

GESTIÓN DE RESIDUOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO: MODELOS MATEMÁTICOS Y LA CURVA DE KUZNETS

Waste Management in Mexico City: Mathematical Models and the Kuznets Curve

Bernardino De la Cruz-Márquez^{1*}, María Concepción Martínez-Rodríguez², Diego Domínguez-Solís³

.*Autor de correspondencia

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.248](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.248)

Como citar este artículo: De la Cruz-Márquez, B., Martínez-Rodríguez, M. C. y Domínguez-Solís, D. (2026). Gestión de residuos en la Ciudad de México: modelos matemáticos y la curva de Kuznets. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 139-165. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.248>

Resumen

Los residuos sólidos urbanos (RSU) representan un desafío crítico para las me-gaciudades, particularmente en la Ciudad de México, donde los altos costos operativos y la logística ineficiente han dificultado su gestión. En este estudio se investigó la aplicación de modelos matemáticos para optimizar el sistema, con el objetivo principal de reducir costos y validar la relación tipo curva am-biental de Kuznets (CAK) entre el crecimiento económico y la generación de re-siduos. La metodología se sustentó en la recolección de datos de generación de residuos y del PIB de las 16 alcaldías de la CDMX en el periodo 2006-2023 de fuentes de la Sedema y el INEGI. Posteriormente se hizo la depuración de datos. Los resultados evidenciaron una reducción potencial en costos y emisiones, así como una correlación significativa entre desarrollo económico y generación de residuos, respaldando la hipótesis de Kuznets. El estudio aportó datos valiosos para lograr una planificación urbana sostenible. En conclusión, la integración de modelos matemáticos con análisis socioeconómicos y ambientales demos-tró ser eficaz para mejorar la gestión de RSU, abonando a lograr un sistema más económico, eficiente y sostenible en entornos urbanos complejos y brindando a las autoridades información para futuros desarrollos.

1 Alumno del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2954-2714>. Correo electrónico: ber31032000@gmail.com

2 Doctora en Política Pública. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>. Correo electrónico: mcmartinezr@ipn.mx

3 Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8402-5157>. Correo electrónico: ddominguez1800@alumno.ipn.mx

Recibido: 18/01/2026 | Aceptado: 02/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Palabras clave: optimización, gestión, contaminación (Tesauros); modelos matemáticos, curva de Kuznets (palabras clave del autor).

Abstract

Municipal solid waste (MSW) represents a critical challenge for megacities, particularly in Mexico City, where high operating costs and inefficient logistics have hampered its management. This study investigated the application of mathematical models to optimize the system, with the main objective of reducing costs and validating the Kuznets Environmental Curve (KEC) relationship between economic growth and waste generation. The methodology involved collecting data on waste generation and GDP from the 16 municipalities of Mexico City for the period 2006-2023, from sources such as SEDEMA and INEGI. The data was then cleaned. The results showed a potential reduction in costs and emissions and a significant correlation between economic development and waste generation, supporting Kuznets' hypothesis. The study provided valuable data for sustainable urban planning. In conclusion, the integration of mathematical models with socioeconomic and environmental analyses proved effective in improving MSW management, achieving a more economical, efficient, and sustainable system in complex urban environments, and providing authorities with information for future developments.

Keywords: optimization, management, pollution (Thesauri); mathematical models, Kuznets curve (author's keywords).

Introducción

En el siglo XXI, se constata la existencia de una urbanización acelerada. Según las Naciones Unidas, en 2014 había 28 megaciudades que aglutinaban unos 453 millones de personas (aproximadamente 2% de la población urbana). Para 2018, ya eran 33 megaciudades (casi una de cada ocho personas en el mundo vivía en ellas). Según proyecciones de las Naciones Unidas, para 2050, aproximadamente 68% de la población mundial residirá en áreas urbanas, lo que añadirá 2, 500 millones de personas a las ciudades. Este crecimiento sin precedentes, especialmente concentrado en Asia y África, ejerce una presión masiva sobre la infraestructura y los servicios básicos, siendo la gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) uno de los mayores desafíos. La mayoría de los residuos mundiales proviene de zonas urbanas. Aunque no hay una cifra global conjunta, el Banco Mundial señala que en países de ingreso bajo 48% de los

residuos recolectados proviene de áreas urbanas, frente a sólo 26% procedentes de áreas rurales. Es decir, las ciudades generan muchos más residuos que el campo. El Programa de la ONU para el Medio Ambiente (PNUMA) informó que la generación total de residuos sólidos urbanos fue de unos 2, 300 millones de toneladas en 2023.

A nivel global, el Banco Mundial estima que la generación de RSU superará los 3, 800 millones de toneladas para 2050, un aumento de aproximadamente 56% con respecto a los niveles actuales. Aunque no existe un dato oficial del porcentaje exacto para 2050, es lógico inferir que el porcentaje de residuos generados en áreas urbanas seguirá al alza.

La Ciudad de México (CDMX) enfrenta retos particulares debido a su densidad poblacional (6, 163 hab/ km²). La concentración de población, la alta diferencia socioeconómica entre alcaldías y las actividades económicas realizadas en estas áreas generan altos volúmenes de desechos, cuya gestión inadecuada no sólo acarrea graves consecuencias ambientales y para la salud pública, sino también costos operativos crecientes. La gestión de residuos sólo puede utilizar entre 20% y 50% del presupuesto en ciudades de ingresos bajos y medios (ONU-Hábitat; Banco Mundial), lo que presiona las finanzas locales; además, produce consecuencias ambientales y de salud pública devastadoras, como la contaminación del suelo y el agua, la proliferación de transmisores de enfermedades y la emisión de gases de efecto invernadero.

En este contexto, resulta fundamental comprender los factores que influyen en la generación de RSU, entre los que destacan el nivel de desarrollo económico y las disparidades socioeconómicas. Para el caso de México, la gestión de RSU está enmarcada en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), la cual establece la jerarquía para el manejo de residuos, priorizando la prevención y minimización, seguidas por la valorización (reúso, reciclaje) y, por último, la disposición final segura. La LGPGIR clasifica los residuos en urbanos, de manejo especial y peligrosos, y distribuye las responsabilidades entre los tres niveles de gobierno. Específicamente, la gestión de los residuos sólidos urbanos recae en los municipios y, en el caso de la CDMX, en las 16 alcaldías. A nivel local, la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Sedema) complementa esta normativa con la Ley de Residuos Sólidos de la Ciudad de México y su Programa de Gestión Integral de Residuos (PGIR). Estas regulaciones buscan adaptar la política ambiental federal a la complejidad de la capital, promoviendo iniciativas como la separación de residuos y la

economía circular. La integración de la LGPGIR y las regulaciones de la Sedema son cruciales, ya que dictan el marco dentro del cual se puede planificar y optimizar la logística de recolección y tratamiento de residuos.

