-0.245	2.94	-0.206	4.35	-0.15	
Ciudades pequeñas ($x < 6$)	-0.1034	1.035	-0.429	1.52	-0.076	4.35	-0.15	
Ciudades medianas ($x < 10$)	-0.1034	1.035	-0.429	1.38	-0.056	4.35	-0.15	
Ciudades grandes ($x > 10$)	-0.1507	1.05	-0.6	1.47	-0.071	30.4	-0.37	
Ciudades grandes (a menos de 25 Km)	-0.1034	1.035	-0.429	1.4	-0.06	11.9	-0.25	
Ciudades grandes (a menos de 40 Km)	-0.1034	1.035	-0.429	1.5	-0.074	3.93	-0.14	
Ciudades grandes (a más de 40 Km)	-0.1034	1.035	-0.429	1.52	-0.076	4.35	-0.15	

Fuente: SIMPACTS

Tras determinar el número de casos por tipo de enfermedad se consideran cuatro costos:

- Costo directo o de tratamiento: hace referencia a los costos del sector salud de atender a un paciente que presente la enfermedad o afectación. Es tomado a partir de los costos unitarios “nivel tres” del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) publicados en 2012, así como del estudio realizado por la CEPAL en colaboración con SEMARNAT.²⁴
- Pérdida de productividad: monetiza los días perdidos por enfermedad de un empleado, derivado del tiempo que deja de trabajar.²⁵ Calculado a partir de los días de inactividad por enfermedad publicados por CEPAL y el ingreso promedio diario reportado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).²⁶
- Voluntad a pagar: considera lo que estaría dispuesto a pagar una persona por no enfermarse.²⁴
- Mortalidad: considera un número de años de vida perdidos de acuerdo a si se trata de muerte crónica o aguda. Para monetizar esta pérdida se parte del valor estadístico de la vida estimado por Hammit-Ibarrán para México y la metodología propuesta por Spadaro ajustado para México.²⁴

2.3 Biodiversidad

El impacto en la pérdida de la biodiversidad o impacto ambiental se determina a partir de los servicios ambientales recibidos de una superficie forestal. Los servicios considerados son los hidrológicos y de biodiversidad que estipula el programa federal “Pago por Servicios Ambientales” (PSA), así como los servicios por captura y almacenamiento de CO₂.

²⁴ Evaluación de externalidades ambientales del sector energía en las zonas críticas de Tula y Salamanca, CEPAL-SEMARNAT.

²⁵ Se incorpora un factor de ajuste de 0.5 para personas mayores de 65 años, debido a que es menos probable que se encuentren trabajando.

²⁶ Encuesta nacional de ocupación y empleo, INEGI.

Para determinar si una superficie es afectada por la construcción de una planta de generación eléctrica se considera un límite en la concentración de dióxido de azufre (SO₂)²⁷, esto se debe a que este contaminante se comporta como un fertilizante a niveles inferiores de cierta concentración. Utilizando la siguiente ecuación (figura 5) se estima el radio hasta el cual se mantiene una concentración promedio igual o superior a la requerida para afectar una superficie de bosque.²⁸

Figura 5. Ecuación para calcular los impactos en la biodiversidad

$$R = \sqrt{\frac{Q}{\pi * (Cl - Cb) * k}}$$

- Q tasa de emisión del contaminante
π constante (3.1416)
Cl concentración límite a partir de la cual se cuenta el impacto
Cb concentración base o existente aún si no se instalara la fuente de emisiones
k velocidad de decaimiento por contaminante
R radio o distancia a la que se encuentra una concentración promedio

Fuente: [Quantifying the Damages of Airborne Pollution](#)

Una vez que se conoce el radio de concentración promedio igual o superior al límite especificado de dióxido de azufre, se calculan las hectáreas dentro del radio y se multiplica por un factor de ajuste que corresponde al porcentaje de dicho territorio con cobertura vegetal²⁹ en la zona, de otra forma se estaría sobreestimando el impacto en la biodiversidad.

Por último, para cuantificar el impacto en biodiversidad se asigna el valor de los servicios ambientales de acuerdo al programa PSA a cada hectárea, además de calcular la cantidad de CO₂ contenido en las plantas que se convierten en valor monetario asignándole el valor de los bonos de carbono, con esto se otorga un valor único por unidad de superficie integrada.

²⁷ 19 µg/m³ de acuerdo al modelo AGRIMAT, AIRPACTS, Equations for impact and damage cost assessments.

²⁸ Quantifying the Damages of Airborne Pollution.

²⁹ El porcentaje de cobertura vegetal fue obtenido de la carta de uso de suelo y vegetación 2005 del INEGI y se contabiliza como área con cobertura vegetal aquella clasificada como pastizal, bosque, selva, matorral xerófilo y otros tipos de vegetación.

3. Resultados

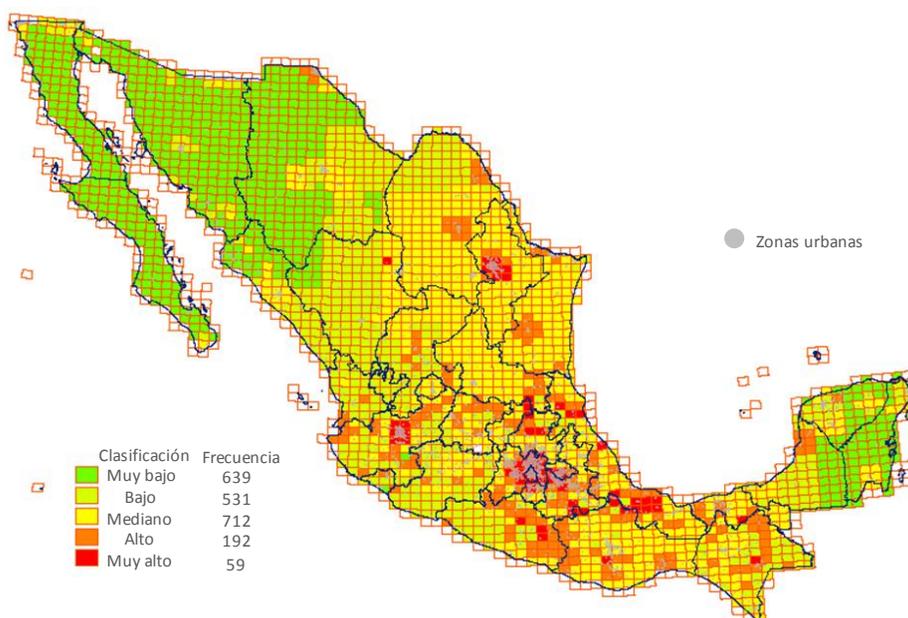
La metodología desarrollada para estimar las externalidades de la generación de electricidad mediante la quema de combustibles fósiles tiene uno de los mayores niveles de detalle con la información existente.

