

Integridad ecológica y crecimiento económico: validación empírica de la curva ambiental de Kuznets a nivel municipal en México con métodos econométricos y de RNA

Héctor Eduardo Díaz Rodríguez¹  - Universidad Autónoma Metropolitana, México

Magnolia Miriam Sosa Castro - Universidad Autónoma Metropolitana, México

Resumen

Este estudio evalúa la validez empírica de la Curva Ambiental de Kuznets (CKA) a nivel municipal en México, utilizando modelos econométricos y redes neuronales artificiales (RNA). Se analiza la relación entre producción bruta per cápita y el Índice de Integridad Ecológica (IIE), considerando el efecto moderador del tamaño poblacional y las capacidades funcionales municipales. Los resultados muestran que la CKA sólo se valida cuando se incluye un pequeño subconjunto de municipios con capital natural irremplazable y alto ingreso per cápita. Al excluirlos, la relación desaparece, lo que sugiere que la recuperación ambiental vinculada con el crecimiento económico no es un fenómeno extensivo ni endógeno en la mayoría de los municipios del país. Se concluye que los municipios con capital natural irremplazable deben recibir atención prioritaria y diferenciada en las políticas de conservación, mientras que el resto del territorio requiere estrategias específicas y diferenciadas de contención, restauración y fortalecimiento institucional, además de políticas transversales de cooperación entre los tres órdenes de gobierno para alinear esfuerzos de planificación territorial.

Clasificación JEL: Q56, R11, C45.

Palabras clave: Curva ambiental de Kuznets, integridad ecológica, municipios mexicanos, econometría, redes neuronales.

Ecological Integrity and Economic Growth: An Empirical Validation of the Environmental Kuznets Curve at the Municipal Level in Mexico Using Econometric and Artificial Neural Network Methods

Abstract

This study evaluates the empirical validity of the Environmental Kuznets Curve (EKC) at the municipal level in Mexico, using econometric models and artificial neural networks (ANNs). The relationship between gross production per capita and the Ecological Integrity Index (EII) is analyzed, considering the moderating effect of population size and municipal functional capacities. The results show that the EKC is only validated when a small subset of municipalities with irreplaceable natural capital and high per capita income are included. When these are excluded, the relationship disappears, suggesting that environmental recovery linked to economic growth is neither an extensive nor endogenous phenomenon in most of the country's municipalities. It is concluded that municipalities with irreplaceable natural capital should receive priority and differentiated attention in conservation policies, while the rest of the territory requires specific and differentiated strategies for containment, restoration, and institutional strengthening, in addition to cross-cutting cooperation policies among the three levels of government to align territorial planning efforts.

JEL Classification: Q56, R11, C45.

Keywords: Environmental Kuznets Curve, Ecological Integrity, Mexican Municipalities, Econometrics and Neural Networks.

¹ Autor de correspondencia. Email hdiaz@correo.xoc.uam.mx.

*Sin fuente de financiamiento para el desarrollo de esta investigación.



1. Introducción

El crecimiento económico es el motor del desarrollo material de los países; sin embargo, también ha generado presiones crecientes sobre el medio ambiente. Desde la primera revolución industrial, la expansión productiva ha estado asociada con un mayor consumo de recursos naturales y ello se asocia con procesos de deforestación, contaminación atmosférica, pérdida de biodiversidad y deterioro de servicios ecosistémicos. De esta forma, la dicotomía desarrollo económico y conservación ambiental ha sido objeto de un amplio estudio en la literatura económica, buscando explicar las condiciones bajo las cuales el progreso económico puede compatibilizarse con la sustentabilidad ecológica.

La relación entre ambas variables, quizá, nunca ha sido más importante que en la actualidad debido al carácter acumulativo de los procesos de degradación ambiental, que marcan la existencia de un punto de inflexión global que amenaza directamente las bases materiales del crecimiento y el bienestar. El costo de haber ignorado largamente esta interdependencia, se ha traducido en mayores crisis ambientales que trascienden a lo social.

Al respecto, estudios pioneros han abordado esta relación desde distintas metodologías y contextos epistemológicos. Entre ellos, destacan estudios como los de Shafik y Bandyopadhyay (1992), Grossman y Krueger (1995), Dinda (2004) y Stern (2004) que han contribuido con la comprensión de los canales de transmisión entre actividad económica y degradación ambiental.

Sin embargo, uno de los modelos más utilizados para explicar la dinámica entre crecimiento y degradación ambiental, es la Curva de Kuznets en su versión ambiental (CKA), teoría base en los estudios teóricos y empíricos relacionados con el tema. Inicialmente propuesta como una extensión de la hipótesis original de Kuznets (1955) sobre desigualdad y desarrollo, la CKA postula que, tras superar un umbral de ingreso per cápita, las economías reducen su impacto ambiental (Grossman y Krueger, 1995). Esta idea ha generado un intenso debate entre economistas neoclásicos, ecologistas y científicos de la sostenibilidad (con evidencia que apunta en distintas direcciones).

Tanto el umbral de ingreso, como los mecanismos a través de los cuales se produce la reducción de contaminantes varían de economía en economía en función de la tasa de cambio tecnológico y de las capacidades de absorción técnica, pero la literatura identifica umbrales de ingreso per cápita que oscilan entre \$5,000 y \$8,000 dólares, (Dasgupta et al., 2002).

En México, esta relación es de particular relevancia, en gran parte por la vasta biodiversidad del país, que lo posiciona como uno de los 13 países megadiversos del mundo y añade importancia a la conservación de sus ecosistemas únicos. Sin embargo, la relación ha sido escasamente estudiada a nivel municipal escala que permite capturar con mayor precisión las interacciones entre actividad económica e integridad ecológica. Ello es así, dado que los municipios constituyen la unidad institucional responsable de una parte importante de la gestión ambiental, de modo que su papel es fundamental para entender las trayectorias de sustentabilidad. De esta forma, la diversidad ecológica y socioeconómica de los municipios mexicanos ofrece un ámbito de análisis único para evaluar si la hipótesis de la CKA se cumple en contextos locales específicos, y en qué condiciones ello ocurre.

Si bien, se han desarrollado algunos estudios que buscan validar la existencia de la CKA para el caso de la economía mexicana (Gómez et al., 2011; Catalán, 2014; Godínez et al., 2021; Juárez, 2024) y algunos otros para regiones específicas dentro de ella (Pérez-Cirera et al., 2018; Ceballos y Flores, 2022), no existen estudios que aborden la problemática a nivel de municipios en México, ni tampoco mediante las metodologías utilizadas en el presente estudio², lo que constituye un aporte adicional de esta investigación al tratamiento del tema.

2 Específicamente, RNA a nivel municipal.

Si la hipótesis más general del planteamiento de la CKA es correcta, ello se debería reflejar en alguna magnitud en el nivel de ingreso per cápita (o variables proxy de este) y los niveles de contaminación a nivel municipal³.

Así, el objetivo de la presente investigación es evaluar la relación que existe entre el nivel de desarrollo económico (medido como producción bruta per cápita) y el impacto que este tiene en términos de la calidad ambiental (medida a partir del Índice de Integridad Ecológica), es decir, se busca validar empíricamente la existencia de la curva ambiental de Kuznets a nivel municipal en México. La aportación del estudio radica en tres aspectos fundamentales: el primero es que la CKA no ha sido estudiada previamente a nivel municipal en México; el segundo radica en una innovación de carácter metodológico, ya que por una parte, utiliza variables de medición de calidad ambiental más completas (índice de integridad ecológica) que las tradicionalmente utilizadas (niveles de contaminación atmosférica) y, por la otra, combina modelos econométricos con técnicas de redes neuronales que permiten contrastar los marcos analíticos clásicos con herramientas de aprendizaje automático que capturan patrones no lineales y heterogeneidades complejas en los datos. Por último, el tercer aspecto a destacar es que permite diferenciar ámbitos de acción de la política ambiental; por lado, se destaca la necesidad de priorizar la preservación de municipios con capital natural irremplazable y, por el otro, la urgencia de diseñar instrumentos ambientales diferenciados para municipios en riesgo. De esta forma, la investigación ofrece insumos concretos para la política ambiental en México.

Para alcanzar los objetivos planteados, en la sección posterior a la presente introducción (sección 2) se desarrolla el marco teórico de la CKA y se analizan los estudios que la han analizado a nivel empírico. En la sección 3 se examinan los hechos estilizados como paso previo al desarrollo metodológico. En la cuarta sección se describen las variables a nivel municipal susceptibles de ser analizadas y se desarrollan las metodologías econométricas y de redes neuronales empleadas. En la sección quinta se analizan los resultados y en la sexta y última parte se desarrollan algunas recomendaciones de política ambiental y económica y se ofrecen las conclusiones.

2. Marco teórico y revisión de la literatura

2.1. Marco teórico

La CKA tiene su origen en el trabajo seminal de Kuznets (1955), en donde argumentaba que la desigualdad económica sigue una trayectoria en forma de “U” invertida a lo largo de la senda de desarrollo; aumenta en estadios iniciales de industrialización y disminuye una vez que se consolidan instituciones redistributivas y sectores económicos avanzados (Kuznets, 1955).

Basados en este enfoque, Grossman y Krueger (1995) realizan un traslado de la lógica de Kuznets al ámbito ambiental, argumentando que la contaminación podría seguir una curva similar, donde el deterioro ambiental aumentaría en las fases iniciales del crecimiento económico, producto de los procesos de industrialización intensivos, para disminuir una vez que se consolidan sectores de servicios y tecnológicos que permiten una mayor eficiencia en el uso de recursos y la adopción de

3 Existen algunas consideraciones teóricas y analíticas que es necesario analizar al trasladar el análisis a nivel de municipios; la primera de ellas es que, en los países, los patrones de especialización productiva se determinan por la dependencia de trayectoria, las dotaciones iniciales de recursos, el comercio exterior y el desarrollo de ventajas competitivas, mientras que en los municipios algunos de esos factores pueden no estar presentes o incidir débilmente. La segunda, es que no todos los municipios han transitado por procesos de industrialización. En tercer lugar, muchas de las políticas ambientales son desarrolladas a nivel nacional y estatal, dejando un espacio relativamente estrecho al desarrollo de políticas municipales que pudieran incidir en la mitigación de algunos efectos contaminantes. En cuarto lugar, es mucho más complicado revertir procesos medioambientales de largo plazo como los capturados por el índice de integridad ecológica, que reducir niveles de contaminación atmosférica de corto plazo. Por último, la mayor cercanía geográfica se puede traducir en degradación ambiental y contaminación que no sea resultado del desarrollo industrial de los municipios aledaños a polos industriales.

energías limpias; ello se hace patente tras alcanzar un nivel crítico de ingreso per cápita (Grossman y Krueger, 1995).

Se ha desarrollado una extensa literatura, tanto para países desarrollados como en desarrollo, que identifica los factores que provocan una reducción de los efectos contaminantes; el primero de ellos es mediante cambios en la estructura económica, es decir, a medida que los países generan crecimiento e incrementan su nivel de ingreso, sus economías tienden a transitar de sectores intensivos en recursos (industria pesada, manufactura, industria) hacia sectores de servicios y tecnología, por su naturaleza menos contaminantes, lo que se traduce en una reducción de la intensidad energética y de la carga ambiental que esta genera (Sarkodie y Strezov, 2019; Destek y Sinha, 2020).