El crecimiento exponencial en la generación de RSU durante el desarrollo económico ha sido objeto de análisis. La CAK ofrece un marco teórico prometedor al proponer una relación de U invertida entre ingresos per cápita y degradación ambiental: inicialmente creciente, pero reversible tras un umbral de desarrollo. La teoría postula tres fases: una inicial de baja contaminación en economías en vías de desarrollo; una intermedia en que la industrialización y el consumo masivo impulsan un aumento drástico de la degradación; y una final en la que el desarrollo económico sostenido, acompañado de mayor conciencia ambiental, innovación tecnológica y regulaciones más estrictas, conduce a una reducción de la degradación. Sin embargo, la CAK no está exenta de críticas. Algunos estudios argumentan que la curva podría no ser aplicable a todos los contaminantes o que la reducción de la degradación en países desarrollados se debe en gran medida a la “externalización” de industrias contaminantes a naciones en desarrollo, es decir, al traslado de actividades contaminantes desde países desarrollados a países en desarrollo. Otros debates giran en torno a si el punto de inflexión de la curva es alcanzable para los países de ingresos medios y si la curva realmente refleja una mejora ambiental o simplemente un cambio en la composición de la contaminación.

Si bien estudios como el de Juan et al. (2013) han validado esta relación para RSU en Colombia, existe una brecha de investigación en su aplicación a megaciudades latinoamericanas con altas diferencias internas, como la CDMX. Particularmente, se desconoce cómo interactúan variables sociales (por ejemplo, marginación, cobertura de servicios) con la dinámica económica en la generación de residuos por alcaldía. La aplicación de este enfoque en la CDMX presenta particularidades únicas: (1) fragmentación urbana: la ciudad presenta patrones espaciales complejos, donde colonias de altos ingresos coexisten con asentamientos irregulares, generando dinámicas de producción no homogéneas. La composición de los residuos en alcaldías como Benito Juárez o Miguel Hidalgo, con un alto consumo de bienes envasados, difiere drásticamente de las de Iztapalapa o Tláhuac, en las que predominan los residuos orgánicos y de construcción; (2) economía informal: se estima que 35% de los residuos producidos en las ciudades son manejados por redes informales de recolección y reciclaje (Botello-Álvarez et al., 2018). Si bien esta red de reciclaje contribuye a la valorización de los residuos, distorsiona los datos oficiales, afecta la via-

bilidad de los programas de reciclaje formales y expone a los trabajadores a condiciones de trabajo peligrosas y sin seguridad social; (3) cambio climático: las proyecciones indican que para 2050 las temperaturas en la ciudad aumentarán 2-3°C (INECC, 2022), afectando los patrones de consumo y, por ende, la generación de residuos.

Adicionalmente, la optimización operativa mediante modelos matemáticos, como el problema del agente viajero (TSP) o el problema de la asignación de rutas de vehículos (VRP), han demostrado reducir distancias de recolección en un 9-20% en contextos como Monterrey, NL, México (Benítez-Bravo et al., 2021) y emisiones en contextos latinoamericanos. Sin embargo, estos modelos raramente incorporan variables como la CAK para priorizar zonas críticas, limitando su impacto en sistemas más complejos como la CDMX, donde 60% de las calles tienen restricciones de direccionalidad (INEGI, 2020).

Este estudio propone analizar la relación PIB per cápita y generación de RSU a nivel de alcaldía (2006-2023) para identificar patrones tipo CAK y, al mismo tiempo, utilizar este conocimiento para informar la optimización de los sistemas de recolección y tratamiento, brindando a las autoridades de la CDMX herramientas más robustas para la planificación urbana sostenible.

Marco teórico

Entendiendo la cak

Su origen data de los años noventa, de estudios pioneros como el de Grossman y Krueger sobre los efectos del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) y el análisis de Shafik y Bandyopadhyay para el World Development Report 1992. Sin embargo, la idea de que el crecimiento económico es indispensable para preservar o mejorar el medio ambiente ya formaba parte del discurso sobre desarrollo sostenible en Our Common Future.

El International Bank for Reconstruction and Development (IBRD) contribuyó significativamente a la difusión de la CAK a través de su World Development Report 1992, señalando que la degradación ambiental no es una consecuencia inevitable del crecimiento, ya que el progreso tecnológico, las preferencias sociales y las inversiones en sostenibilidad pueden alterar esta relación. El informe destacaba que, al aumentar los ingresos, crece la demanda de un entorno más limpio y se incrementan los recursos económicos para lograrlo. Algunos autores, como Beckerman, llevaron esta idea más lejos, afirmando que

la riqueza es, en última instancia, el camino más efectivo —y quizá el único— para alcanzar un medio ambiente saludable.

La teoría sugiere que el crecimiento económico puede favorecer la mejora ambiental a largo plazo, ya que, en una primera fase, el nivel de ingresos aumenta y la contaminación sigue la misma tendencia, pero se alcanza un punto de inflexión en que la contaminación comienza a bajar, ya que ahora los individuos tienen suficientes ingresos para cubrir sus necesidades básicas y toman la iniciativa de realizar un mejor cuidado del medio ambiente. Según el Banco Mundial, México es una economía de ingresos medianos-altos, es decir, una economía emergente. Por tanto, es importante la investigación de estrategias para una mejor gestión de los RSU, a fin de identificar alcaldías con mayores desafíos relacionados con factores socioeconómicos (tales como marginación y cobertura de servicios).

La CAK es una aplicación de la curva de Kuznets en el campo del medio ambiente. El modelo está dado como sigue:

$$(1) A_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 Y_{i,t} + \beta_2 Y_{i,t}^2 + \beta_3 Y_{i,t}^3 + \sum_{j=1}^k \gamma_j X_{j,i,t} + \mu_{i,t},$$

En donde A denota el deterioro ambiental en un tiempo t . Y , Y^2 y Y^3 se refieren a los ingresos per cápita elevados a cierta potencia en un tiempo t . $X_{j,i,t}$ son variables que intervienen en la degradación ambiental y μ es un término de error aleatorio. Para las β 's tenemos las siguientes condiciones:

Si $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0; \beta_3 = 0$, entonces se tiene la CAK original.