En la figura 6 se muestra la clasificación general de las externalidades por zona considerando las 6 tecnologías. Es decir, la clasificación del impacto en muy bajo, bajo, intermedio, alto o muy alto depende de la suma de las externalidades de cada tecnología generadas por zona.³⁰

De acuerdo a los resultados para cada tecnología de generación el 55% del territorio presenta un nivel de impacto muy bajo o bajo, 34% un nivel medio y sólo el 11% un nivel alto o muy alto. Al desagregar por tecnología de generación, el monto promedio de las externalidades en pesos por megawatt hora y el valor presente de la externalidad fue de: \$943 y \$24,453 pesos/Mwh en una carboeléctrica, \$300 y \$8,239 pesos/Mwh para una termoeléctrica, \$262 y \$7,196 pesos/Mwh para plantas de combustión interna, \$222 y \$6,344 pesos/Mwh para una planta de turbogás con diesel, \$148 y \$4,304 pesos/Mwh para una planta de turbogás con gas, \$101 y \$2,941 pesos/Mwh en un ciclo combinado.

El valor presente de la externalidad incluye las externalidades por megawatt hora a lo largo de la vida útil de la planta, ajustado por el crecimiento poblacional anual, tasa de deforestación anual por estado, inflación y tasa de descuento de acuerdo a CETES³¹.

Figura 6. Clasificación de nivel de externalidades totales por zona de las seis tecnologías



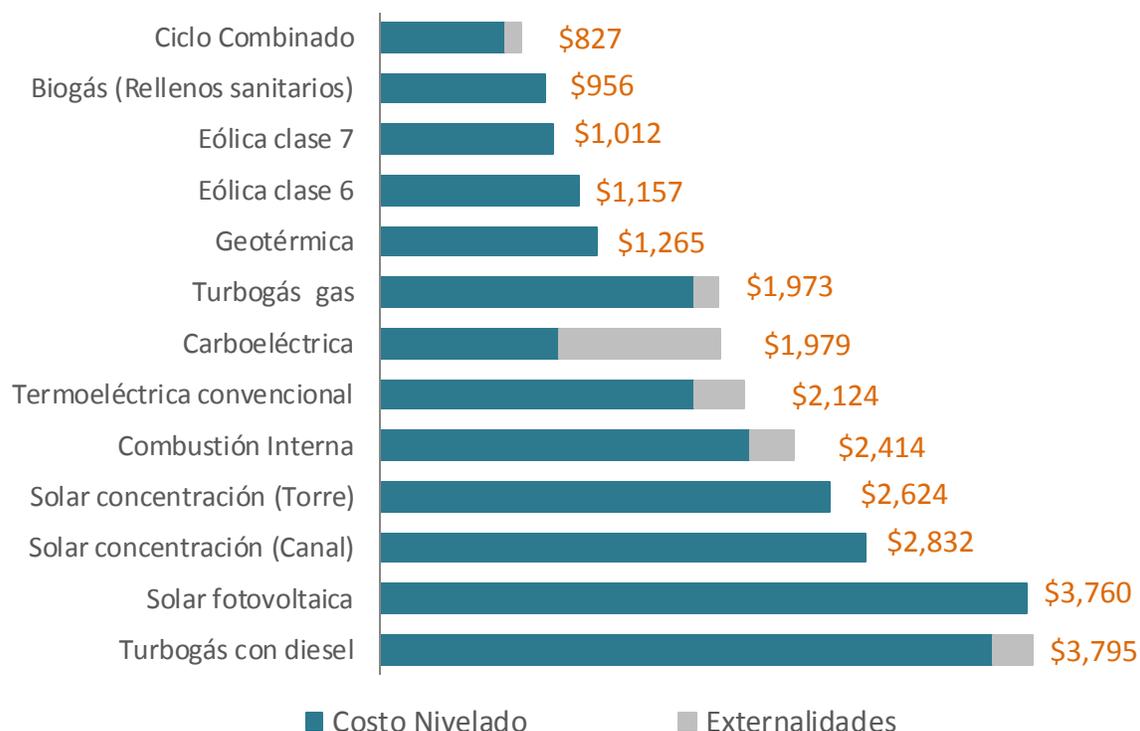
Fuente: Elaboración propia

³⁰ Para estratificar se usa el método Dalenius-Hodges, el cual busca la estratificación de menor varianza.

³¹ Se ajusta de acuerdo a prospectivas del Consejo Nacional de Población (CONAPO), al Índice de riesgo de deforestación del INE, así como datos de inflación y CETES del Banco de México.

Como es de esperarse, la incorporación de las externalidades consideradas en el presente modelo hace más competitivas a las energías renovables³² en cuanto a costo (ver gráfica 7).

Gráfica 7. Comparación de los costos nivelados con externalidades entre tecnologías (pesos/Mwh)



Fuente: Elaboración propia con datos de CFE, IPCC y EIA

Dichos beneficios junto con los avances tecnológicos representan una oportunidad para la disminución de los costos nivelados de las energías limpias. Por ejemplo, para la energía eólica se pronostica un 23% menor costo de inversión³³ para 2050, que a su vez representa el 87% de su costo nivelado³⁴, esto aunado a una menor externalidad contribuye a su adopción. Por otro lado, para el caso de la energía solar fotovoltaica se espera una reducción en los costos de inversión de 4,000 USD/Kwp (en 2008) a 1,800 USD/kwp³⁵ en 2020 que a su vez representan el 85% de su costo nivelado.³⁶

Considerando dichos cambios tecnológicos el costo de externalidades, la incertidumbre en los precios de los combustibles fósiles en México y la importancia de éstos en los costos de producción de energías de fuentes no renovables (51%³⁴ del costo nivelado), es muy probable que las tecnologías limpias aumenten su participación en el sistema eléctrico nacional.

³² Dado que la metodología propuesta sólo considera las emisiones durante la operación, se considera que las tecnologías que no queman combustibles fósiles para la generación de electricidad tienen un valor de sus externalidades igual a cero.

³³ Technology Roadmap: Wind Energy, International Energy Agency.

³⁴ COPAR 2011, CFE.

³⁵ Technology roadmap: Solar photovoltaic energy, International Energy Agency.

³⁶ Global mapping of greenhouse gas abatement opportunities up to 2030, Vattenfall.