El segundo mecanismo es la innovación y el progreso tecnológico, que tiende a ser mayor (y tener una más rápida difusión) en economías de altos niveles de ingreso; las innovaciones vinculadas con el desarrollo de tecnologías verdes, ocurren en países de altos niveles de ingreso. Las curvas de adopción tecnológica (típicamente en forma de "S") tienden a ser menos pronunciadas cuando en las etapas iniciales el ingreso no representa un obstáculo adicional (Pérez, 2010; Ulucak y Khan, 2020). Un tercer mecanismo es la mayor presión social derivada de la evidencia (cada vez más tangible), del cambio climático y otros efectos de la contaminación; de esta forma, el crecimiento del ingreso es acompañado por mayores demandas sociales que impulsan la sostenibilidad, al presionar a los gobiernos a implementar regulaciones ambientales más estrictas (Panayotou, 1993). Es decir, existe una especie de "elasticidad-ingreso de la demanda ambiental", donde el cuidado del medio ambiente se transforma gradualmente en un bien normal (Dasgupta et al., 2002; Ahmed et al. 2022).

Por último, el cuarto mecanismo generalmente descrito en la literatura vinculada corre de forma paralela con el institucionalismo; este enfoque argumenta que países con mayor ingreso suelen tener instituciones más sólidas y transparentes, capaces de diseñar y hacer cumplir políticas ambientales (Díaz y Morales, 2025). Esto incluye agencias reguladoras y sistemas judiciales más eficientes, capaces de implementar instrumentos económicos y de mercado, tales como impuestos al carbono, subsidios a energías limpias y sistemas de comercio de emisiones, internalizando los costos ambientales e incentivando prácticas sostenibles (Sarkodie y Adams, 2020).

De acuerdo con Dasgupta et al., (2002) son 4 los factores que influyen sobre la existencia y forma de la CKA; el primero de ellos, es que la utilidad marginal en el consumo debe ser constante o decreciente; en caso de que la utilidad marginal sea una función creciente del consumo, no habría estabilización y, posteriormente descenso de los contaminantes ya que el cambio tecnológico es fijo en el corto plazo.

La segunda, debe haber desutilidad de la contaminación al aumentar el ingreso ya que una vez satisfechas las condiciones básicas y medias de consumo, las preocupaciones por la salud y la vivienda (al aumentar el riesgo de catástrofes naturales), derivadas de problemas medioambientales aumenta más que proporcionalmente que la utilidad total del consumo.

Por último, el daño marginal de la contaminación es creciente; poca contaminación puede no tener efectos significativos de largo plazo sobre el medio ambiente, en parte, porque la capacidad de carga de los ecosistemas puede absorber bajos niveles de emisiones, pero a medida que la contaminación aumenta, la capacidad de carga ecosistémica se ve comprometida y el daño marginal se vuelve una función creciente de los niveles de contaminación, sobre todo cuando se sobrepasan

umbrales que son irreversibles. Cuando los anteriores elementos se cumplen, la evidencia es controversial y cambia en función de la geografía de estudio, la metodología de análisis y el tipo de contaminante analizado.

2.2. Revisión de la literatura

Algunos estudios realizados para economías desarrolladas (Balsalobre-Lorente et al., 2018) encuentran evidencia de que más que una división en dos etapas (incremento y reducción), existen 3 fases: la primera corresponde a un aumento de emisiones con el crecimiento económico inicial, seguida de una segunda etapa correspondiente a una reducción de emisiones al superar un umbral de ingresos (USD 29,531), y que concluye con una tercera fase en donde reaparecen emisiones ascendentes por obsolescencia tecnológica, efectos de escala y nuevos contaminantes (Balsalobre-Lorente et al., 2018). Por su parte, Shah et al. (2022) hallan la existencia de la CKA inducida por la agricultura en las economías BRICS, potenciada inicialmente por el uso de energía renovable en la agricultura. A pesar de ello, encuentran efectos de relación causal bidireccional entre las emisiones de Dióxido de carbono (CO₂) y el uso de energía renovable, así como entre el CO₂ y el crecimiento en el uso de Tecnologías de Información (TIC).

Para el caso de economías no desarrolladas, Zoundi (2017), analiza 25 países africanos durante el período 1980-2012 y no encuentra evidencia de una validación total de las predicciones de la CKA. Encuentra que las emisiones de CO₂ aumentan con el ingreso per cápita y disminuyen ligeramente a medida que energías renovables son introducidas. Sin embargo, “el impacto de la energía renovable es superado por el consumo de energía primaria tanto a corto como a largo plazo” (Zoundi, 2017, pp. 2). La relación también ha sido analizada para el caso de economías latinoamericanas; Pablo-Romero y De Jesús (2016) analizan 22 economías latinoamericanas para el periodo 1990-2011 y encuentran que la hipótesis de la existencia de una CKA vinculada con factores energéticos no se respalda en el subcontinente. Por el contrario, existe un crecimiento exponencial de contaminantes a medida que aumenta el Valor Agregado Bruto, además, de diferencias significativas entre las economías estudiadas (Romero y De Jesús, 2016).

A pesar de los estudios que encuentran evidencia vinculada con la existencia de la CKA, existe una fuerte crítica a algunos de sus fundamentos teóricos y empíricos que apunta en varias direcciones; por una parte, un conjunto importante de literatura (Rockström et al., 2009; Kaika y Zervas, 2013; Pata, 2021; IPCC, 2021) argumenta que los ecosistemas vistos a nivel global son cerrados, y que parte de la menor tasa de crecimiento de emisiones contaminantes en economías de alto ingreso encuentra su condición de existencia en el incremento de la misma en los países en desarrollo. Ello ha dado origen a la conocida “paradoja del comercio”, en donde los procesos de relocalización geográfica de la producción han permitido el traslado de las actividades industriales a economías en desarrollo, trasladando así, también la contaminación asociada. Ello reduce la huella ecológica de las economías desarrolladas, pero globalmente sigue aumentando (Kaika y Zervas, 2013; Pata, 2021).

Por otra parte, existe una importante crítica desde el punto de vista de la contabilidad de las emisiones que da origen a la CKA, basados en la idea de que no solo la producción genera contaminación, sino también el consumo, proceso que no es contabilizado de manera habitual. Peters y Hertwich (2008), argumentan que los métodos actuales de contabilización de emisiones (destacadamente las de Gases de Efecto Invernadero), presentan problemas como asignación de

emisiones en actividades internacionales (tales como transporte, captura, almacenamiento, etc.) y “fugas de medición”, es decir, cuando los países reducen emisiones domésticas, pero externalizan parte de su producción contaminante a naciones sin regulaciones o con mediciones más laxas. Por ello, el consumo y las actividades internacionales deben ser contabilizadas para distribuir responsabilidades hacia países consumidores, no solo productores.

Una crítica adicional se realiza desde teorías que parten de bases epistemológicas diferentes a las que dan origen a la propia CKA, pero que integran enfoques multidisciplinarios, tales como los de la economía ecológica. Desde autores clásicos como Cobb y Daly, (1994), Martinez-Alier, (2002), y Georgescu-Roegen, (1971), hasta contemporáneos como Shiva, (2015) y Raworth, (2018), han dado forma a un campo interdisciplinario que combina principios de economía, ecología y otras ciencias sociales para abordar problemas ambientales y de sostenibilidad. Basan su análisis en soluciones más allá del mercado desde una perspectiva de umbrales de irreversibilidad de daño ambiental, bajo la idea de que mayores niveles de contaminación se asocian con mayores daños ambientales, y que existe un umbral que una vez traspasado, los daños a los ecosistemas son irreversibles, y una disminución en los niveles de contaminación no revierte los daños generados, debido a los principios de entropía de la física y otros enfoques biológicos. De esta forma, las mediciones empíricas de la CKA tienden a ser más robustas para contaminantes locales (por ejemplo, el SO_2) debido a regulaciones directas, mientras que para CO_2 su validez depende de políticas específicas además del nivel de ingreso. En cualquier caso, incluso en los estudios en los que se argumenta a favor de la CKA, su existencia no es automática, sino que es resultado de intervenciones activas de las instituciones (públicas, privadas y sociales) de las geografías en las que se estudia.

3. Hechos estilizados

México es un país rico en recursos naturales y biodiversidad. Es considerado uno de los 13 países megadiversos, que albergan el 70% de las especies del planeta (CONABIO, 2023). Por ello, es considerado un actor clave en la conservación natural y climática global, pero enfrenta desafíos críticos que requieren tanto de la cooperación internacional como de la adopción de medidas locales. Para dimensionar el grado de conservación de los recursos naturales nacionales, en la presente investigación se utiliza el índice de sustentabilidad, categoría que muestra la magnitud de deterioro o conservación del índice de capital natural⁴ de acuerdo con las siguientes categorías:

- a) Capital natural irremplazable ($\text{ICN} > 0.8$), o capital natural que mantiene intactos procesos ecológico-evolutivos.
- b) Capital natural sustentable ($0.4 > \text{ICN} > 0.8$); donde todavía se producen servicios ecosistémicos de calidad necesarios para el desarrollo sustentable.
- c) Capital natural en riesgo ($0.2 > \text{ICN} > 0.4$) donde el capital natural de una región está a punto de agotarse, y
- d) Capital natural agotado ($\text{ICN} < 0.2$).

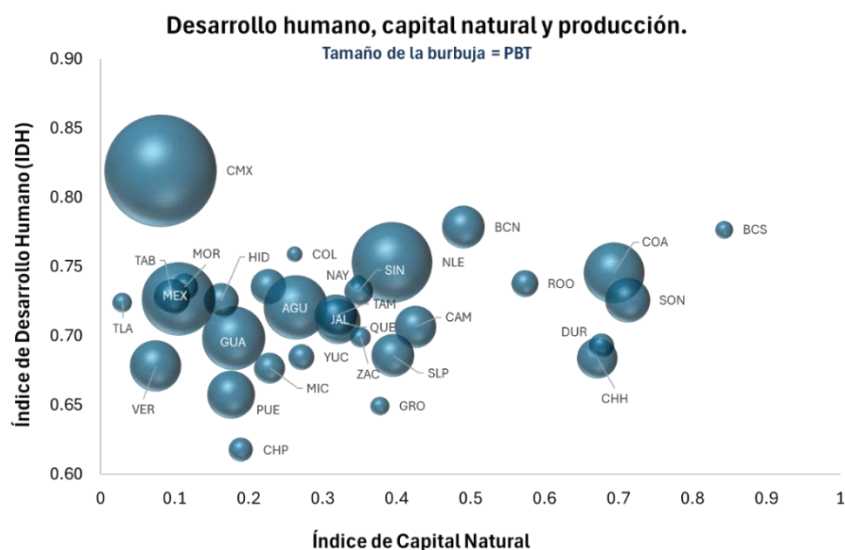
⁴ El Índice de Capital Natural es un indicador sintético que integra el papel de la biodiversidad para mantener a largo plazo procesos ecológico-evolutivos y constituye una aproximación de la biodiversidad terrestre y acuática de los ecosistemas naturales y ecosistemas agrícolas.