Si $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0; \beta_3 = 0$, entonces se tiene la forma de U.

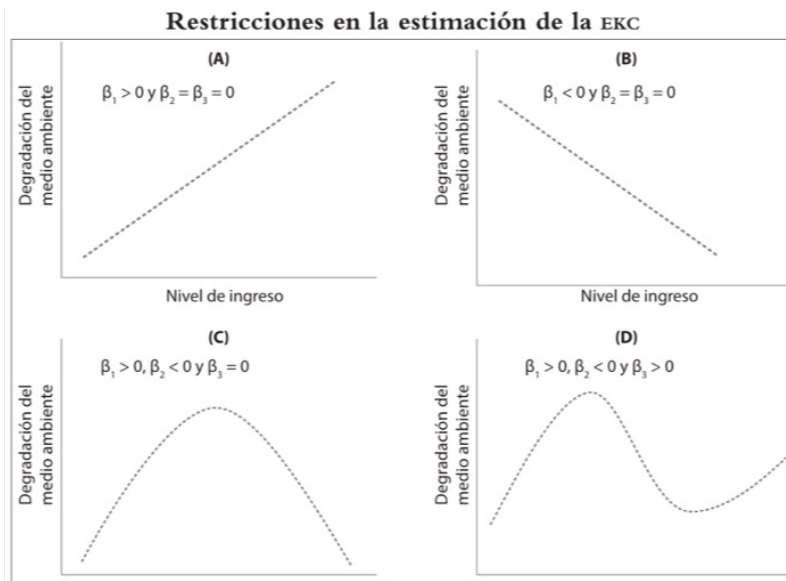
Si $\beta_1 < 0, \beta_2 = \beta_3 = 0$, entonces el daño ambiental indica una disminución lineal.

Si $\beta_1 > 0, \beta_2 = \beta_3 = 0$, entonces el daño ambiental indica un crecimiento lineal.

Si $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ y $\beta_3 < 0$, entonces el daño ambiental aparecerá como una “U” invertida, mostrando que a largo plazo las emisiones disminuirán, pero también aumentarán en determinados puntos de inflexión.

Si $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0, \beta_3 > 0$, entonces se obtiene una curva en forma de N; esto implica que un mayor nivel de ingreso per cápita no genera una reducción de la degradación del medio ambiente.

Figura 1.
CAK según las condiciones.



Nota: Retomado de Horacio Catalán (2014)

Partimos del supuesto de que, si bien las emisiones per cápita pueden diferir entre alcaldías con niveles similares de ingreso, la sensibilidad de dichas emisiones frente a variaciones en el ingreso —es decir, su elasticidad— se mantiene constante dentro de ese grupo. Usualmente, la estimación de esta relación se realiza mediante modelos con datos de panel. Sin embargo, debido a que los datos de panel combinan información a lo largo del tiempo y en sección cruzada, nos encontramos con variaciones entre unidades que no siempre pueden observarse directamente o cuyos efectos individuales no son observables. Una forma de solucionar dicho inconveniente es añadiendo un modelo del error:

$$(2) \gamma_{i,t} = w'_{it}\beta + h_i + \epsilon_{it}$$

Donde w_{it} es un vector de z variables explicativas, β es un vector de parámetros del modelo, h_i es la heterogeneidad no observable y ϵ_{it} es el término aleatorio que tiene media cero y varianza constante.

Hsiao (2003), Baltagi (2005) y Greene (2000) establecieron dos modelos fundamentales para el análisis de datos panel con heterogeneidad no observada:

$$(3) y_{i,t} = w'_{it}\beta + \alpha_i + \epsilon_{it}, \text{ Efectos fijos}$$

$$(4) y_{i,t} = w'_{it}\beta + v_i + \epsilon_{it}, \text{ Efectos aleatorios}$$

- **Efectos fijos:** se supone que las diferencias individuales (no observables) son constantes en el tiempo y se correlacionan con las variables independientes.
- **Efectos aleatorios:** tratan estas diferencias como variables aleatorias no correlacionadas con los regresores, bajo el supuesto de que son parte del error.

Sin embargo, la CAK no es universal: no se cumple para todos los contaminantes, y estudios recientes ponen en duda su validez general.

El “efecto escala” plantea que, si una economía crece sin cambios tecnológicos o estructurales, la contaminación aumentará en forma directamente proporcional a su expansión. Este fenómeno sustenta la creencia tradicional de que el progreso económico y la protección ambiental son incompatibles, aunque esta perspectiva ignora otros factores determinantes que pueden modificar esta relación, como la innovación, la regulación ambiental o los cambios en las preferencias sociales.

Interpolación por splines cúbicos

La interpolación por splines cúbicos es un método de interpolación polinómica por tramos que permite aproximar una función o un conjunto de datos mediante polinomios cúbicos en cada subintervalo, garantizando suavidad y continuidad en los puntos de unión (nodos); a diferencia de los polinomios de alto grado, evita el fenómeno de Runge, que puede generar oscilaciones erráticas y poco realistas entre los puntos de datos.

Para $n + 1$ puntos (x_i, y_i) , el spline $S(X)$ en el intervalo $[x_i, x_{i+1}]$ es:

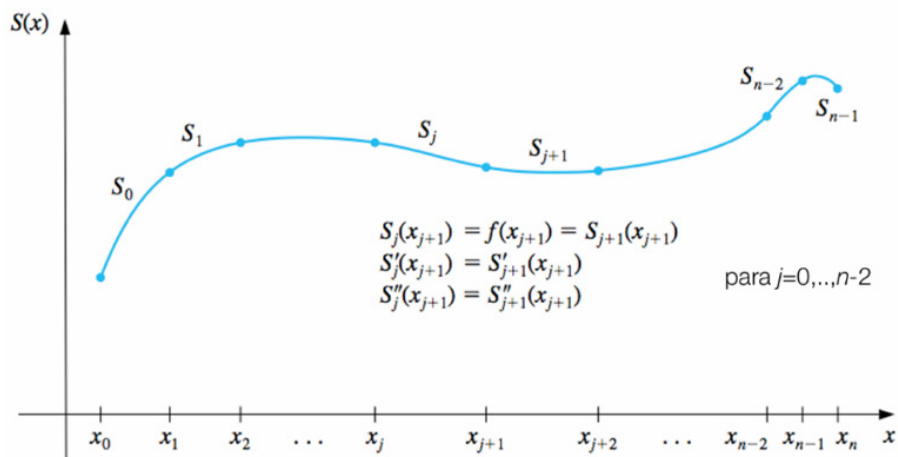
$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3$$

Con las condiciones:

- Interpolación: $S_i(x_i) = y_i$.
- Continuidad: $S_i(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1})$
- Derivadas continuas: $S'_i(x_{i+1}) = S'_{i+1}(x_{i+1})$ y $S''_i(x_{i+1}) = S''_{i+1}(x_{i+1})$.