4. Manual de uso

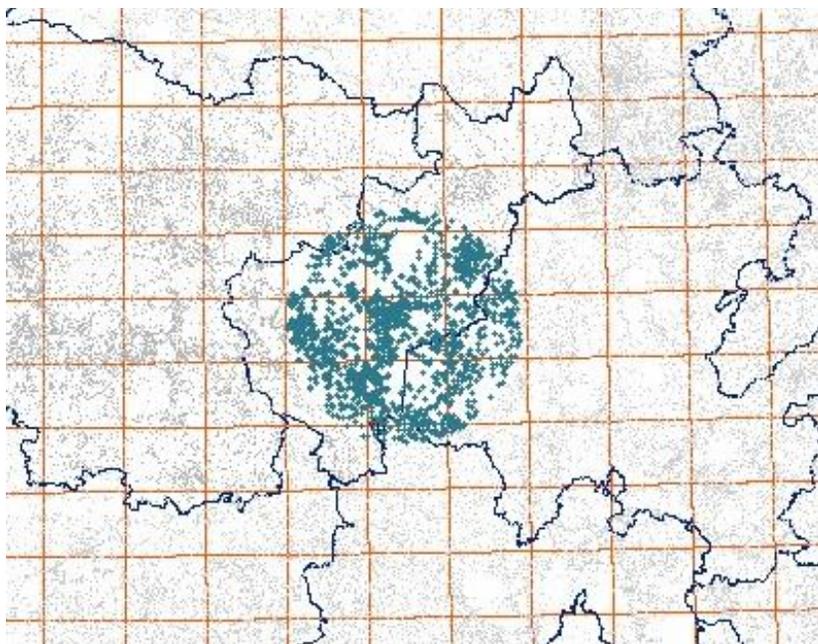
El IMCO desarrolló una calculadora para implementar la metodología previamente descrita. El objetivo de la calculadora es monetizar las externalidades *ex ante* e *in situ* y crear escenarios para integrar las externalidades al proceso de planeación energética de forma rápida, transparente y con una metodología robusta.

3.1 Análisis espacial

Para considerar las variaciones de la localización de la planta y hacer uso de la información al mayor nivel de detalle disponible se dividió al país en 2,133 zonas, de acuerdo a la carta topográfica escala 1:50,000 del INEGI. Para el área de impacto regional se usó la carta topográfica escala 1:250,000 del INEGI, con la cual se dividió al país en 128 zonas.

Una vez realizada la división se trazaron las zonas de impacto a nivel local (50km) y regional (1,000 km), en las cuales se calculó la densidad poblacional usando Mapa Digital³⁷, esto basado en la información a nivel localidad recopilada por el INEGI en el Censo de Población y Vivienda 2010. En el caso del impacto regional y el análisis local de las zonas fronterizas se consultó la información oficial de población de Estados Unidos y países de Centroamérica y el Caribe.

Figura 7. Ejemplo de análisis espacial realizado para determinar la zona de impacto local y su densidad poblacional



Fuente: Elaboración propia con información del INEGI

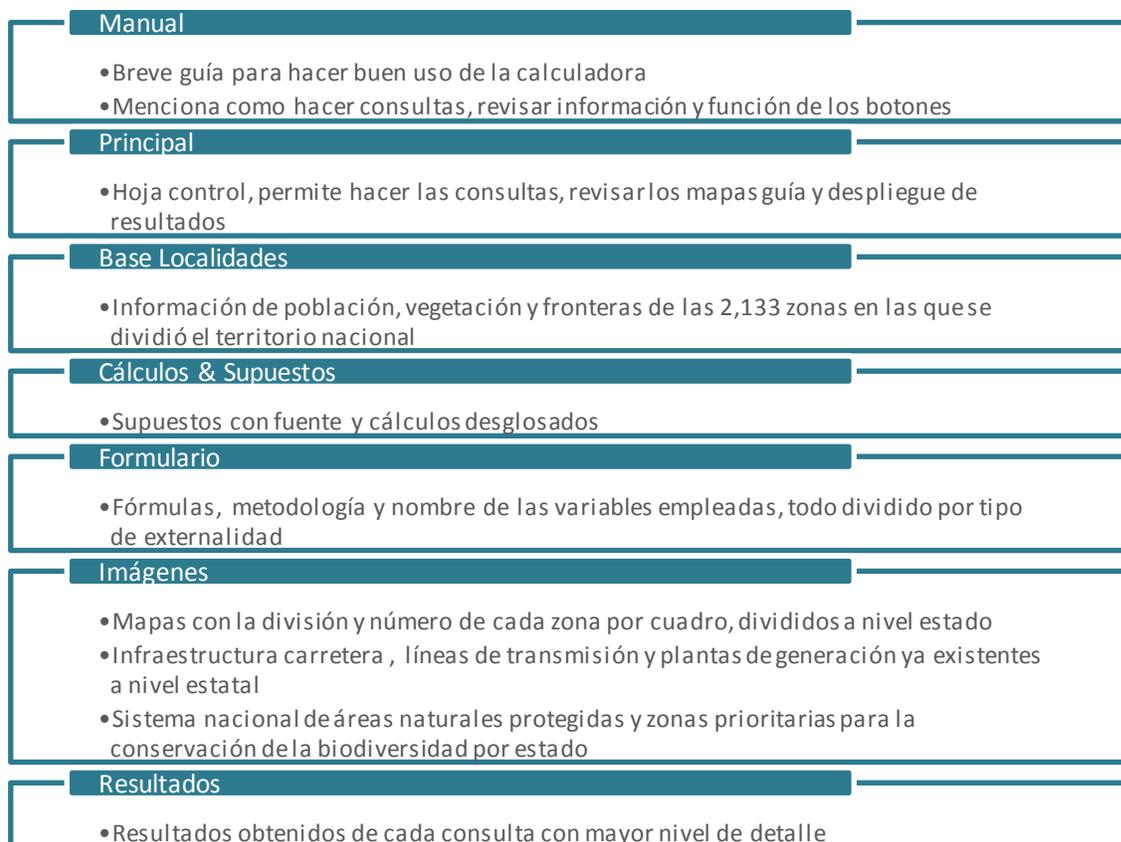
³⁷ Sistema de información geográfico (SIG) desarrollado por el INEGI

En el caso de la cobertura vegetal se descargaron los datos de la carta de uso de suelo y vegetación 2005 provista por el INEGI y usando la carta topográfica escala 1:250,000 se calculó la cobertura vegetal promedio para cada zona. El análisis espacial completo derivó en más de 2,500 consultas para generar la información necesaria al nivel desagregado.