Si bien existen algunas regiones (130 de un total de 2437 municipios) con un índice de sustentabilidad catalogado como irremplazable, el 95% se ubica en alguna de las categorías de degradación ambiental. La gráfica 1 relaciona algunas de las variables más relevantes analizadas en este estudio a nivel de estado. El tamaño de la burbuja mide la Producción Bruta Total y, como una primera aproximación de la relación entre desarrollo y degradación ambiental, se muestra la correlación los Índices de Desarrollo Humano y Capital Natural.

Se observa que son principalmente estados del norte del país (Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila y Durango) y Quintana Roo en sur, los que tienen los mayores índices de capital natural y comparten la característica de ser estados con una densidad poblacional relativamente pequeña, lo que contribuye para que el impacto de su actividad económica sea menor en relación con estados más poblados.

Por su parte, buena parte de los estados mayormente industrializados como la CDMX, Estado de México, Puebla y Guanajuato, que cuentan con altos niveles de producción bruta, lo han hecho a costa de agotar o poner en riesgo su capital natural. En ambos grupos de estados, el IDH se distribuye de manera heterogénea, lo que implica que mayores volúmenes de producción no se relacionan de forma directa con mayor bienestar de la población. Con todo ello, el coeficiente de correlación a nivel de estado entre el IDH y el ICN es bajo, del orden de 0.134

Gráfica 1. Relación entre Índice de Desarrollo Humano, Capital Natural y Producción Bruta Total por estado de la República, 2021



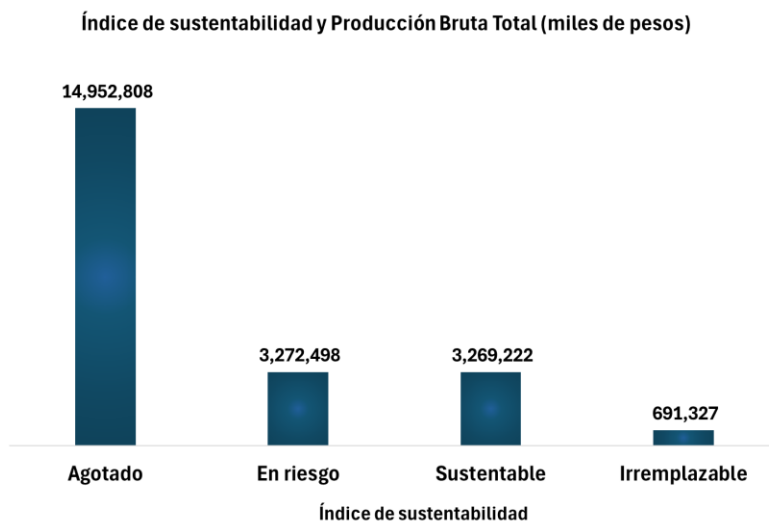
Fuente: Elaboración propia con datos de PNUD, 2025

Pese a que de manera oficial distintos gobiernos de México han reconocido la riqueza natural que el país posee y las amenazas que enfrenta, en la distribución del presupuesto no se manifiesta la preocupación: en 2022 se registró el nivel más bajo de gasto en protección ambiental de la última década, equivalente al 0.7% del PIB (PNUD México, 2024). La reducción continúa en 2025, donde el Ramo 16 enfrenta un recorte del 40% respecto al año anterior, afectando directamente a instituciones clave como CONANP, cuyo presupuesto es ahora dos tercios menor al de 2018 (CEMDA, 2024). Esta caída presupuestaria amplía una brecha financiera crítica. Se estima que México necesita

alrededor de 462 millones de dólares anuales para conservar su biodiversidad, principalmente en restauración, conocimiento y atención a amenazas (UNDP, 2024). Sin embargo, la inversión es seis veces menor que el costo que genera la degradación ambiental, que ya alcanza el 4.11% del PIB (INEGI, 2023). Otra forma de aproximar la relación entre umbrales de ingreso y niveles de sustentabilidad se puede establecer relacionando la producción bruta total con el Índice de sustentabilidad.

De acuerdo con la argumentación relacionada con la existencia de la CKA, mayores niveles de ingreso deberían, pasado cierto umbral, aumentar los niveles de sustentabilidad como resultado de los mecanismos descritos en la sección 2.1. Lo que se observa en la gráfica 2 es que entre mayores son los niveles de producción, mayor es el nivel de degradación ambiental. En otros términos, los municipios que más producen son aquellos que han agotado su capital natural.

Gráfica 2. Producción Bruta Total y niveles de sustentabilidad ambiental en México



Fuente: Elaboración propia con datos de PNUD, 2025.

En donde ese efecto no parece ser tan claro es entre los municipios catalogados como en riesgo y los sustentables, en donde ambos grupos tienen básicamente la misma producción agregada, pero distintos niveles de capital natural, lo que podría ser indicador a nivel municipal de una relación no lineal entre los niveles de degradación ambiental y los niveles de producción.

Si se analiza la producción per cápita se tiene un panorama totalmente distinto (cuadro 1). Si bien, los municipios que tienen condiciones de sustentabilidad natural en riesgo ($0.2 < \text{ICN} < 0.4$) y Sustentable ($0.4 < \text{ICN} < 0.8$) presentan diferencias de producción bruta per cápita a penas de 6%, la diferencia entre los que han agotado su capital natural ($\text{ICN} < 0.2$) y aquellos que lo mantienen intacto ($\text{ICN} > 0.8$) es de más de 135% en favor de este último, lo que parece ser un indicio en favor de la existencia de la curva ambiental de Kuznets. Más aún, la producción per cápita del grupo de menor degradación ecológica es, por mucho, el más alto en relación con cualquier otro grupo de municipios.

Cuadro 1. Integridad ecológica y producción bruta per cápita.

Índice de sustentabilidad	Índice de Capital Natural	Producción bruta per cápita	Índice de Capacidades Funcionales Municipales
Agotado	0.06	\$ 77,673	0.26
En riesgo	0.29	\$ 44,379	0.24
Sustentable	0.58	\$ 41,567	0.22
Irremplazable	0.86	\$ 182,275	0.23

Fuente: Elaboración propia con datos de PNUD, 2025

Por su parte, un hecho en principio contraintuitivo es que las capacidades funcionales de los municipios no parecen ser relevantes para entender la relación propuesta por la CKA; se esperaría, por una parte, que entre mayores sean las capacidades funcionales, menor sea el nivel de degradación ambiental, dado que los municipios poseen mayor capacidad de diagnosticar problemas ambientales, mayor su capacidad para involucrar actores relevantes y mayor su capacidad para desarrollar políticas de mitigación. Por otra parte, las capacidades funcionales tienden a ser mayores en la medida en la que el nivel de desarrollo tiende ser mayor, lo que conlleva a un mayor nivel de degradación ambiental (menor ICN). Este resultado será analizado con mayor detalle en la sección de resultados.

4. Datos y metodología

4.1 Datos

Si bien, una cantidad importante de los estudios que analizan empíricamente la existencia de la CKA (Hove y Tursoy, 2019; Catalán, 2014; Balsalobre-Lorente, 2018; Leal y Marques, 2022) utilizan la cantidad de emisiones de contaminantes como indicador proxy de los niveles de degradación ambiental y sus efectos, un indicador más robusto, en tanto permite medir los efectos ambientales de largo plazo, es el capital natural existente, que permite establecer parámetros de integridad ecológica en función de la salud y funcionalidad de los ecosistemas en relación con su estado natural (Mora, 2019). De esta forma, en la presente investigación se utiliza el índice de integridad ecológica para medir el impacto ambiental y los índices de vulnerabilidad al cambio climático, índice de capacidades funcionales y producción bruta total per cápita para medir los efectos de la producción sobre el medio ambiente y las capacidades para atenderlo.

4.1.1 Definición de variables

El índice de capital natural mide el valor y la salud de los ecosistemas y recursos naturales de un país o región. Evalúa la cantidad, calidad y sostenibilidad del capital natural, e incluye elementos como bosques, suelos, agua, biodiversidad y otros recursos esenciales. Se calcula como el producto de IE por la proporción de las áreas naturales remanentes (superficie en hectáreas), $[ICN = calidad * cantidad = IE * \%área\ natural\ remanente]$, CONABIO (2023), mediante la fórmula:

$$ICN = \sum_{i=1}^n EQi * EAi \quad (1)$$

Donde: EQi y $E Ai$ representan el valor de cada unidad de tierra i

El índice de capital natural es uno de los indicadores de biodiversidad agregados de alto nivel utilizados internacionalmente (Mora, 2019). Por su parte, el índice de capacidades funcionales (ICFM) es un indicador compuesto que mide el grado de desarrollo de cinco capacidades en las administraciones públicas municipales. Se calcula mediante el promedio ponderado de sus cinco subíndices, que son i. Capacidades para involucrar actores relevantes, ii. Capacidades para diagnosticar, iii. Capacidades para formular políticas y estrategias, iv. Capacidades para presupuestar, gestionar e implementar y v. Capacidades para evaluar, PNUD (2024).

La Producción Bruta Total (PBT) se refiere al valor de todos los bienes y servicios producidos o comercializados por la unidad económica como resultado del ejercicio de sus actividades y valora a los bienes y servicios a precios productor (INEGI, 2024).

4.2. Metodología

En su planteamiento más general, la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets plantea que a medida que las economías crecen, hay un proceso igualmente acelerado de contaminación ambiental; sin embargo, el proceso de desarrollo económico se acompaña de mejoras tecnológicas, del fortalecimiento de capacidades institucionales, y de una mayor conciencia de parte de los agentes, por lo que, alcanzado cierto umbral de ingreso por habitante, la tendencia creciente de la contaminación se revierte.

De esta forma, la relación esperada entre mayores niveles de producción por habitante y el deterioro ambiental (en nuestro caso, integridad ecológica) no es lineal, sino que presenta la forma:

$$IIE = f(PBpc) \quad (2)$$

De tal forma que:

$\partial IIE / \partial PBpc < 0$ para niveles bajos de $PBpc$

$\partial IIE / \partial PBpc > 0$ para niveles altos de $PBpc$

Así, para capturar la no linealidad de la CKA se estima un modelo polinomial de segundo grado, y se incorpora el papel de la variable del índice de capacidades funcionales municipales para capturar el efecto de variables institucionales sobre la integridad ambiental; así la forma funcional general es:

$$IIE = \beta_0 + \beta_1 PBpc + \beta_2 (PBpc)^2 + \beta_3 ICFM + \beta_4 (Pobla) + \varepsilon \quad (3)$$

Donde:

IIE Es el índice de integridad ecológica

$PBpc$ Es la Producción bruta per cápita

$ICFM$ Es el Índice de Capacidades funcionales municipales

$Pobla$ Es la población a nivel de municipio.