Figura 2.

CAK según las condiciones



Notas: Ramírez Manzanares y Botello (2016), Interpolación. Splines cúbicos, CI-MAT A.C.

La interpolación por splines cúbicos se empleó para reconstruir series temporales incompletas de generación de RSU y datos poblacionales (2006–2023), esenciales para modelar la curva de Kuznets. Esta aproximación es clave para asegurar la robustez de los análisis CAK, que requieren series completas para identificar patrones confiables. Al suavizar las fluctuaciones anuales, dicha técnica permitió visualizar con mayor claridad la tendencia a largo plazo de la generación de RSU y su relación con el desarrollo económico, lo que facilitó la identificación de la relación propuesta por la curva de Kuznets. Esta aproximación no sólo ayuda a validar la hipótesis, sino que también sirve como una

herramienta de previsión para proyectar futuros escenarios de generación de residuos basados en las tendencias económicas actuales.

Indicadores socioeconómicos y su impacto en la generación de residuos

La elección del Producto Interno Bruto (PIB) per cápita como la principal variable socioeconómica de este estudio se justifica por su relevancia como indicador del nivel de desarrollo económico. Dicho indicador refleja la capacidad adquisitiva promedio de una población y nos ayuda a aproximarnos a los patrones de consumo predominantes.

El PIB per cápita es la métrica más ampliamente utilizada para medir el ingreso promedio y el bienestar económico de una población. Su uso en este contexto se basa en la premisa de que un mayor ingreso se traduce en mayor poder adquisitivo. Este poder adquisitivo está directamente relacionado con el consumo de bienes y servicios, muchos de los cuales vienen en empaques o generan residuos al ser utilizados. El aumento en el consumo de productos envasados, comidas procesadas y productos de consumo duraderos, característico de las economías en crecimiento, contribuye directamente a incrementar la cantidad y la complejidad de los residuos generados.

Aunque existen otros indicadores relevantes, como el Índice de Desarrollo Humano (IDH) o el Índice de Pobreza Multidimensional, a menudo éstos combinan múltiples factores (educación, salud, vivienda) que, si bien ofrecen una visión más holística del bienestar, pueden diluir la relación directa entre el poder económico y los hábitos de consumo que son la base de la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets. La elección del PIB per cápita, por lo tanto, se justifica por su capacidad para aislar y medir de manera más precisa la variable económica que está en el corazón de la teoría de Kuznets.

Adicionalmente, el PIB per cápita a nivel de alcaldía es una variable que presenta una alta heterogeneidad dentro de la CDMX, lo que es crucial para este estudio. La disparidad en los ingresos entre las diferentes alcaldías —por ejemplo, el alto poder adquisitivo de la Miguel Hidalgo en comparación con la de Iztapalapa— permite un análisis más detallado de cómo esta variable económica se correlaciona con la generación de residuos a una escala subnacional, brindando una perspectiva única y contextualizada que no podría obtenerse con indicadores a nivel de ciudad o país.

Basándonos en Díaz Del Águila y Rodríguez Guirola (2019) podemos hacer una modificación para aplicarla en las instituciones de la CDMX. Es cierto que para la implementación en grandes campus (como la UNAM o el IPN), es imprescindible realizar un análisis financiero. Se deben calcular indicadores como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la razón Beneficio/Costo (B/ C) para elegir la opción que sea económicamente factible y ambientalmente responsable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Nos basamos en un enfoque cuantitativo y longitudinal, utilizando una serie de tiempo de 16 años (2008-2023). Los datos utilizados se obtuvieron de fuentes oficiales y públicas, lo que asegura la fiabilidad de la información:

- **Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU):** los datos sobre la cantidad de residuos generados en cada una de las 16 alcaldías de la CDMX fueron recopilados de los informes anuales de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Sedema). La información se organizó en hojas de cálculo de Microsoft Excel, en las que la generación de residuos se expresó en toneladas por día.
- **Datos socioeconómicos y demográficos:** los datos de Producto Interno Bruto (PIB) per cápita y la densidad poblacional de cada alcaldía se obtuvieron de las bases de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), específicamente del Censo de Población y Vivienda y la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE).

Generación de rsu por alcaldía

La CDMX genera diariamente una cantidad considerable de residuos sólidos urbanos. Diversas fuentes reportan cifras ligeramente diferentes, lo que podría deberse a variaciones en los años de referencia, las metodologías de medición o las fuentes de datos. Según WtERT, la ciudad produce un total de 13 149 toneladas de residuos sólidos urbanos al día, lo que equivale a 1.4 kilogramos por habitante. Otra fuente (residuos sólidos-Congreso de la Ciudad de México) indica una cifra de 13 000 toneladas diarias, con un promedio de un kilo por ciudadano, señalando un incremento posterior a los inicios de la pandemia de Covid. Datos más recientes, de 2023 (Inventario de Residuos Sólidos de la CDMX), estiman una generación de 12 454 toneladas al día, con una tasa per

cápita de 1.071 kilogramos/habitante/día. Estas cifras sitúan a la CDMX entre las urbes con mayor producción de residuos a nivel mundial.

La generación por alcaldía varía en función de factores sociales, económicos y ambientales. Según datos de la Secretaría del Medio Ambiente (Sedema), las alcaldías que generaron más residuos en 2023 fueron la Gustavo A. Madero e Iztapalapa. Haciendo un análisis con base a los datos de la Sedema para el periodo 2008-2023 (los datos de 2006 y 2007 son inconclusos), observamos que la tendencia es la misma.