3.2 Estructura y contenido

La calculadora se divide en siete hojas, todas visibles, ordenadas y sin ningún bloqueo que impida al usuario revisar los cálculos o cambiar algún supuesto. Estas hojas contienen un breve manual de uso, cálculos, supuestos, datos, un formulario, un control para hacer consultas y los mapas de apoyo. En la figura 8 se muestra un resumen de la estructura y contenido de cada una de las hojas.

Figura 8. Estructura y contenido de la calculadora



Fuente: Elaboración propia

La función de las hojas “Manual”, “Base Localidades”, “Formulario”, “Imágenes” y “Resultados” es sólo informativa o de soporte, no se puede tener una interacción con estas hojas más que de consulta. Caso contrario a las dos hojas restantes: “Principal”, que representa el control de la calculadora, permite hacer las consultas y desplegar tanto información de consulta como resultados, y la hoja “Cálculos&Supuestos” donde se pueden consultar todos los valores y fuentes de estos, además de poder actualizar estos de forma manual de acuerdo a nuevos escenarios o nueva información.

3.3 Consultas

Para hacer las consultas se deben seguir tres pasos:

1. Definir las características de la planta en la pestaña "Principal", y seleccionar entre seis tipos de plantas en la sección "Tipo de planta" así como determinar su "Capacidad bruta" tecleando los Mw a instalar.
2. Determinar lugar de construcción, para ello hay que indicar el cuadro o zona de análisis en el menú de cuadros del estado o zona puntual seleccionada. Como referencia espacial se incluyó el botón "VER MAPA", que despliega el mapa del estado seleccionado con las zonas numeradas, así como la red de carreteras, líneas de transmisión, plantas de generación ya existentes, zonas prioritarias de conservación de biodiversidad y el sistema nacional de áreas naturales protegidas.
3. Ver resultados. Una vez seleccionado el lugar a analizar y las características de la planta se debe dar clic en el botón "CALCULAR EXTERNALIDADES" para que se desplieguen los resultados, a nivel estatal de todos los cuadros o a individual del cuadro seleccionado con sus "vecinos", lo cual permite hacer un análisis de sensibilidad.

Figura 9. Control para hacer consultas



The image shows a web interface for IMCOQ (Instituto Mexicano para la Competitividad A.C.). At the top is the logo and name. Below it are two main sections: "CARACTERISTICAS DE LA PLANTA" and "AREA DE ANALISIS".

CARACTERISTICAS DE LA PLANTA	
Tipo de planta	Capacidad bruta (Mw)
TERMOELECTRICA CONVENCIONAL	600

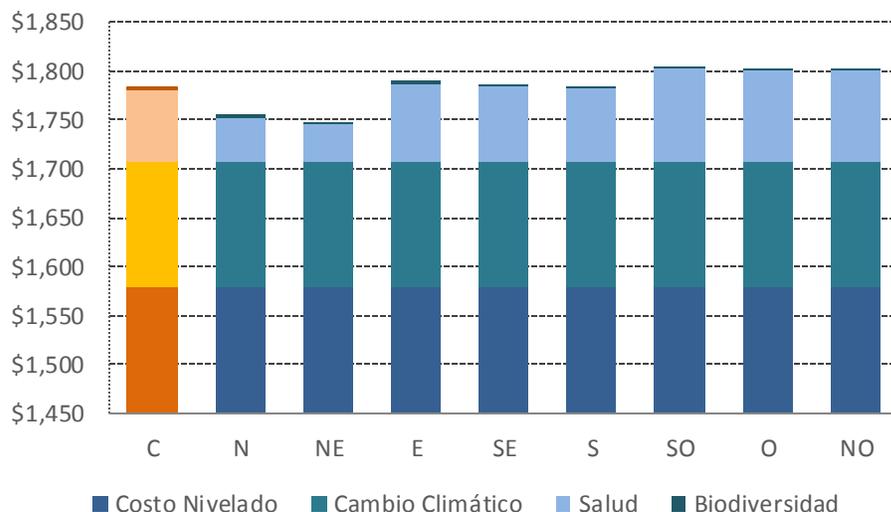
AREA DE ANALISIS	
Estado analizado	Area de análisis
NUEVO_LEON	31

At the bottom, there are two buttons: "VER MAPA" and "CALCULAR EXTERNALIDADES".

Fuente: Elaboración propia

La calculadora elaborada en Excel permite no sólo obtener resultados por cuadro, sino también a nivel estatal. Para las consultas puntuales o por cuadro se despliega una gráfica (ver gráfica 8) donde se calculan las externalidades de las zonas vecinas donde se decidió ubicar la planta. De esta forma se puede saber que tanto cambiaría el impacto de mover la planta a una de las cuadrículas vecinas. La gráfica además incluye el monto del costo nivelado de producción³⁸ de la tecnología seleccionada.