Se estimó el modelo correspondiente a la ecuación 3, y otro con una transformación logarítmica (ecuación 4); este tipo de transformaciones suelen llevarse a cabo en los modelos ambientales en virtud de que, entre otras cosas, reduce la asimetría de los datos, permite interpretar

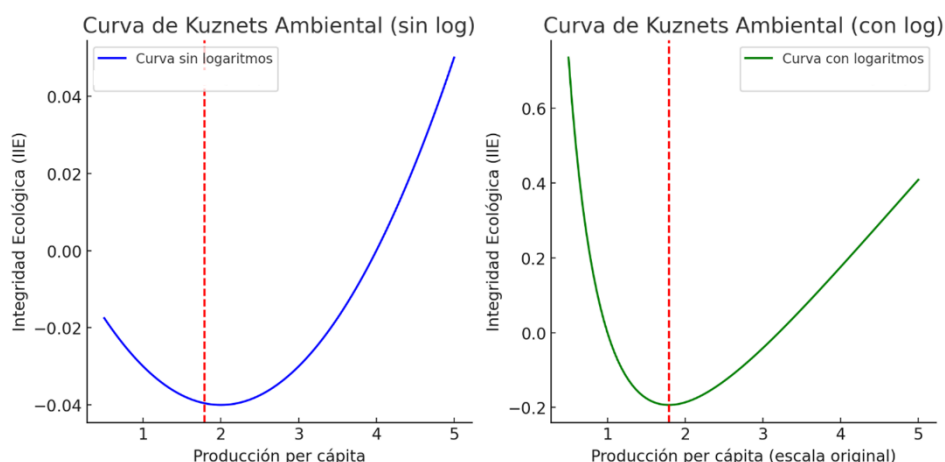
los coeficientes en términos de elasticidades y, al evitar valores negativos mejora la estabilidad numérica de los modelos de regresión.

Así, la transformación logarítmica de las variables anteriormente descritas queda:

$$IIE = \beta_0 + \beta_1 \log \log (PBpc) + \beta_2 (\log \log (PBpc))^2 + \beta_3 ICFM + \beta_4 \log (Pobla) + \varepsilon \quad \dots (4)$$

La comparación de las gráficas derivadas de las ecuaciones 3 y 4 se muestran en la gráfica 3.

Gráfica 3. Comparación de modelos con y sin logaritmos.



Fuente: Elaboración propia con datos del PNUD, 2025.

Como se puede apreciar en el panel izquierdo de la gráfica 3 (gráfica sin logaritmos) en la escala del eje de las ordenadas, el modelo genera predicciones muy planas y con muy poca varianza; por su parte, en el panel derecho el eje “Y” está en un rango compatible con los valores reales del IIE, lo que indica que el modelo capta mejor la dinámica ecológica. Adicionalmente, el comportamiento de la curva se ajusta mejor para mostrar la existencia de un fuerte y creciente deterioro cuando los niveles de producción per cápita son bajos, y, posteriormente, se sigue de una recuperación más clara conforme aumenta la producción. Ahora bien, en nuestro caso, si $\beta_1 < 0$ y $\beta_2 > 0$, es posible estimar el punto de inflexión, es decir, donde la calidad ambiental comienza a mejorar (máximo de la curva) derivando la función:

$$\frac{d(IIE)}{d(\log PC)} = \beta_1 + 2\beta_2 \log PC = 0 \quad (5)$$

Despejando:

$$\log PC = -\frac{\beta_1}{2\beta_2}$$

$$PC = e^{-\frac{\beta_1}{2\beta_2}}$$

Donde PC es el nivel de producción per cápita en el que se alcanza el peor nivel de integridad ecológica antes de mejorar. Cabe destacar que si bien, se pueden estimar modelos alternativos que consideren a la Producción Bruta Total (PBT) por municipio (en lugar de la producción bruta per cápita), la naturaleza de los datos tiende a generar un sesgo en favor de los municipios grandes, independientemente de su nivel de vida o densidad poblacional, mientras que el modelo estimado

con producción bruta per cápita se alinea con la lógica original de la CKA, que relaciona ingreso medio con degradación o mejora ambiental.

Para validar la hipótesis de la CKA, se deben cumplir las siguientes condiciones en términos de los coeficientes estimados del modelo:

$$\beta_1 < 0, \text{ y } \beta_2 > 0$$

Es decir, en nuestro caso, dado que trabajamos con niveles de integridad ecológica y no con niveles de contaminación, el coeficiente estimado de la producción bruta per cápita (β_1) debe ser negativo, lo que implica que a medida que la producción crece, la integridad ecológica tiende a ser menor, mientras que $\beta_2 > 0$, implica que, pasado cierto umbral, incrementos adicionales en la producción aumentan la integridad ecológica. De esta manera, en nuestro caso la forma estimada de la CKA es una “U”, y no una “U” invertida. Por su parte, se esperaría un coeficiente de capacidades funcionales municipales $\beta_3 > 0$, debido a que entre mayores son las capacidades de diagnóstico, evaluación, involucramiento con actores relevantes, formulación de políticas y estrategias, así como de gestión e implementación de esas políticas, el crecimiento se acompañe de mejores instituciones y, por lo tanto, de mejores políticas ambientales. La variable poblacional tiene un signo esperado negativo debido a que municipios más grandes pueden tener una mayor presión ambiental como resultado de procesos de urbanización, infraestructura o generación de residuos. La incorporación de esta variable permite estimar por separado el efecto del crecimiento económico (producción bruta) del efecto del tamaño del municipio.

4.3. Modelo de Red Neuronal Artificial

En términos metodológicos el presente estudio estima una Red Neuronal Artificial (RNA) con la finalidad de complementar el análisis econométrico, en virtud de que las redes neuronales permiten capturar relaciones no lineales y patrones complejos que los modelos polinómicos tradicionales (como el propuesto para la CKA) podrían no detectar o imponer de forma rígida. Si bien, el análisis econométrico permite interpretar coeficientes y validar hipótesis teóricas bajo supuestos estructurados, el análisis de RNA ofrece una herramienta flexible para explorar la importancia de las variables, identificar puntos de inflexión aprendidos directamente desde los datos y mejorar la capacidad predictiva del modelo, sin algunas de las restricciones que imponen los supuestos sobre la forma funcional o la independencia de errores. Esta complementariedad entre econometría y RNA permite contrastar estructuras teóricas y robustecer los resultados mediante análisis comparativo (Huang y Yang, 2017; Duygun et al., 2018). Las RNA intentan simular el proceso de aprendizaje del cerebro humano y se encuentran constituidas por 3 componentes; capa de entrada (compuesta por las variables que independientes), capa oculta (estructura en donde se genera el proceso de aprendizaje de las neuronas) y capa de salida (constituida por la variable a estimar, en nuestro caso el IIE). La forma específica en la que se encuentran estructurados esos tres componentes, se denomina arquitectura de red, que en el caso de la presente investigación es una de tipo Perceptrón Multicapa. De esta forma, las funciones de la capa de entrada, capa oculta (procesamiento) y capa de salida, respectivamente, serán:

$$\text{Capa de entrada: } \sum_j w_{ij}x_j - m_i \quad (6)$$

$$\text{Capa oculta: } a_j^1 = \sum_l W_{jl}^1 X_l + \theta_j^1; \quad h_j = f^1(a_j^1) \quad (7)$$

$$\text{Capa de salida: } a_j^2 = \sum_l W_{jl}^2 X_l + \theta_j^2; \quad h_j = h^2(a_j^2) \quad (8)$$

Mientras que el proceso de entrenamiento de la neurona (proceso de aprendizaje a partir de la información y la forma en la que se estructura en capas y unidades) (Tavana et al., 2016), viene dado por las funciones:

$$J(W_0) \geq J(W)$$

$$J(W_{n+1}) \geq J(W_n)$$

$$W_{n+1} = W_n - \mu \frac{1}{2} \nabla J_w | W_n = W_n - \frac{\mu}{2} \frac{\partial J_w}{\partial w} | w_n \quad (9)$$

$$E_D(w) = \frac{1}{2} \sum n \sum i ((t_i^{(n)} - y_i(x^{(n)}; w))^2 \quad (10)$$

Por último, un proceso útil dentro de la metodología de RNA, consiste en poder evaluar la jerarquía o importancia del impacto que tienen las variables independientes (capa de entrada) sobre la variable dependiente (capa de salida). Si bien, los modelos de red como el estimado en esta investigación son altamente eficaces para capturar relaciones complejas y no lineales entre variables, no ofrecen interpretaciones directas de sus parámetros (como sí lo hace el modelo econométrico). Una forma de superar esta limitación es a través del análisis de la importancia de la variable (ecuación 11), que permite construir jerarquías indicativas de los factores que son más importantes en la predicción del resultado. Ello es especialmente importante en modelos explicativos e interpretativos, y no sólo predictivos, como en este caso.

$$Q_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^L (\frac{W_{ij} V_{jk}}{\sum_{r=1}^N W_{rj}})}{\sum_{i=1}^N (\sum_{j=1}^L (\frac{W_{ij} V_{jk}}{\sum_{r=1}^N W_{rj}}))} \quad (11)$$

5. Resultados y discusión

El cuadro 2 muestra los estadísticos descriptivos de las variables utilizadas en el modelo, mientras que la gráfica 4 muestra los histogramas de frecuencia. Se observa que, para un conjunto amplio de municipios, las variables de integridad ecológica y de capacidades funcionales se encuentran distribuidos en torno a valores inferiores, mientras que el logaritmo de la producción bruta per cápita de distribuye de forma relativamente normal.

Cuadro 2. Estadísticos descriptivos de variables Integridad Ecológica, Log Producción Bruta Per cápita y Capacidades funcionales.

Estadísticos		Variables			
		Índice de Integridad Ecológica	log_PC	Índice de Capacidades Funcionales	Población
Media		.285	9.50	.244	9.49
95%Intervalo de confianza para la media	Límite inferior	.275	9.44	.238	9.42
	Límite superior	.296	9.56	.250	9.55
Media recortada al 5%		.269	9.45	.235	9.46

Mediana	.212	9.33	.230	9.52
Varianza	.069	2.53	.020	2.54
Desviación estándar	.262	1.59	.143	1.59
Valor mínimo	.000	4.08	.000	4.73
Valor máximo	.952	16.11	.914	14.47

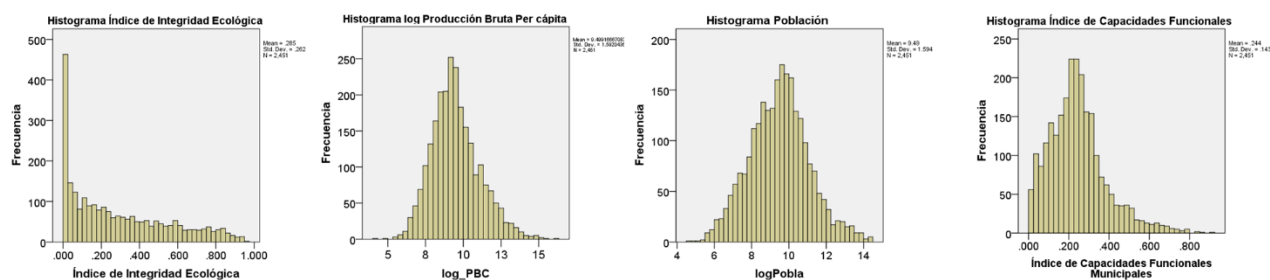
Fuente: Elaboración propia con datos del PNUD, 2025

El IIE promedio en los municipios es de 0.285. Esto sugiere que, en promedio, los municipios tienen una integridad ecológica baja, cercana al rango de Capital Natural en Riesgo, es decir, $0.2 < IIE < 0.4$. El intervalo de confianza (IC) indica poca dispersión en torno al promedio, lo que refleja consistencia en este bajo nivel de conservación ambiental entre municipios. Por su parte, el ICFM promedio es 0.244, lo que indica un nivel bajo de desarrollo de capacidades institucionales en la gran mayoría de los municipios. Este nivel bajo coincide con la baja integridad ecológica promedio, y podría estar reflejando que los municipios con menor capacidad de gestión institucional enfrentan mayores problemas en el cuidado y preservación del medio ambiente.