Figura 3.
Gráfica de residuos generados en el periodo 2008-2023



La CDMX destaca como una de las metrópolis más grandes y dinámicas del mundo, y desempeña un papel fundamental en la economía del país. Su intensa actividad productiva la convierte en un punto clave para el comercio y la inversión, tanto dentro del país como en el ámbito internacional. El tamaño de su área metropolitana, la más grande del continente americano y de las más pobladas a nivel global, implica un mercado y una fuerza laboral considerables. Entender la distribución de la riqueza dentro de esta ciudad, específicamente a nivel de sus 16 alcaldías, resulta crucial para la formulación de estrategias de gestión efectivas.

piB per cápita de las alcaldías de la CDMX

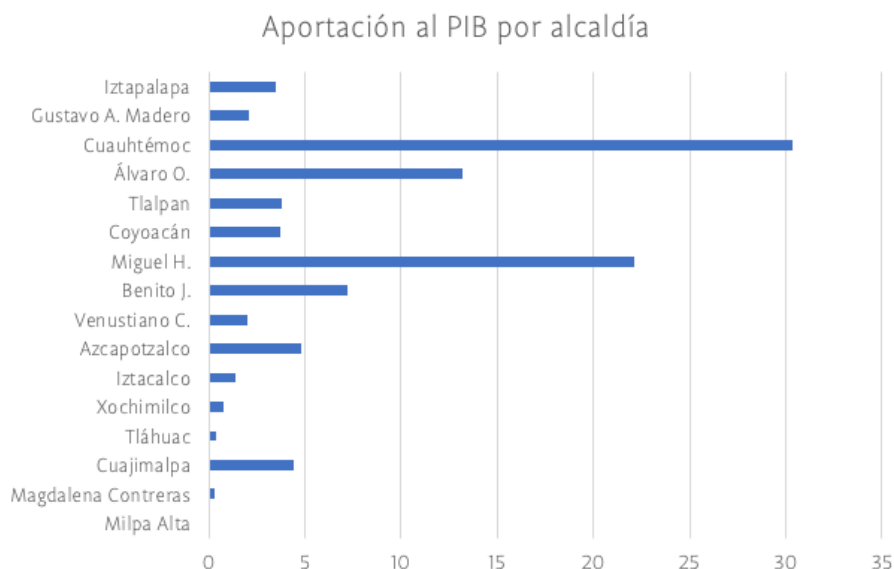
La información específica sobre el PIB per cápita a nivel de cada una de las alcaldías de la CDMX es limitada, ya que el INEGI generalmente reporta este indicador a nivel nacional o estatal. Esto dificulta el análisis detallado de la actividad económica por demarcación territorial. Sin embargo, algunas fuentes proporcionan datos sobre el PIB total generado por ciertos municipios, aunque éstos no se presentan en términos per cápita. El PIB total de una alcaldía refleja la magnitud de su actividad económica, pero no considera el tamaño de su población, un factor esencial para determinar el poder adquisitivo individual. De hecho, una alcaldía con un PIB total elevado podría tener un PIB per cápita relativamente bajo si su población es relativamente alta.

Es importante señalar las limitaciones inherentes al uso de datos generales de la CDMX o el PIB total de algunas alcaldías como medida del poder adquisitivo a nivel individual. Un PIB per cápita alto para la CDMX en su conjunto no garantiza una distribución equitativa de la riqueza en todas las alcaldías. Es probable que existan disparidades económicas significativas entre las diferentes áreas de la ciudad. A menudo, las economías urbanas se caracterizan por una distribución desigual de la riqueza. Además, el PIB total no tiene en cuenta el tamaño de la población, lo que lo convierte en una medida imperfecta del poder adquisitivo individual. Alcaldías con poblaciones grandes podrían tener un PIB total alto pero un PIB per cápita más bajo. Por ello, el poder adquisitivo individual se comprende mejor al analizar la cantidad de riqueza generada por habitante, lo que permite una evaluación más precisa de las condiciones socioeconómicas locales.

De acuerdo con datos de la Secretaría de Desarrollo Económico (Sedeco), la aportación porcentual del PIB local por alcaldía es la siguiente:

Figura 4.

Gráfica de aportación al PIB local



Densidad poblacional

La densidad poblacional de la Ciudad de México es un indicador clave para comprender la distribución territorial y los desafíos de la urbanización en la capital del país. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020, la ciudad alcanzó una densidad promedio de 6 163.3 habitantes por kilómetro cuadrado (INEGI, 2020a). No obstante, esta cifra promedio oculta marcadas desigualdades entre las distintas demarcaciones territoriales.

En el extremo más alto se encuentran Iztacalco, Cuauhtémoc y Benito Juárez, con densidades superiores a 16 000 habitantes por kilómetro cuadrado, seguidas por Iztapalapa, que, además de ser la alcaldía más poblada, concentra casi dos millones de habitantes en poco más de 117 kilómetros cuadrados (INEGI, 2020b). Por el contrario, Milpa Alta, Tlalpan y Cuajimalpa registran densidades muy bajas, inferiores a 3 000 habitantes por kilómetro cuadrado en algunos casos, debido a la presencia de extensas áreas rurales y de conservación (INEGI, 2020b).

Tabla 1.*Densidad poblacional por alcaldía en la CDMX (Censo2020).*

Alcaldía	Población 2020	Densidad (hab/km²)
Iztacalco	404,695	17,369
Cuauhtémoc	545,884	16,848
Benito Juárez	434,153	16,303
Iztapalapa	1,835,486	15,687
Venustiano Carranza	443,704	13,284
Azcapotzalco	432,205	12,840
Gustavo A. Madero	1,173,351	12,473
Coyoacán	614,447	11,295
Miguel Hidalgo	414,470	8,820
Álvaro Obregón	759,137	7,894
Tláhuac	392,313	4,597
Xochimilco	442,178	3,624
Magdalena Contreras	247,622	3,320
Cuajimalpa	217,686	2,689
Tlalpan	699,928	2,243
Milpa Alta	152,685	668

Otros indicadores económicos relevantes

El Índice de Bienestar Social en la Ciudad de México (IBS-CDMX) clasifica a Benito Juárez, Miguel Hidalgo, Azcapotzalco y Coyoacán con los puntajes más altos, categorizándolos como de “Bienestar Social Muy Alto”. Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Iztacalco y Álvaro Obregón se sitúan en la categoría de “Bienestar Social Alto”. En contraste, Milpa Alta, Xochimilco y Tláhuac presentan los puntajes más bajos, con un “Bienestar Social Bajo” (Informe Económico del Distrito Federal). Los puntajes del IBS, que consideran ingresos, educación, salud y otras dimensiones de bienestar, se correlacionan fuertemente con el poder adquisitivo. El alto ranking de Benito Juárez y Miguel Hidalgo es significativo. Un mayor bienestar social generalmente implica mejores condiciones económicas y acceso a recursos.