Gráfica 8. Gráfica ejemplo de resultados por análisis puntual

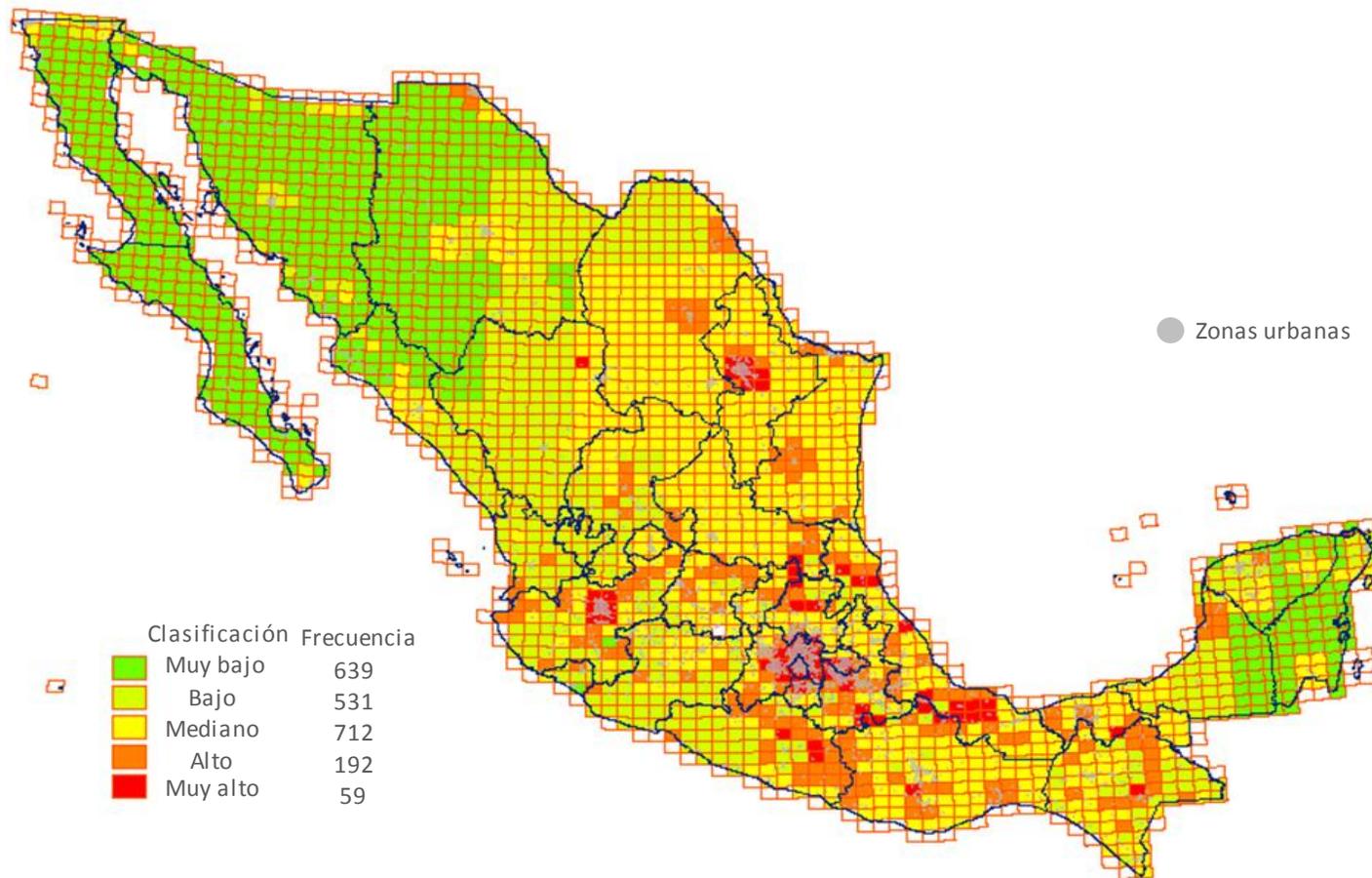


Fuente: Elaboración propia

³⁸ Sintetiza la información económica disponible de un proyecto. Su valor expresa el costo medio del bien o servicio y se usa como unidad de comparación. Se integra de tres partes: costo de inversión, combustible, operación y mantenimiento, CFE.

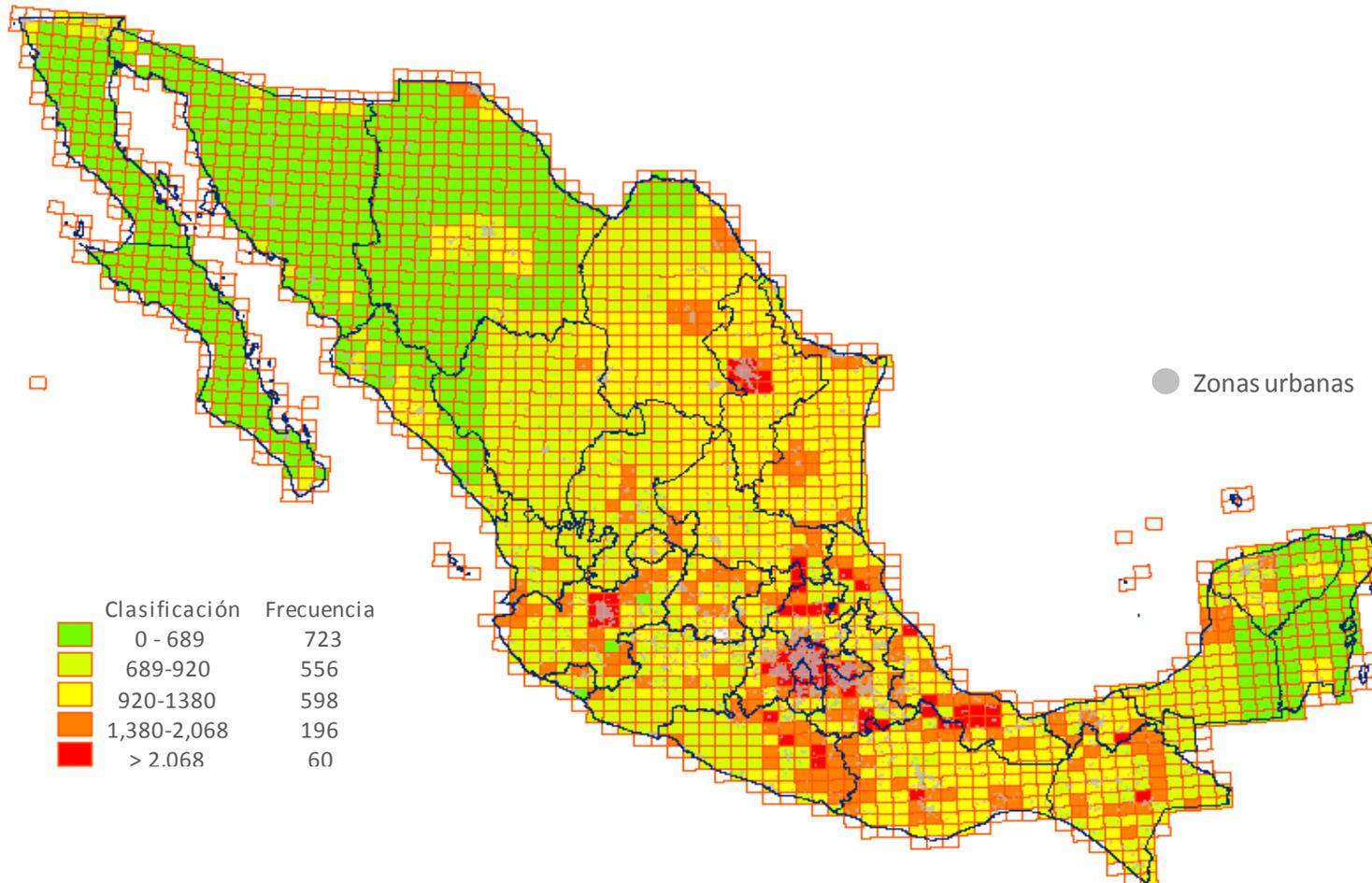
5. Anexo: Mapas resumen

Figura 10. Nivel de externalidades promedio de las 6 tecnologías analizadas por zona