Si bien, las variables Producción Bruta Per Cápita y Población se encuentran en logaritmos para interpretación de los indicadores del modelo, aquí se describen en pesos y habitantes; el promedio por municipio de la primera variable es \$76,026 pesos anuales por persona, pero con una alta dispersión de la variable en función del tamaño de municipio y de su actividad económica. Ello se observa cuando se eliminan los outliers (el 5% de los municipios de mayor y menor producción bruta per cápita) y la media cambia a \$27,954.

Por último, similar al caso de la producción, hay alta dispersión en la población de los municipios; aquellos que son muy grandes que elevan la media general, ya que la media recortada es considerablemente menor. Dadas las dispersiones de ambas variables, el uso de logaritmos en el modelo resulta adecuado. Más allá de ello, el grado de dispersión de ambas variables indica que existe heterogeneidad en las características socioeconómicas y demográficas de los municipios, lo cual es importante para interpretar la CKA y las presiones ambientales considerando las diferencias de los municipios. La gráfica 4 muestra de manera detallada la dispersión de las variables utilizadas en el estudio.

Gráfica 4. Histogramas de frecuencia Integridad Ecológica, Producción Bruta Per cápita y Capacidades funcionales



Fuente: Elaboración propia con datos del PNUD, 2025

El cuadro 3 muestra los resultados de la estimación de la ecuación 4 (que denominamos, modelo A) con la incorporación de las variables capacidades funcionales y población para verificar si la relación producción-integridad ambiental sigue la forma propuesta por la CKA con factores atenuantes. El coeficiente β_1 es lineal y se asocia al nivel de producción per cápita, mientras que β_2 captura el efecto cuadrático de la curva y β_3 el efecto de las capacidades funcionales y β_4 el efecto del tamaño de la población.

Cuadro 3. Resultados del Modelo estimado (Modelo A)

Resumen del Modelo Ab

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Cambio en estadísticos		Durbin-Watson
				Cambio en F	Sig. Cambio en F	
.271a	.073	.072	.252780	48.404	.000	1.271

a. Predictors: (Constant), logPobla, Índice de Capacidades Funcionales Municipales, log_PC2, log_PC

b. Dependent Variable: Índice de Integridad Ecológica

Coefficientes Modelo Aa

Modelo A		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
A	(Constant)	1.129	.136		8.280	.000
	log_PC	-.091	.027	-.552	-3.311	.001
	log_PC2	.005	.001	.606	3.639	.000
	Índice de Capacidades Funcionales Municipales	-.009	.039	-.005	-.226	.821
	logPobla	-.047	.004	-.283	-11.919	.000

a. Dependent Variable: Índice de Integridad Ecológica

Fuente: Elaboración propia con resultados del modelo estimado con datos de PNUD, 2025

La estimación muestra una bondad de ajuste baja, lo que indica que la integridad ecológica es un fenómeno que va más allá de factores estrictamente vinculados con el nivel de producción. El modelo es estadísticamente significativo en su conjunto (Prob F= 0.00), sin embargo, el valor del estadístico Durbin Watson indica la probable existencia de autocorrelación serial de los errores. El coeficiente β_1 , que muestra la relación lineal de la producción bruta con la integridad ecológica es negativo y estadísticamente significativo, hecho que se encuentra en sintonía con lo esperado teóricamente en la curva ambiental de Kuznets (a mayor producción, menor integridad ecológica) y con lo señalado en algunos estudios (Shahbaz, et al., 2013; Mahmood, et al., 2023; Wang, Zhang y Li, 2023).

Por su parte, el coeficiente β_2 , que muestra la relación cuadrática de las mismas variables, es positivo y estadísticamente significativo, lo que, nuevamente en concordancia con lo esperado

teóricamente en la CKA, implica que superado cierto umbral de producción per cápita, se activan ciertos mecanismos que mejoran la integridad ambiental a medida que la producción crece marginalmente, lo anterior es validado con lo señalado por Zhang y Yan (2022). Al respecto, Bettarelli, et al., (2025) mencionan que dentro de dichos mecanismos se encuentran los impuestos sobre el carbono y sistemas de comercio de emisiones los cuales aplanan y disminuyen los efectos de la CKA.

Por su parte, el coeficiente β_3 es negativo, hecho en principio, contraintuitivo en función de que se esperaría que mayores capacidades funcionales de los municipios fueran acompañadas de mejoras en la gestión ambiental. Sin embargo, la variable no resulta ser estadísticamente significativa.

Finalmente, el signo del coeficiente poblacional es negativo y estadísticamente significativo, lo que implica que a medida que los municipios tienden a ser más grandes, enfrentan mayores problemas ambientales, con independencia del valor de su producción y las capacidades funcionales de sus gobiernos locales. Ello confirma que el tamaño del municipio tiene un efecto ambiental de importancia en la medida en la que los municipios más poblados, incluso si tienen un nivel de producción bruta per cápita muy similar, tienden a presentar menores IIE (mayores niveles de degradación ambiental). En línea con este hallazgo, Huang et al., (2023) mencionan que la densidad de población es de las variables más impactantes en términos de integridad ecológica.

En su aplicación más general, la estimación muestra que la hipótesis del modelo de Kuznets se cumple en el caso de México; sin embargo, dados los hechos estilizados analizados en la sección 3, esto parece ser un hecho, cuando menos, no esperado, si se analizan las gráficas 1 y 2, en donde mayores niveles de ingreso (dentro del IDH) y de producción están claramente asociados con menor integridad ambiental.

Esto puede explicarse debido a que, si la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets se cumple, es debido a que existen municipios con altos niveles de integridad ambiental y alta producción por habitante. De esta forma, catalogando a los municipios que cumplen con ambas características, se tiene que existe un subconjunto pequeño de municipios considerados con un IIE de capital natural irremplazable y con producción per cápita por encima del promedio nacional. Sin embargo, dada la alta dispersión de la variable producción, este subconjunto de municipios elevan fuertemente el valor promedio de la producción bruta per cápita de los municipios con capital natural irremplazable ($IIE > 0.8$), lo que parece generar ese efecto.

Con la finalidad de contrastar si ese es el efecto que provoca que la curva ambiental de Kuznets se cumpla, se corrió un nuevo modelo sin incluir a los municipios considerados con capital natural irremplazable y con un nivel de producción superior a \$76,026. A este modelo lo denominamos modelo B5. Los resultados se muestran en el cuadro 4.

5 De total de municipios para los cuales se dispone de información, menos del 5% es considerado con capital natural irremplazable, de los cuales, solo 30 los municipios que tienen un $IIE > 0.8$ y una $PBpC > \$76,026$; estos son principalmente municipios del norte del país, concretamente, de los estados de Baja California Sur, Coahuila, Chihuahua, Durango, Sonora, Zacatecas y Oaxaca. Los municipios son: Loreto, La Paz, Mulegé, Los Cabos, Ascensión, Jiménez, Ocampo, Múzquiz, Parras, Cuatro Ciénegas, Acuña, Escobedo, Ocampo, Sierra Mojada, Ramos Arizpe, San Dimas, Tlahualilo, Otáez, San Pedro Totolápan, Puerto Peñasco, Agua Prieta, Nogales, Cumpas, Cucurpe, Cananea, Sahuaripa, Banámichi, Santa Cruz, Nacoziari de García, Mazapil.

Cuadro 4. Resultados del Modelo estimado (Modelo B)

Resumen del Modelo Bb

R	R cuadrado	R cuad. ajustado	Error estándar de la estimación	Cambio en estadísticos		Durbin-Watson
				Cambio en F	Sig. Cambio en F	
.232a	.054	.052	.224516	33.018	.000	1.372

a. Predictors: (Constant), logPobla, Índice de Capacidades Funcionales Municipales, log_PC2, log_PC

b. Dependent Variable: Índice de Integridad Ecológica

Coefficientes Modelo Ba

Modelo B		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
B	(Constant)	0.750	.128		5.841	.000
	log_PC	-.037	.026	-.253	-1.442	.149
	log_PC2	.002	.001	.239	1.361	.174
	Índice de Capacidades Funcionales Municipales	-.020	.036	-.012	-.558	.577
	logPobla	-.032	.004	-.218	-8.720	.000

a. Variable dependiente: Índice de Integridad Ecológica

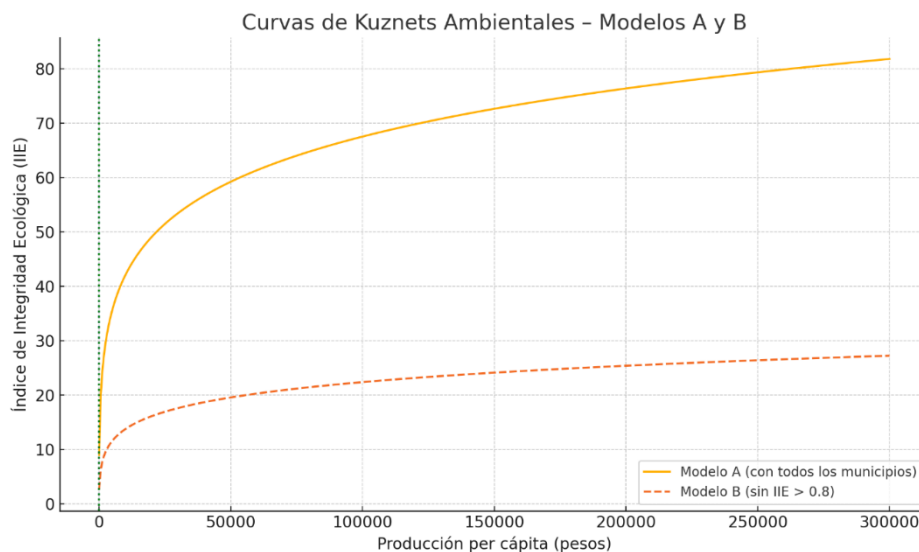
Fuente: Elaboración propia con resultados del modelo estimado con datos de PNUD, 2025

Los resultados indican que el modelo es globalmente significativo ($p < 0.001$), aunque su poder explicativo es por demás limitado ($R^2 \approx 5.4\%$); Por su parte, el estadístico Durbin-Watson indica evidencia de autocorrelación positiva moderada en los residuos del modelo. En lo individual, las variables vinculadas a la producción bruta per cápita, tanto en el término lineal como cuadrático, si bien mantienen los signos esperados, dejan de ser estadísticamente significativas (Sig. $P = 0.149$ y 0.174 , respectivamente), lo que implica que, si no se considera a los municipios con IIE irremplazable, no hay evidencia de una relación en forma de U entre ingreso y calidad ambiental. La variable ICFM muestra, nuevamente, un signo contrario al esperado y no es estadísticamente significativa.