La información recolectada se almacenó en una base de datos relacional en Excel. Para los años en los que no se disponía de información completa, se aplicó el método de interpolación por splines cúbicos para estimar los valores faltantes. Esta técnica permitió generar una curva suave y continua que se

ajusta a los puntos de datos existentes, proporcionando estimaciones realistas y coherentes para la generación de RSU y de las variables socioeconómicas en los años intermedios. Este proceso se llevó a cabo utilizando un software en Python especializado, que asegura la precisión de los cálculos.

Todos los datos, tanto los recolectados como los interpolados, se consolidaron en una única base de datos maestra en formato de hoja de cálculo. Ésta sirvió como fuente de información para todos los análisis posteriores.

Tabla 2.

Datos de residuos, PIB per cápita y densidad poblacional por alcaldía y año

Alcaldía	Año	Residuos (ton/día)	PIB PER CÁPITA (PESOS)	Densidad (hab/ha)
Milpa Alta	2008	102	16280727	471
Milpa Alta	2009	105	17707857	485
Milpa Alta	2010	110	18762157	486
Milpa Alta	2011	78	19080529	605
Milpa Alta	2012	113	19475777	493
Milpa Alta	2013	116	19435359	471
Milpa Alta	2014	117	19692905	473
Milpa Alta	2015	118	20322960	475
Milpa Alta	2016	119	20487832	462
Milpa Alta	2017	120	20809880	437
Milpa Alta	2018	121	20992854	409
Milpa Alta	2019	122	20775531	387
Milpa Alta	2020	169	18731375	380
Milpa Alta	2021	172	19002560	397
Milpa Alta	2022	175	22694437	447
Milpa Alta	2023	178	29700051	539
Magdalena	2008	231	8670791	3763
Magdalena	2009	239	9556226	3777
Magdalena	2010	245	10247359	3844
Magdalena	2011	196	10537845	3172
Magdalena	2012	249	10870595	3737
Magdalena	2013	251	10960831	3816

Alternativas para la gestión de residuos sólidos en entornos más pequeños

En la CDMX se asientan dos de las instituciones (Instituto Politécnico Nacional y Universidad Nacional Autónoma de México) con la mayor matrícula del país, incluyendo el nivel medio superior. Sus fuentes oficiales indican que ambos suman un aproximado de 626, 000 estudiantes y aproximadamente 90% se encuentra matriculado en la CDMX. Debido a eso, dichas instalaciones sirven como área de estudio de la gestión de los residuos urbanos de una población que tiene mayor acceso a la información de educación ambiental. En ciertas investigaciones se menciona que se ha identificado la “falta de cultura de la no basura” y la baja sensibilidad de la comunidad estudiantil, lo que resulta en la pérdida de materiales con potencial de reciclaje.

Surge una pregunta: ¿por qué nos cuesta tanto separar la basura?

Para que cualquier plan de recolección de RSU en la UNAM o el IPN funcione, no basta con poner botes de colores; hay que entender qué pasa por la cabeza de la comunidad estudiantil y administrativa. Pensando de esta forma, surgen elementos clave que explican por qué fallan los programas y cómo podemos atacarlos.

- Romper la ilusión mágica: vivimos desconectados; tiramos algo y creemos que “alguien más” o la tecnología lo resolverá mágicamente. En la universidad, la estrategia debe mostrar a los estudiantes a dónde va su basura, para que asuman su responsabilidad.
- Salud mata conciencia: a veces el discurso de “salvar al planeta” no basta. Aguilar (2023) sugiere que la gente reacciona mejor y participa más cuando siente que la basura es un riesgo directo para su salud (focos de infección), no sólo un problema ecológico lejano.
- Cambio de chip: todo depende de cómo lo vemos. Si es “basura”, estorba; si es “residuo”, vale dinero. Hay que educar para que los estudiantes vean una botella o una cáscara como un recurso útil, no como suciedad.

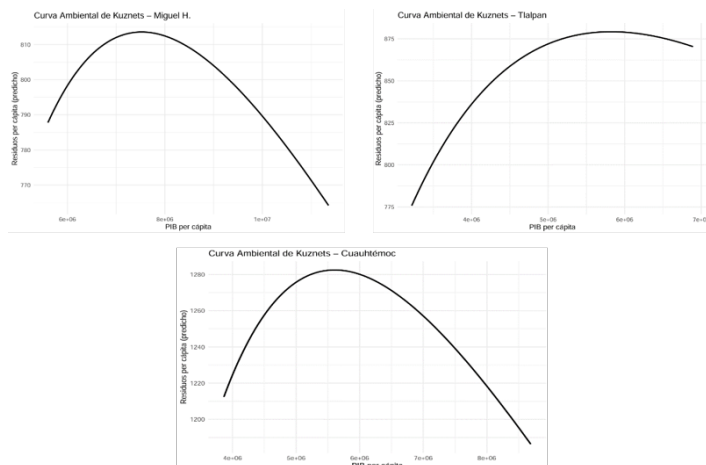
Resultados

Relación entre pib per cápita y generación de rsu por alcaldía: validación de la curva ambiental de Kuznets (cak)

Este apartado presenta los resultados del análisis estadístico y gráfico para evaluar la existencia de una relación tipo CAK entre el PIB per cápita y la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) en las 16 alcaldías de la CDMX. Los datos se procesaron mediante Python + pandas y R, y se visualizaron con ggplot2.