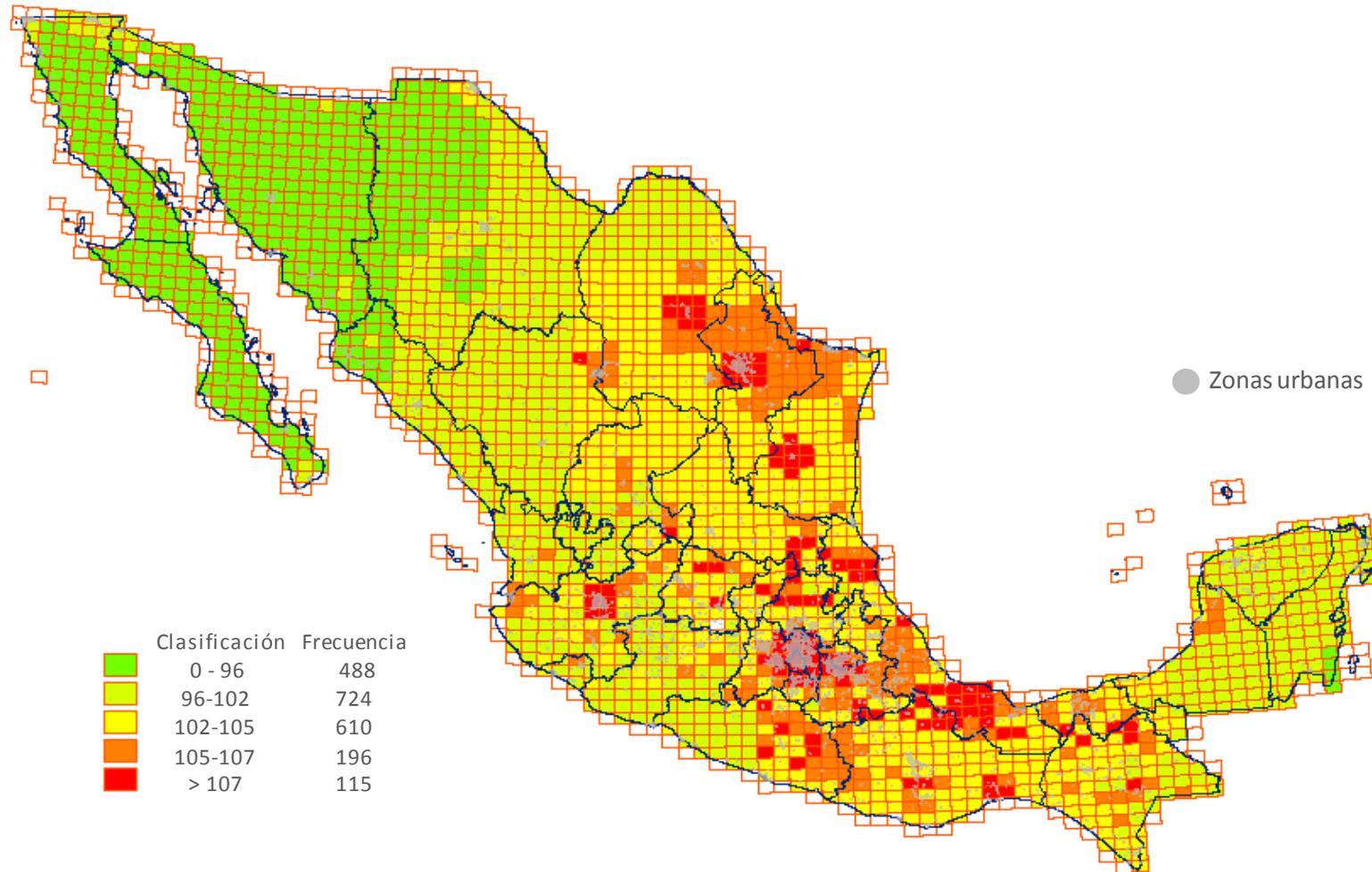
Fuente: Elaboración propia

Figura 11. Nivel de externalidades totales de una planta carboeléctrica por zona



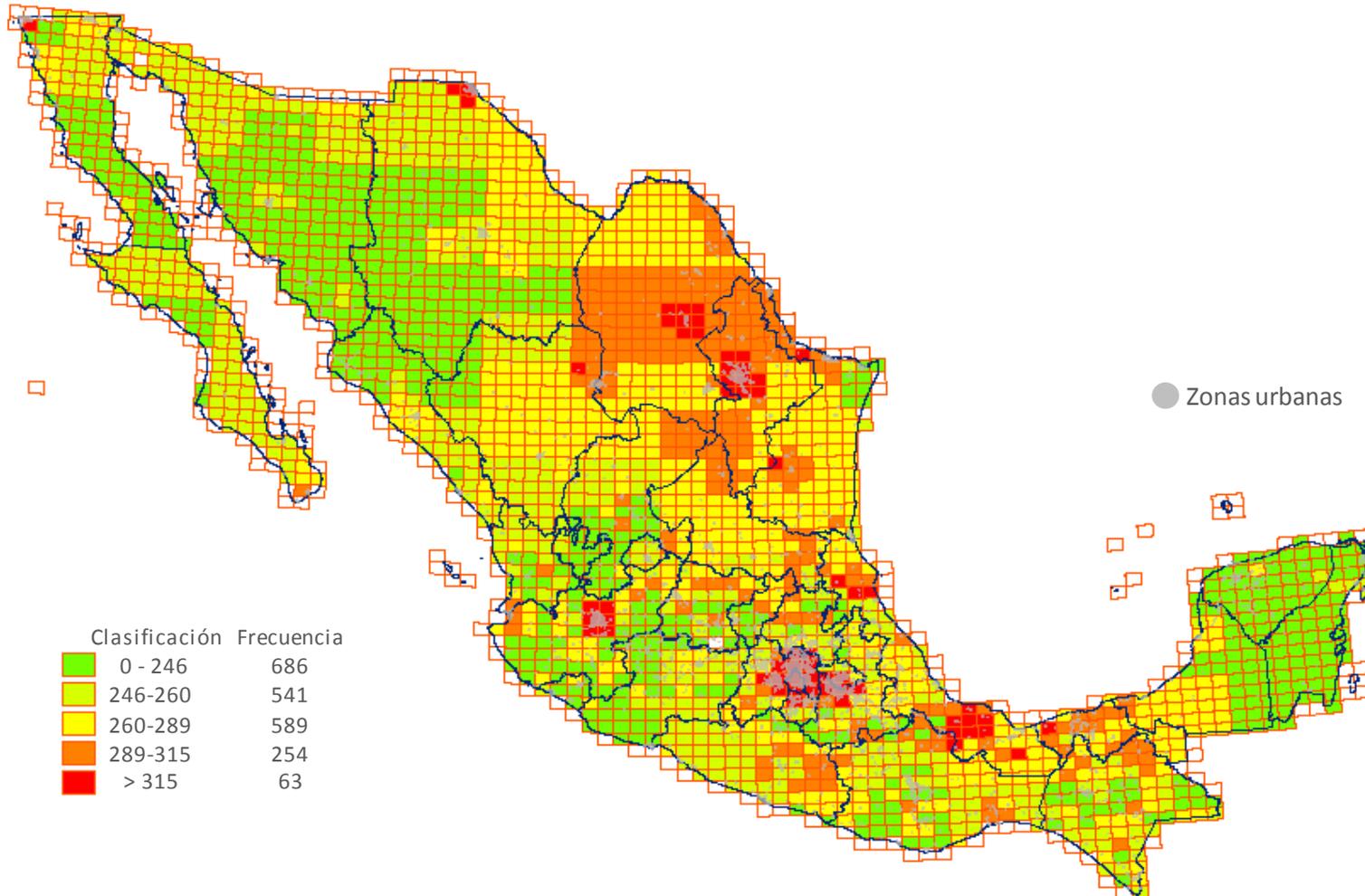
Fuente: Elaboracion propia