La única variable que en este modelo es significativa en términos estadísticos, es el logaritmo de la población; el coeficiente negativo sugiere que, controlando por ingreso e institucionalidad, los municipios más poblados presentan menor integridad ecológica. Dicho hecho se valida con la literatura que señala como un indicador de integridad ecológica a la baja densidad de población (Hannah, Carr, and Lankerani, 1995; Allan et al., 2017; Jacobson, 2019). Lo anterior, implica que cuando se deja de considerar el pequeño conjunto de municipios con un IIE irremplazable y un nivel de producción bruta per cápita superior a \$67,000, la forma de la curva de Kuznets ambiental desaparece: ni el ingreso ni su cuadrado tienen relación significativa con la integridad ecológica. Esto

hecho sugiere que la relación ingreso-ambiente en el caso de los municipios de México, solo se observa cuando se incluyen municipios con altos niveles de capital natural. Sin ellos, el vínculo desaparece.

Gráfica 5. Estimación de la CKA



Fuente: Elaboración propia con resultados del modelo estimado con datos de PNUD, 2025

La gráfica 5 muestra los resultados de la estimación de ambos modelos; se puede apreciar que en el modelo A, que incluye la totalidad de los municipios, la curva cambia abruptamente de pendiente a partir del punto de quiebre, lo que indica que pasado cierto nivel de producción (cercano a una producción bruta de \$76,000 por habitante) la degradación ambiental se atenúa significativamente a medida que crece la producción. Esa relación desaparece para el caso de la estimación del modelo B (línea punteada). Si bien, los resultados son relativamente robustos en términos de la comparativa, existen dos puntos débiles en los modelos econométricos estimados; el primero, que su poder explicativo reflejado en el coeficiente R^2 es bajo (entre 7 y 5%, respectivamente). El segundo, que el valor del estadístico Durbin-Watson muestra, en ambos casos, evidencia de autocorrelación positiva en los residuos del modelo, aunque si bien, moderada.

En el primer caso, si bien se reconoce la baja capacidad explicativa (R^2), el modelo planteado y su correspondiente aplicación econométrica busca identificar una estructura teórica, más que una herramienta predictiva⁶. En cualquier caso, el modelo B permite dar cuenta de que no se cumple la relación propuesta por la CKA para el 98% de los municipios en México (al menos no con la especificación cuadrática propuesta por Kuznets).

⁶ Los modelos econométricos estimados han posibilitado la validación empírica de las relaciones entre las variables, fundamentadas en la teoría. Ello ofrece la ventaja de una interpretación clara y parsimoniosa, siempre que la relación entre las variables sea la prevista por el modelo. No obstante, el bajo poder explicativo y la pérdida de significancia del modelo B, se pueden explicar porque se elimina el subconjunto de municipios que, aunque pequeño, representan la evidencia empírica más clara de la relación propuesta por la CKA. Estadísticamente, esto genera dos efectos; por una parte, al remover municipios con valores extremos y bien definidos de IIE, el modelo econométrico pierde poder explicativo, ya que desaparece la cola descendente de la curva. Por otra parte, se vuelve mucho más clara la heterogeneidad residual ya sin el efecto distorsionador de los municipios con $IIE > 0.8$ y $PBpc > 67.026$, lo que permite analizar la verdadera relación entre las variables de integridad ecológica y producción, que no siguen un patrón consistente para el resto de los municipios.

En línea con lo antes expuesto, estudios a nivel municipal como el realizado por Ercolano et al., (2018) muestran, al igual que como se evidencia para México, en la región italiana de Lombardía, la CKA puede observarse empíricamente a nivel municipal, aunque solo algunos municipios cruzan el umbral de ingreso per cápita requerido para revertir el aumento de residuos.

Ello puede ser resultado de dos factores; por un lado, que la relación entre las variables dependiente e independientes puede, en el caso de los municipios en México, estar mejor capturada por una forma funcional distinta a la propuesta, o bien, que las variables explicativas no se relacionan de manera estrecha con el índice de integridad ecológica.

En ambos casos, una manera de validar la relación que es utilizada en diversos estudios (Bennedsen et al., 2020; Bennedsen et al., 2023; Sun et al., 2024), es mediante la estimación de una Red Neuronal Artificial (RNA). Ello, ofrece la ventaja de adaptarse a modelar relaciones funcionales complejas, es decir, puede capturar patrones ocultos, interacciones y efectos no lineales más complejos que una parábola como la estimada en el modelo econométrico. Adicionalmente, soluciona el problema de independencia lineal de errores (Durbin-Watson), ya que en las RNA los errores no se asumen independientes o normalizados, sino que se minimizan directamente de la función de pérdida sin supuestos sobre los residuos.

Así, dado que el objetivo es comparar la capacidad predictiva del modelo (R^2 vs error relativo) y evaluar la importancia relativa de las variables, el modelo de RNA puede funcionar como complemento (no como sustituto) del modelo econométrico estimado.

De esta forma, se estima un modelo de RNA a partir de las variables utilizadas en la especificación econométrica. La red neuronal estimada fue un perceptrón multicapa (MLP), con una capa oculta de seis neuronas y función de activación tangente hiperbólica, optimizada mediante retropropagación. Se utilizó el 100% de los datos para entrenamiento, dada la exclusión automática de casos en la muestra de prueba durante la segmentación inicial (cuadro 5).

Cuadro 4. Resultados de estimación de RNA

A. Resumen de procesamiento de casos

		N	Porcentaje
Muestra	Entrenamiento	2451	100.0%
Valido		2451	100.0%
Excluidos		5	
Total		2456	

B. Información de la red

Capa de entrada	Factores	1	log_PC
		2	log_PC2
		3	ICFM
		4	log_Pobla
	Número de unidadesa		7812
Capa oculta(s)	Número de capas ocultas		1
	Número de unidades en la capa oculta 1a		6

	Función de activación		Tangente hiperbólica
Capa de salida	Variables dependientes	1	Índice de Integridad Ecológica
	Número de unidades		1
	Método de reescalado para las variables independientes		Estandarizados
	Función de activación		Identidad
	Función de error		Suma de cuadrados

a. Excluyendo unidad de sesgo

C. Resumen del modelo

Entrenamiento	Suma de errores al cuadrado	67.346
	Error relativo	.055
	Regla de parada utilizada	Número máximo de épocas (100) excedido

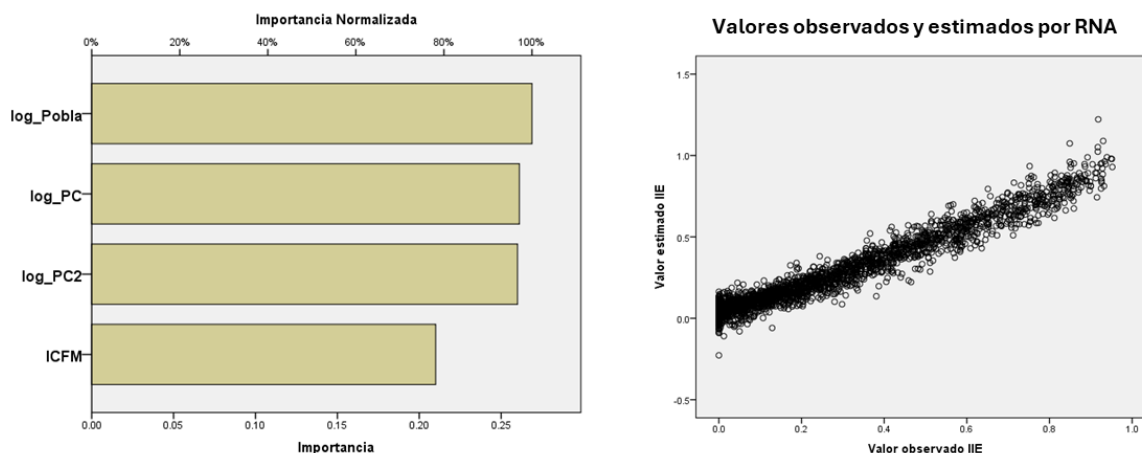
Variable dependiente: Índice de Integridad Ecológica

Los resultados muestran una mejora significativa en la capacidad de ajuste respecto al modelo econométrico. En particular, el error relativo del modelo neuronal fue de apenas 0.055, lo que sugiere que la red logra explicar más del 94% del comportamiento observado del Índice de Integridad Ecológica (IIE), frente al 5% - 7% explicado por los modelos econométricos. Este resultado indica que, si bien el modelo econométrico ofrece una estructura teórica interpretable y parsimoniosa, la RNA permite capturar relaciones no lineales más complejas y adaptativas, elevando significativamente la capacidad predictiva.

Complementariamente se realizó la estimación un análisis de la importancia de las variables independientes, que confirma algunos patrones ya observados en el modelo econométrico, si bien, con ponderaciones matizadas. La variable más importante en la estimación del modelo fue el logaritmo de la población municipal. Este resultado es particularmente relevante, incluso en el contexto teórico de la curva de ambiental de Kuznets, ya que una buena parte de las estimaciones empíricas analizadas en la revisión de la literatura no están mediadas por la variable de tamaño poblacional de las regiones (principalmente países) al momento de realizar las estimaciones.

Por su parte, las variables de logaritmo de la producción per cápita y su cuadrado siguen en términos de la importancia para explicar el IIE, lo que respalda la existencia de una curvatura tipo Kuznets no lineal. En sintonía con la estimación econométrica, el ICFM que no fue estadísticamente significativo en ninguno de los dos modelos estimados, muestra en la RNA la menor importancia relativa, lo que sugiere que su efecto puede ser más contextual o se encuentra mediado por otras variables. La estimación de la RNA es cercana a los valores observados de IIE, excepto en algunos casos en donde estima valores superiores a 1 o por debajo de 0 (menos del 2% de los casos). Tanto el análisis de la importancia de la variable como la dispersión de valores observados y estimados pueden apreciarse en la gráfica 8.

Gráfica 6. Análisis de la importancia de la variable y estimación del modelo por RNA



Fuente: Elaboración propia con resultados del modelo de RNA estimado.

De esta forma, la estimación mediante RNA refuerza los hallazgos obtenidos mediante el modelo econométrico y permite mejorar la capacidad predictiva respecto a aquellos. Ambos modelos sugieren que relación entre producción y medio ambiente es altamente no lineal y sensible a la estructura demográfica del municipio. Además, al no depender de supuestos sobre independencia de errores y otras restricciones de modelos econométricos, refuerza su utilidad como herramienta complementaria en contextos de alta heterogeneidad territorial y complejidad ecológica.