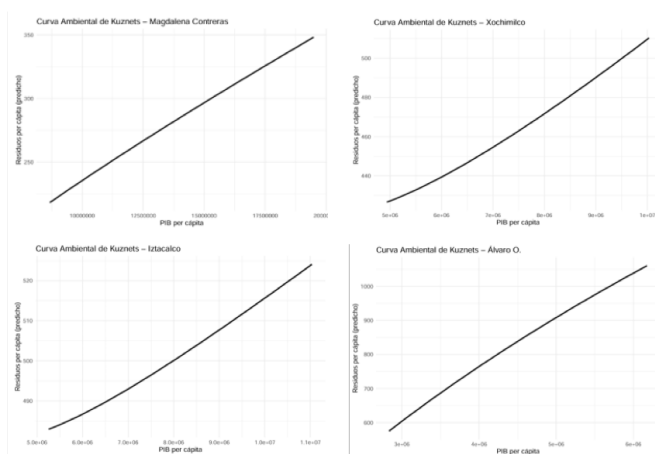
En las alcaldías Cuauhtémoc, Tlalpan y Miguel Hidalgo se observa una curva en forma de U invertida (gráfica 3), en la que la generación de RSU aumenta con el ingreso hasta un punto de inflexión (~\$5.5 millones anuales), para luego disminuir. Esto coincide con la teoría de la CAK: a mayor desarrollo económico, se implementan políticas de sostenibilidad que reducen la generación per cápita.

Figura 5.
Curva de Kuznets de ciertas alcaldías



En La Magdalena Contreras, Iztacalco, Xochimilco y Álvaro Obregón, la generación de RSU crece casi linealmente con el ingreso. Esto sugiere que no se ha alcanzado el umbral de desarrollo necesario para activar mecanismos de reducción de residuos, posiblemente debido a los altos niveles de desigualdad o a la falta de infraestructura sostenible.

Figura 6.
Curva de Kuznets de ciertas alcaldías



Las restantes alcaldías muestran una dispersión significativa de los datos, sin un patrón claro o, en otro caso, una curva en forma de U que abre hacia arriba. Factores como la baja densidad poblacional o la recolección informal podrían explicar esta variabilidad; también hay factores que no hemos integrado que podrían causar estos resultados, tales como: tipo de actividad económica, patrones de consumo, tasa de urbanización, corrupción y mala gobernanza, et-
cétera.

Figura 7.

Curva de Kuznets de ciertas alcaldías

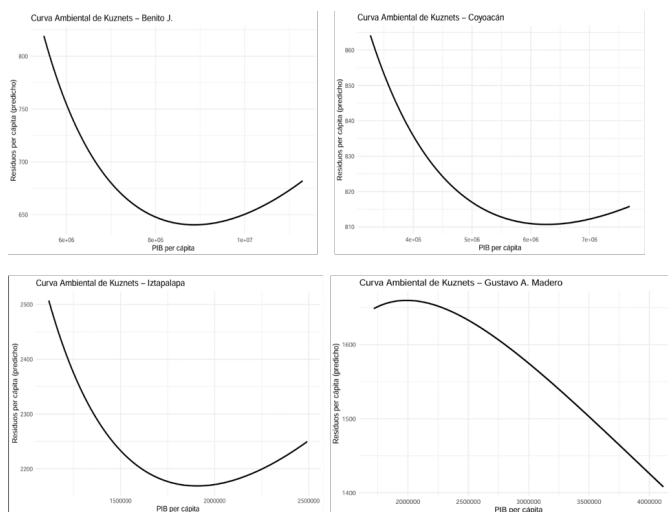


Tabla 3.

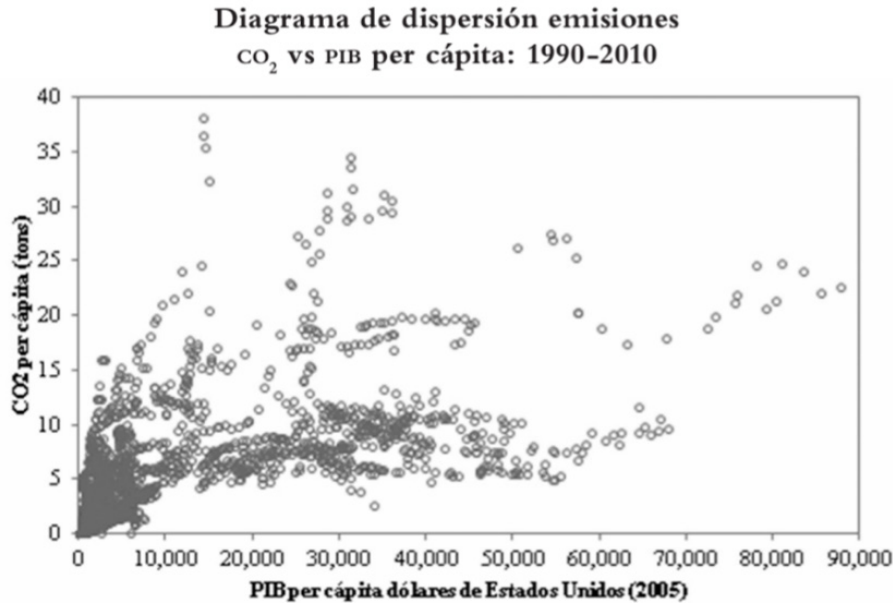
Síntesis general de resultados

Patrón CAK	Alcaldías	PIB per cápita en punto de inflexión	Implicaciones
U invertida	Cuauhtémoc, Tlalpan y Miguel Hidalgo.	~\$5.5 millones anuales	Madurez en políticas ambientales.
Semilineal positiva	La Magdalena Contreras, Izta-calco, Xochimilco y Álvaro Obregón	N/ A	Urgencia de intervención pública.

U normal	Cuajimalpa, Benito Juárez, Coyoacán e Iztapalapa	N/ A	Necesidad de estudios cualitativos.
Sin patrón claro	Alcaldías restantes	N/ A	Necesidad de estudios cualitativos.
<i>Notas: elaborado por los autores (2025).</i>			

Comparando estos resultados con los obtenidos por Catalán (2014), quien se basó en EE. UU., vemos que se verifica la existencia de la curva de Kuznets; más aún, las economías en vías de desarrollo muestran una correlación robusta entre el crecimiento y las emisiones, mientras que, en cierto punto, los países desarrollados no muestran una mitigación de emisiones per cápita, de hecho, se mantienen constantes.