Figura 12. Nivel de externalidades totales de una planta de ciclo combinado por zona



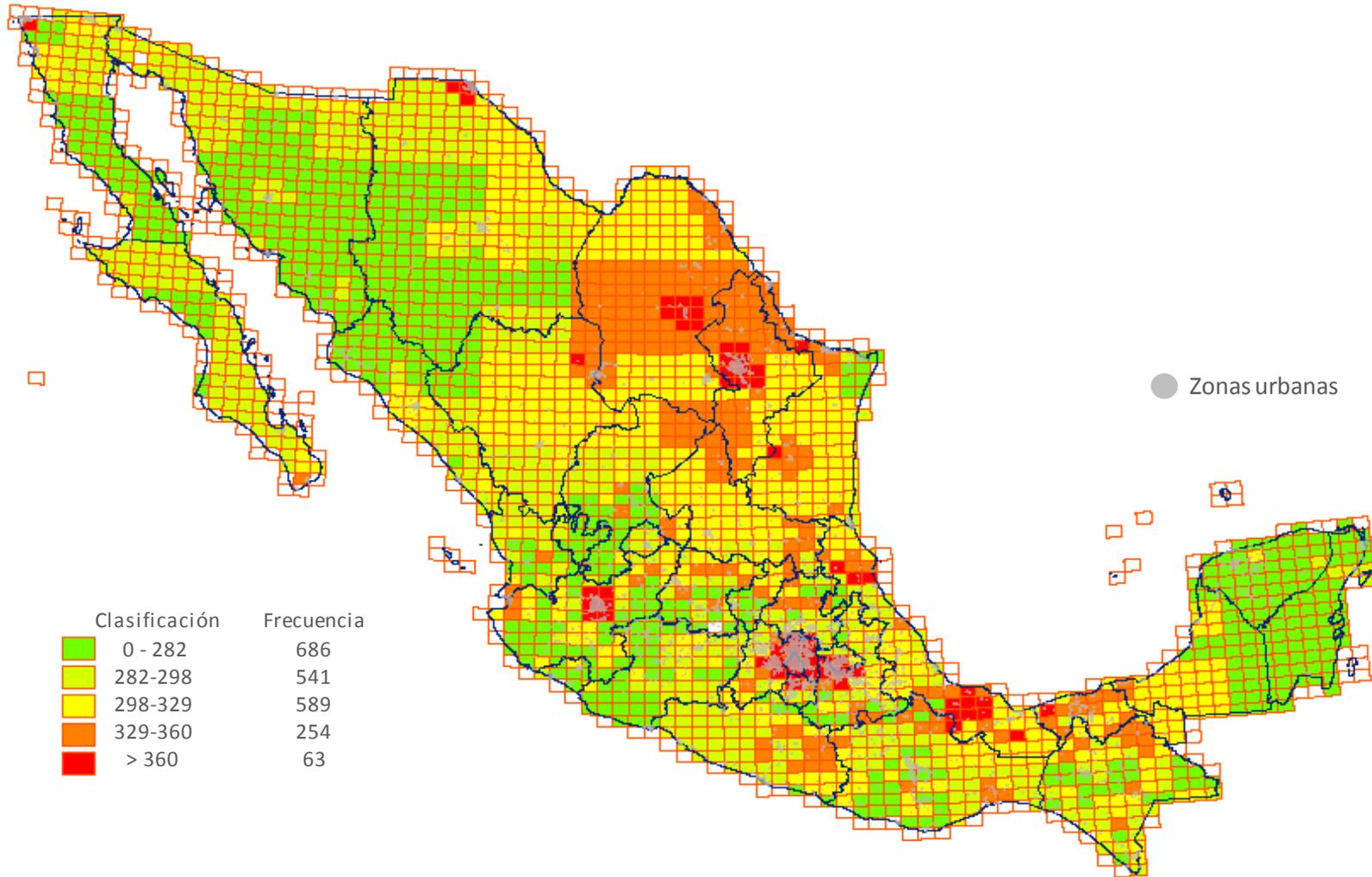
Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Nivel de externalidades totales de una planta de combustión interna por zona