5.1. Factores atenuantes del impacto ambiental y la importancia de su desarrollo

Si bien, muchos de los factores que promueven el crecimiento económico tienen un carácter local, las soluciones ambientales y sus beneficios poseen alcances globales, y su implementación requiere de un esfuerzo coordinado. De esta forma, el papel que la asistencia y el financiamiento de la comunidad internacional juega para lograr la transición propuesta por la CKA es fundamental. En esa dirección, las finanzas climáticas han sido señaladas como una herramienta clave para la obtención de recursos necesarios en países en desarrollo para mitigar los efectos del cambio climático y adaptarse a los crecientes retos y desafíos que dicho fenómeno entraña. Dentro de los principales mecanismos existentes se encuentran los recursos provenientes de fuentes públicas: Bancos Nacionales de Desarrollo, Instituciones Multilaterales y Acuerdos Bilaterales. Estos recursos son distribuidos a través de instituciones bilaterales y multilaterales, y su seguimiento se lleva a cabo por medio de los sistemas de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y los mecanismos de monitoreo establecidos por la OCDE (Benavides et al., 2022; Pérez Báez et al., 2023). Donaciones, créditos blandos y seguros especializados son algunas de las herramientas utilizadas para impulsar proyectos en países de menor ingreso.

Dado el tamaño del reto y la gran emergencia climática, los recursos públicos no han sido suficientes para cubrir todas las necesidades. Así, se ha señalado que la participación del sector privado es clave, por lo que, se han desarrollado mecanismos de movilización directa de capital privado a través de la instrumentación de vehículos financieros (garantías, seguros, donaciones, etc.)

que hacen más seguros y rentables los proyectos relacionados con las actividades de mitigación y adaptación climática (Molinari y Val, 2024). Asimismo, la creciente concientización, la gestión de riesgo climático y la anticipación a cambios en la regulación financiera y al reporte de información ambiental y social, han promovido el crecimiento del mercado financiero sostenible, aumentando el volumen de emisión de bonos verdes, acciones que participan en índices ASG (con criterios ambientales, sociales y de gobernanza), contracción de créditos verdes y de proyectos de innovación verde y climática financiados a través de capital de riesgo (Banxico e Inquiry, 2020).

De la mano con el proceso de ecologización del sistema financiero, se encuentra la innovación climática que incorpora tecnologías disruptivas (Blockchain, Big Data, IoT y Machine Learning) a las actividades como gestión inteligente del agua, optimización de sistemas energéticos, la vigilancia de la biodiversidad, prevención de desastres naturales, anticipar posibles escenarios de riesgo y descubrir relaciones entre variables económicas, sociales y climáticas (WEF, 2023 y Hang, Xiang y Hua, 2024). El uso de tecnologías de frontera, el fortalecimiento de capacidades técnicas, operativas y administrativas a nivel institucional, la coordinación intergubernamental y el acceso a diversos mecanismos financieros, pueden apalancar las estrategias de conservación biológica, permitiendo garantizar la preservación de los recursos en combinación con un desarrollo económico y social.

6. Conclusiones

Los resultados empíricos de esta investigación muestran que la existencia de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) a nivel municipal en México no es generalizada ni automática, sino que se encuentra condicionada por la presencia de un subconjunto reducido de municipios con altos niveles de capital natural y producción bruta por habitante. En efecto, cuando se incluyen en el análisis los municipios que cuentan con un Índice de Integridad Ecológica alto (superior a 0.8 o de capital natural irremplazable) y niveles de producción per cápita superiores al promedio nacional (modelo A), se valida la forma típica propuesta por la teoría de la CKA: en una fase de expansión económica, que corresponde con niveles bajos de producción, se observa una degradación acelerada de la integridad ecológica a medida que aumenta la producción per cápita; posteriormente, una vez trascendida esa etapa, sigue una fase de recuperación ambiental después de superar un punto de quiebre.

Sin embargo, al excluir a los municipios de capital natural irremplazable (que representan menos del 5% del total nacional) la forma de la curva desaparece. El modelo estimado (Modelo B) no arroja relaciones estadísticamente significativas entre ingreso e integridad ecológica. Esto sugiere que el cumplimiento aparente de la CKA en el modelo general (Modelo A) está fuertemente influido por estos pocos municipios con ecosistemas irremplazables y niveles de producción elevados, principalmente ubicados en el norte del país (Sonora, Baja California Sur y Coahuila, entre otros). Este hallazgo tiene implicaciones significativas; muestra que la recuperación ambiental vinculada con el crecimiento económico no es un fenómeno extensivo ni endógeno en la mayoría de los municipios del país. Por el contrario, los datos sugieren que el deterioro ambiental es la norma, no la excepción. La sostenibilidad observada en el subconjunto de municipios irremplazables no se debe únicamente a sus altos niveles de producción, sino a factores estructurales como baja densidad poblacional, geografía específica, marcos institucionales particulares y una presión antrópica limitada.

Además, el modelo muestra que ni el nivel de capacidades funcionales municipales (ICFM), ni la producción por sí solas explican de forma robusta la variación en el IIE. Por el contrario, el tamaño poblacional emerge como un factor crítico: los municipios más grandes tienden a presentar menores niveles de integridad ecológica, lo cual sugiere que la presión urbana y la densidad poblacional son determinantes significativos del deterioro ambiental.

En conjunto, los resultados sugieren repensar la generalización de la hipótesis de Kuznets en contextos con alta heterogeneidad territorial y con fuertes asimetrías ecológicas, institucionales y socioeconómicas como el caso mexicano. Validar la CKA en un subconjunto no puede traducirse automáticamente en una receta de política ambiental para todo el país. Por lo anterior, es fundamental adoptar estrategias de desarrollo económico ambientalmente sostenibles que consideren la diversidad ecológica de los territorios. Las capacidades institucionales deben alinearse con objetivos de sostenibilidad y restauración ambiental, en lugar de estar exclusivamente orientadas al crecimiento económico.

La investigación muestra la enorme importancia de los municipios con capital natural irremplazable que, en última instancia, juegan como zonas de contención ecológica con alta producción; aquí la estrategia debe estar vinculada con la conservación ambiental y la contención del crecimiento de presiones antrópicas. El proyecto “Saguaro”, que pasaría por varios de estos municipios, es un ejemplo de propuestas que atentan contra este objetivo de conservación. Para este conjunto de municipios, la estrategia debe estar orientada a establecer zonas de “contención ecológica” mediante el desarrollo de instrumentos, por una parte, legales, que incentiven la conservación y prohíban el desarrollo de proyectos de alto impacto ambiental y por la otra, de instrumentos financieros que promuevan tipos de financiamiento especial para la conservación vía subsidios condicionados, fideicomisos verdes o fondos climáticos internacionales.

De manera señalada, los municipios que se encuentran en esta situación y que deben recibir una atención prioritaria en función de su importancia ecológica y nivel de PBpc son: Loreto, La Paz, Mulegé, Los Cabos, Ascensión, Jiménez, Ocampo, Múzquiz, Parras, Cuatro Ciénegas, Acuña, Escobedo, Ocampo, Sierra Mojada, Ramos Arizpe, San Dimas, Tlahualilo, Otáez, San Pedro Totolápan, Puerto Peñasco, Agua Prieta, Nogales, Cumpas, Cucurpe, Cananea, Sahuaripa, Banámichi, Santa Cruz, Nacozari de García, Mazapil. Asimismo, los gobiernos federales disponen de herramientas fiscales que pueden contribuir significativamente al financiamiento ambiental, tales como impuestos dirigidos a actividades contaminantes y mecanismos de mercado como el comercio de emisiones. Estas herramientas no solo permiten internalizar los costos ambientales, sino que también pueden generar recursos adicionales para impulsar acciones de mitigación y adaptación al cambio climático.

No obstante, la efectividad de estos mecanismos financieros depende en gran medida de una coordinación intergubernamental sólida. Es fundamental que exista una estrategia articulada entre los distintos niveles de gobierno, reconociendo el papel protagónico de los municipios, que son quienes mejor comprenden las realidades sociales, económicas y ambientales de sus territorios. En este sentido, los gobiernos subnacionales desempeñan un papel central en la territorialización de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la implementación de la Agenda 2030, adaptando sus metas a contextos locales diversos y complejos. De igual forma, resulta indispensable visibilizar y fortalecer el rol de las comunidades locales, pueblos originarios y organizaciones municipales, quienes han demostrado históricamente una profunda relación con su entorno y un conocimiento valioso para la conservación de los ecosistemas. Su participación no solo mejora la eficacia de las políticas públicas,

sino que también promueve el desarrollo cultural, social y económico de sus territorios, contribuyendo a la protección del capital natural desde una perspectiva de justicia socioambiental.

Ello debe ser complementado con la transferencia de conocimiento que permita el desarrollo de competencias ambientales y recursos para fortalecer capacidades técnicas institucionales locales. Una forma de lograr esto último, puede ser mediante incentivos especiales para la vinculación entre academia, gobiernos municipales y estatales, organizaciones de la sociedad civil y sector productivo. Más allá de este pequeño conjunto, el 95% de los municipios se encuentran en niveles diferenciados de degradación ambiental, por lo que su estrategia ambiental y productiva debe estar orientada a la restauración. Aquí, entendiendo que los incentivos deben ser diferenciados en función del nivel de degradación ambiental y los niveles de producción económica, pueden desarrollarse instrumentos tales como programas de reforestación, recuperación de suelos, y saneamiento hídrico, e incentivos fiscales para el desarrollo de actividades económicas bajas en impacto ambiental.

Dado que la investigación muestra la importancia del factor poblacional en los niveles de degradación ambiental, es clave integrar criterios ambientales en la expansión urbana, permisos de uso de suelo y movilidad de áreas urbanas. En este contexto, uno de los principales retos a los que se enfrenta la conservación ambiental es a la falta de financiamiento climático, por lo que es necesario recurrir al uso de todos los mecanismos financieros, legales, de supervisión y regulación para reducir la brecha entre los recursos necesarios y los disponibles para tareas de conservación ambiental, asegurando el desarrollo social de las generaciones presentes y futuras.

Finalmente, dentro de las líneas de investigación futuras se contempla la inclusión de modelos espaciales, que tienen la ventaja de reconocer y cuantificar los efectos de vecindad para ir más allá de la relación correlacional, profundizando el análisis para capturar la heterogeneidad regional y la interdependencia ecológica entre municipios.

Referencias

- [1] Ahmed, Z., Cary, M., Ali, S., Murshed, M., Ullah, H., y Mahmood, H. (2022). Moving toward a green revolution in Japan: symmetric and asymmetric relationships among clean energy technology development investments, economic growth, and CO2 emissions. *Energy y Environment*, 33(7), 1417-1440.
- [2] Allan, J. R., Venter, O., & Watson, J. E. (2017). Temporally inter-comparable maps of terrestrial wilderness and the Last of the Wild. *Scientific data*, 4(1), 1-8.
- [3] Balsalobre-Lorente, D., Shahbaz, M., Roubaud, D., y Farhani, S. (2018). How economic growth, renewable electricity and natural resources contribute to CO2 emissions?. *Energy policy*, 113, 356-367.
- [4] Banxico e Inquiry (2020) "Riesgos y oportunidades climáticas y ambientales del Sistema financiero de México del diagnóstico a la acción". Informe de la colaboración entre el Programa de Investigación del PNUMA y el Banco de México. <https://www.banxico.org.mx/sistema-financiero/d/%7B828DDC4B-D078-157F-8486-141F3103FA87%7D.pdf>
- [5] Benavides, J., García, H., Cadena, X., y Salamanca, D. (2022). Actualización de documento, líneas estratégicas y Plan de acción y Seguimiento (PAS) de la Estrategia Nacional de Financiamiento Climático (ENFC). http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/4390/Repor_Julio_2022_Benavides_et_al.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [6] Bennedsen, M., Hillebrand, E., y Jensen, S. (2020). Investigating the GDP-CO2 relationship using a neural network approach.
- [7] Bennedsen, M., Hillebrand, E., y Jensen, S. (2023). A neural network approach to the environmental Kuznets curve. *Energy Economics*, 126, 106985.
- [8] Catalán, H. (2014). Curva ambiental de Kuznets: implicaciones para un crecimiento sustentable. *Economía informa*, 389, 19-37.
- [9] Ceballos Pérez, S. G., y Flores Xolocotzi, R. (2022). Una prueba de hipótesis de la curva ambiental de Kuznets para residuos sólidos urbanos en México, 1992-2018. *Revista de economía*, 39(99), 54-82. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2395-87152022000200054&script=sci_arttext
- [10] CEMDA – Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C. (2024). “El proyecto de presupuesto para 2025 recorta todavía más los recursos para proteger el medio ambiente.” México. <https://bit.ly/4gmiFjS>
- [11] Cobb, J. B., y Daly, H. E. (1994). *For the common good: Redirecting the economy toward community, the environment, and a sustainable future*. Boston: Beacon Press.
- [12] CONABIO. (2023). Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/>
- [13] (CONAGUA, 2024) Datos abiertos, Vulnerabilidad Social, Económica Y Ambiental Por Municipio, CONAGUA, disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/vulnerabilidad-social-economica-y-ambiental-por-municipio>
- [14] Dasgupta, S., Laplante, B., Wang, H., y Wheeler, D. (2002). Confronting the environmental Kuznets curve. *Journal of economic perspectives*, 16(1), 147-168.
- [15] Destek, M. A., y Sinha, A. (2020). Renewable, non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: Evidence from organisation for economic Co-operation and development countries. *Journal of cleaner production*, 242, 118537.
- [16] Díaz, H., y Morales, M., (2025). Determinantes del impacto institucional en la actividad económica. Evidencia para 132 países. *Revista de Economía Institucional*, 27(52), 165-190.
- [17] Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431-455.
- [18] Duygun, M., Sena, V., y Shaban, M. (2018). An artificial neural network approach to measuring innovation in the banking sector. *Journal of Banking y Finance*, 96, 330-342.
- [19] Ercolano, S., Gaeta, G. L. L., Ghinoi, S., & Silvestri, F. (2018). Kuznets curve in municipal solid waste production: An empirical analysis based on municipal-level panel data from the Lombardy region (Italy). *Ecological indicators*, 93, 397-403.
- [20] Georgescu-Roegen, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard university press.
- [21] Godínez Montoya, L., Figueroa Hernández, E., y Pérez Soto, F. (2021). El medio ambiente, la pobreza y el crecimiento económico en México. *Revista mexicana de economía y finanzas*, 16(2).
- [22] Gómez-López, C. S., Barrón Arreola, K. S., y Moreno Moreno, L. (2011). Crecimiento económico y medio ambiente en México. *El trimestre económico*, 78(311), 547-582.
- [23] Grossman, G. M., y Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The quarterly journal of economics*, 110(2), 353-377.
- [24] Hannah, L., Carr, J. L., & Lankerani, A. (1995). Human disturbance and natural habitat: a biome level analysis of a global data set. *Biodiversity & Conservation*, 4(2), 128-155
- [25] Hove, S., y Tursoy, T. (2019). An investigation of the environmental Kuznets curve in emerging economies. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117628.
- [26] Huang, C. y Yang, C. (2017). An artificial neural network approach to modeling innovation diffusion with a case study of high-tech industry. *Technological Forecasting and Social Change*, 116, 97-107.
- [27] Huang, Z., Cao, J., Peng, Y., Ma, K., & Cui, G. (2023). Quantitative Evaluation of the Integrity of Natural Ecosystems and Anthropogenic Impacts in Shennongjia National Park, China. *Forests*, 14(5), 987
- [28] INEGI, (2024), Censos Económicos, 2019, INEGI, disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/default.html#Tabulados>

-
- [29] INEGI CEMM (2023) CUENTAS ECONÓMICAS Y ECOLÓGICAS DE MÉXICO (CEEM) 2022 Comunicado de prensa número 755/23 1 de diciembre de 2023 Página 1/7. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CEEM/CEEM2022.pdf>
- [30] Jacobson, A. P., Riggio, J., M. Tait, A., & EM Baillie, J. (2019). Global areas of low human impact ('Low Impact Areas') and fragmentation of the natural world. *Scientific Reports*, 9(1), 14179.
- [31] Juárez, M. P. (2024). Estimación de la Curva de Kuznets Ambiental para México 1974-2020. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, 13(Especial), 44-56.
- [32] Kaika, D., y Zervas, E. (2013). The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory—Part A: Concept, causes and the CO2 emissions case. *Energy policy*, 62, 1392-1402.
- [33] Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American Economic Review*, Vol. 45, No. 1 (Mar., 1955), pp. 1-28. https://www.jstor.org/stable/1811581?seq=1&cid=pdfreference#references_tab_contents
- [34] Leal, P. H., y Marques, A. C. (2022). The evolution of the environmental Kuznets curve hypothesis assessment: A literature review under a critical analysis perspective. *Heliyon*, 8(11).
- [35] IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- [36] Mahmood, H., Furqan, M., Hassan, M. S., & Rej, S. (2023). The environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis in China: A review. *Sustainability*, 15(7), 6110.
- [37] Martinez-Alier, J. (2002). The Environmentalism of the poor: a study of ecological conflicts and valuation. In *The Environmentalism of the Poor*. Edward Elgar Publishing.
- [38] Molinari, A., y Val, M. E. (2024). Financiamiento de la transición energética en América Latina: el papel de los bancos multilaterales de desarrollo. *Desafíos*, 36(2).
- [39] Mora, F. (2019). The use of ecological integrity indicators within the natural capital index framework: The ecological and economic value of the remnant natural capital of México. *Journal for Nature Conservation*, 47, 77-92.
- [40] Pablo-Romero, M. D. P., y De Jesús, J. (2016). Economic growth and energy consumption: The energy-environmental Kuznets curve for Latin America and the Caribbean. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1343-1350.
- [41] Panayotou, T. (1993). Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development. International Labour Organization.
- [42] Pata, U. K. (2021). Renewable and non-renewable energy consumption, economic complexity, CO 2 emissions, and ecological footprint in the USA: testing the EKC hypothesis with a structural break. *Environmental science and pollution research*, 28, 846-861.
- [43] Perez, C. (2010). Technological revolutions and techno-economic paradigms. *Cambridge journal of economics*, 34(1), 185-202.
- [44] Pérez, S., Ramos, A., Mendieta, C., y El Kori, N. (2023). Guía de los fondos financieros: para la realización de proyectos que enfoquen su objetivo en la mitigación al cambio climático dentro del ciclo integral del agua. Macaronesia.
- [45] Pérez-Cirera, V., Schmelkes, E., López-Corona, O., Carrera, F., García-Teruel, A. P., y Teruel, G. (2018). Ingreso y calidad del aire en ciudades: ¿ Existe una curva de Kuznets para las emisiones del transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México?. *El trimestre económico*, 85(340), 745-764.
- [46] Peters, G. P., y Hertwich, E. G. (2008). Post-Kyoto greenhouse gas inventories: production versus consumption. *Climatic Change*, 86(1), 51-66.
- [47] PNUD, (2024), Informe de Desarrollo Humano Municipal 2010-2020: una década de transformaciones locales en México, Organización de las Naciones Unidas.
- [48] PNUD, (2024). Análisis de gasto público federal a favor de la biodiversidad 2022. Proyecto 00108628 Iniciativa Finanzas de Biodiversidad BIOFIN México fase II. 42 pp.
- [49] PNUD, (2025), Plataforma de Análisis para el desarrollo, México, ONU, Disponible en: <https://pad.undp.org.mx/portal-de-datos>

-
- [50] Raworth, K. (2018). Doughnut economics: Seven ways to think like a 21st century economist. Chelsea Green Publishing.
 - [51] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E. y Foley, J. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2).
 - [52] Sarkodie, S. A., y Strezov, V. (2019). Effect of foreign direct investments, economic development and energy consumption on greenhouse gas emissions in developing countries. *Science of the total environment*, 646, 862-871.
 - [53] Sarkodie, S. A., y Adams, S. (2020). Electricity access, human development index, governance and income inequality in Sub-Saharan Africa. *Energy Reports*, 6, 455-466.
 - [54] Shah, M. I., AbdulKareem, H. K., y Abbas, S. (2022). Examining the agriculture induced Environmental Kuznets Curve hypothesis in BRICS economies: The role of renewable energy as a moderator. *Renewable Energy*, 198, 343-351.
 - [55] Shafik, N., y Bandyopadhyay, S. (1992). Economic growth and environmental quality: Time series and cross-country evidence. *World Bank Policy Research Working Paper* 904
 - [56] Shahbaz, M., Ozturk, I., Afza, T., & Ali, A. (2013). Revisiting the environmental Kuznets curve in a global economy. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, 494-502.
 - [57] Shiva, V. (2015). *Soil not oil: Environmental justice in an age of climate crisis*. North Atlantic Books.
 - [58] Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the Environmental Kuznets Curve. *World Development*, 32(8), 1419-1439.
 - [59] Sun, Y., Sun, Z., y Jiang, Z. (2024). The environmental Kuznets curve hypothesis: an ML approach to assessing economic growth and environmental sustainability using artificial neural network. *Soft Computing*, 28(4), 3703-3723.
 - [60] Tavana, M., Rezaei, S., y Azizi, M. (2016). An artificial neural network approach to measuring innovation performance in the automotive industry. *International Journal of Production Research*, 54(10), 3059-3075.
 - [61] Ulucak, R., y Khan, S. U. D. (2020). Determinants of the ecological footprint: role of renewable energy, natural resources, and urbanization. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101996.
 - [62] Wang, Q., Zhang, F., & Li, R. (2023). Revisiting the environmental kuznets curve hypothesis in 208 counties: The roles of trade openness, human capital, renewable energy and natural resource rent. *Environmental Research*, 216, 114637.
 - [63] Zhang, Z., & Yan, M. (2022). Reexamining the environmental Kuznets curve in Chinese cities: does intergovernmental competition matter?. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 14989.
 - [64] Zoundi, Z. (2017). CO2 emissions, renewable energy and the Environmental Kuznets Curve, a panel cointegration approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1067-1075.