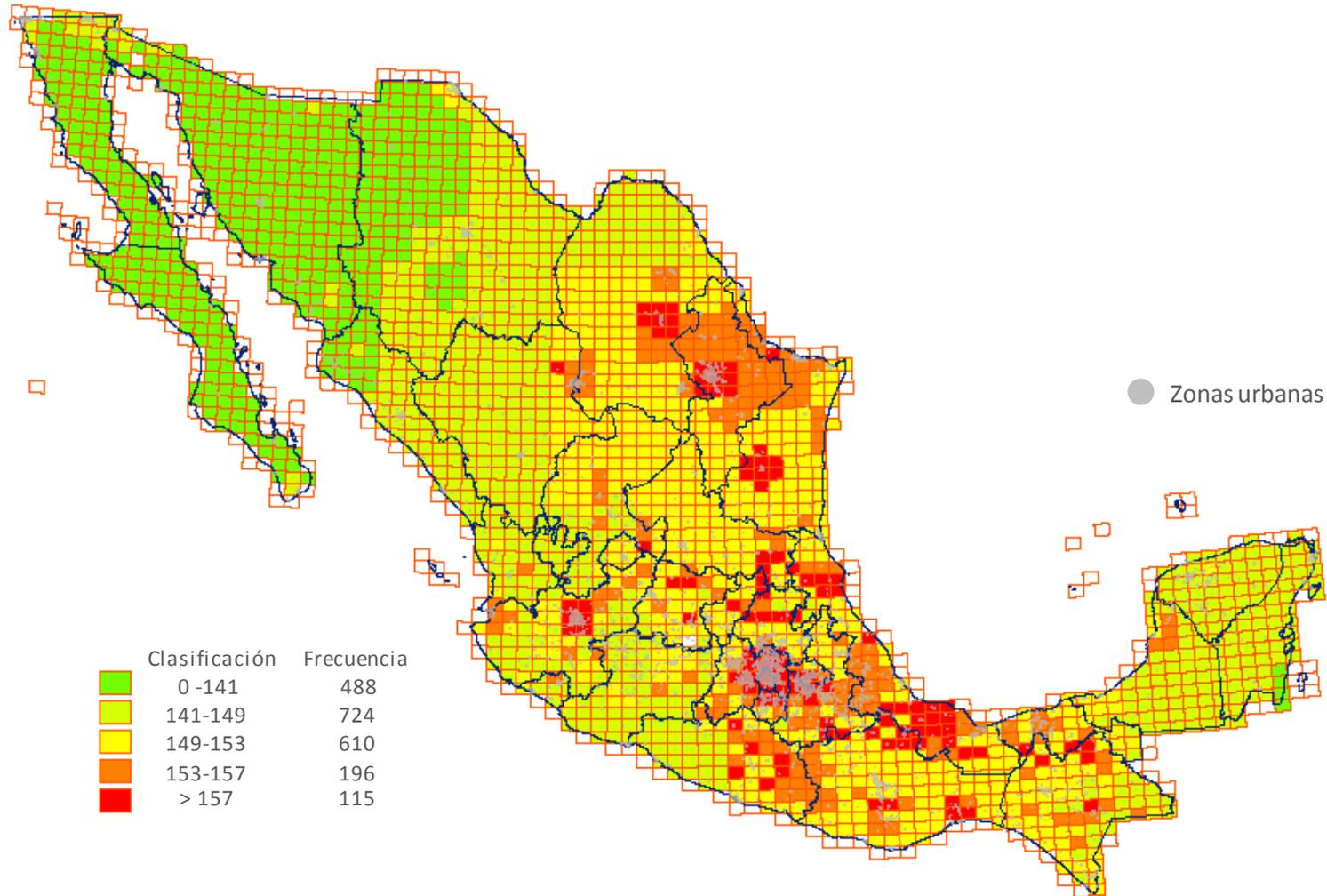
Fuente: Elaboración propia

Figura 14. Nivel de externalidades totales de una termoeléctrica por zona



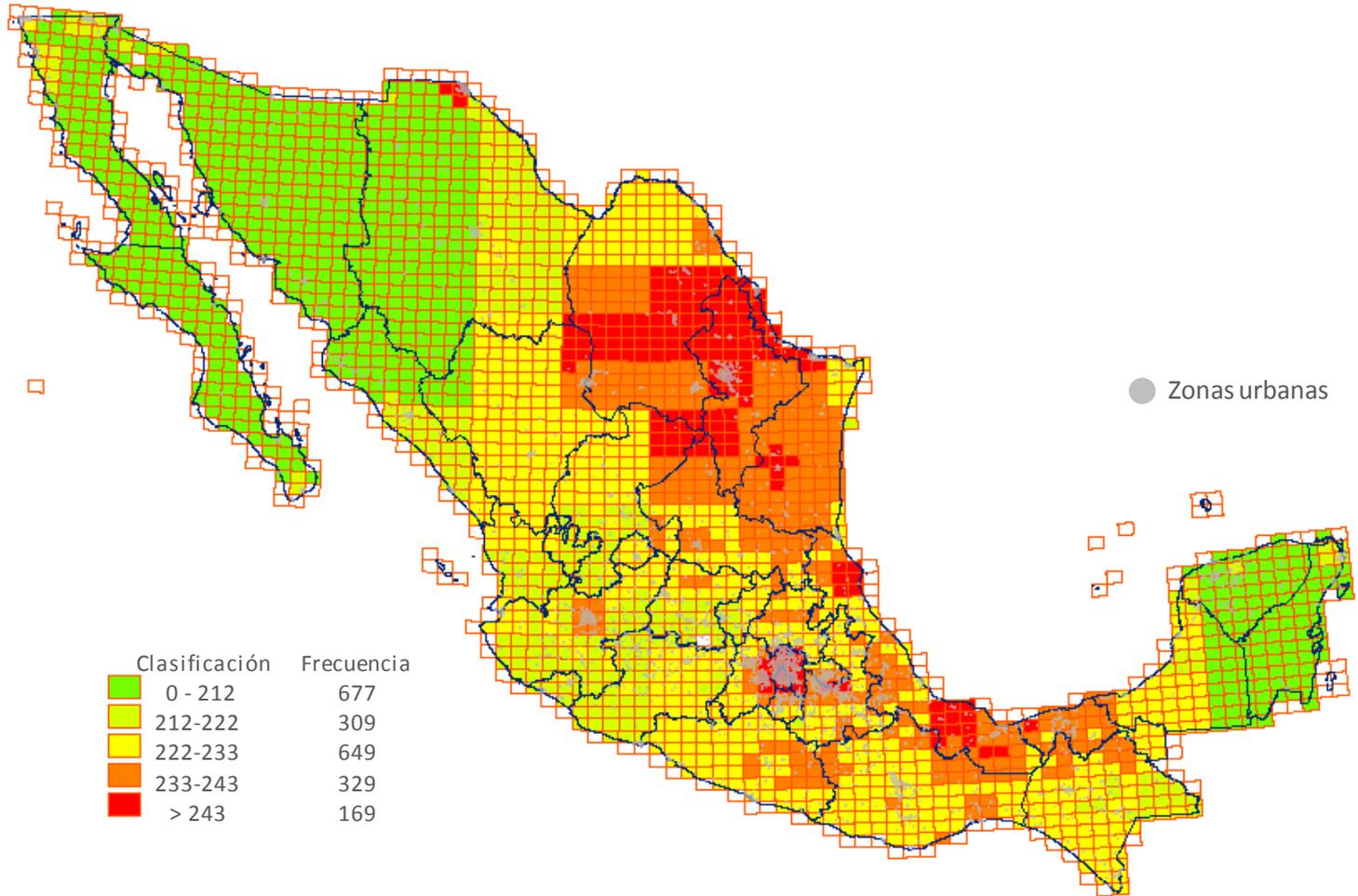
Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Nivel de externalidades totales de una planta de turbogás con gas por zona



Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Nivel de externalidades totales promedio de una planta de turbogás con diesel por cuadrícula



Fuente: Elaboración propia