Figura 8.
Diagrama de dispersión emisiones CO2 VS PIM per cápita: 1990-2010



Nota. Retomado de Horacio Catalán (2014)

Más allá de los números: las matemáticas revelan la hipocresía ambiental

Para que cualquier modelo matemático funcione —incluyendo la CAK—, necesitamos datos reales que alimenten las ecuaciones. Jiménez-Carrasco y Segura-Salazar (2024) proponen una fórmula real para medir qué tan “verde” es una persona. Los autores construyeron un Índice de Preocupación, Conciencia y Acción (IPCA) que funciona como una escala del 0 al 1, donde 1 sería el ciudadano ecológico perfecto. Se encontró algo que rompe con la lógica de “a mayor educación, menor contaminación” que a veces se asume en los modelos económicos. Resulta que los universitarios obtuvieron una puntuación muy alta en preocupación (0.90), lo que significa que saben que el mundo tiene problemas y les angustia. Sin embargo, cuando la fórmula midió sus acciones reales, el número bajó a 0.75.

Más aún, se confirmó que, tal como sugiere la teoría económica, sin el nivel de ingreso adecuado, la conciencia ambiental no logra transformarse en acciones tangibles. De hecho, en Jiménez-Carrasco y Segura-Salazar (2024) se menciona que una de las razones por las que los estudiantes no compran productos ecológicos es el poder adquisitivo, ya que suelen ser más caros.

Conclusiones

El estudio evidencia que la curva de Kuznets ofrece un marco teórico relevante para analizar la relación entre el desarrollo económico y la generación de RSU en la Ciudad de México.

Sin embargo, el hecho de que haya factores no detectables en los datos puede afectar la precisión en los estimadores, lo que plantea la necesidad de aplicar enfoques metodológicos más sólidos para garantizar una mejor consistencia y validez de los resultados.

Si bien la literatura respalda la existencia de la CKR en diversos contextos, su aplicación específica en la CDMX revela vacíos que requieren mayor investigación, particularmente en la integración de factores socioeconómicos y políticos no considerados en el modelo tradicional. A pesar de estas limitaciones, los hallazgos proporcionan información valiosa para diseñar políticas públicas más efectivas, orientadas a eliminar el vínculo entre el crecimiento económico y la generación de residuos, y a promover un manejo sostenible de los mismos.

En conclusión, este trabajo no sólo contribuye a la discusión académica sobre la CAK en entornos urbanos complejos, sino que abre camino para futuras investigaciones que incorporen variables adicionales y estrategias de optimización logística (como el TSP) para una mejor gestión de residuos en la capital mexicana.

Referencias

- Abrete, G. y Ferraris, M. (2010). La curva ambiental de Kuznets en el sector de residuos sólidos urbanos [The Environmental Kuznets Curve in the Municipal Solid Waste Sector] [Documento de trabajo, HERMES]. https://www.hermesricerche.it/elements/WP_10_1_AF.pdf
- Aguilar-Rodríguez, M. E. (2023). Aprendizajes sociales relacionados con la gestión de residuos en la población adulta [Social learnings related to waste management in the adult population]. *Eduscientia. Divulgación de la Ciencia Educativa*, 6(12), 194–207.
- Baltagi, B. H. (2005). *Econometría [Econometrics]* (3.^a ed.). Springer-Verlag.
- Benítez-Bravo, R., Gómez-González, R., Rivas-García, P., Botello-Álvarez, J. E., Huerta-Guevara, O. F., García-León, A. M. y Rueda-Avellaneda, J. F. (2021). Optimización de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en un contexto latinoamericano [Optimization of municipal solid waste collection routes in a Latin-American context]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 71(11), 1415–1427. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1957040>
- Botello-Álvarez, J. E., Rivas-García, P., Fausto-Castro, L., Estrada-Baltazar, A. y Gómez-González, R. (2018). Recolección informal, reciclaje y exportación de residuos valiosos como factor trascendental en la gestión de residuos sólidos urbanos: una realidad latinoamericana [Informal collection, recycling and export of valuable waste as transcendental factor in the municipal solid waste management: A Latin-American reality]. *Journal of Cleaner Production*, 182, 485–495.
- Catalán, H. (2014). Curva ambiental de Kuznets: implicaciones para un crecimiento sustentable [Environmental Kuznets curve: implications for sustainable growth]. *Revista Científica Economía Informa*, 24.
- Cavalheiro, E. A., Pierre, F., Rodriguez, A. M., Thue, P. S. y Kontz, L. B. (2023). Causalidad de Granger y curva ambiental de Kuznets: un análisis de la relación entre recolección de residuos sólidos urbanos, ingreso per cápita y PIB per cápita en Brasil [Granger Causality and Kuznets Environmental Cur-

- ve: An Analysis of the Relationship between Municipal Solid Waste Collection, Per Capita Income and GDP Per Capita in Brazil]. *International Journal of Managerial Studies and Research (IJMSR)*, 11(6), 24–35. <https://doi.org/10.20431/2349-0349.1106004>
- Díaz Del Águila, C. R. y Rodríguez Guirola, J. H. (2019). Alternativas para la gestión de residuos sólidos en la Universidad Católica de El Salvador [Alternatives for solid waste management at the Universidad Católica de El Salvador]. *Anuario de Investigación*, 8, 123–133.
- Evalúa CDMX. (2018). Índice de Bienestar Social de la Ciudad de México [Social Wellbeing Index of Mexico City] [Presentación]. <https://evalua.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Archivos/Seminario%202018%20sistema%20bienestar%20social/1presnetacion2ibsd-r-oscar-evaluacdmx.pdf>
- Gobierno del Distrito Federal. (2010). Informe Económico del Gobierno del Distrito Federal [Economic Report of the Federal District Government]. https://servidoresx3.finanzas.cdmx.gob.mx/egresos/Proy_2010/desempEconomico2010.pdf
- Greene, W. H. (2000). *Análisis econométrico [Econometric Analysis]* (4.^a ed.). Prentice Hall.
- Gutiérrez Espinosa, I. (2018). *Uso de algoritmos heurísticos para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos [Use of heuristic algorithms for the design of urban solid waste collection routes]* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Tulancingo]. Repositorio Institucional UPT.
- Hsiao, C. (2003). *Análisis de datos de panel [Analysis of Panel Data]* (2.^a ed.). Cambridge University Press.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020a). Censo de Población y Vivienda 2020. Panorama sociodemográfico de la Ciudad de México [2020 Population and Housing Census. Sociodemographic panorama of Mexico City]. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020b). Censo de Población y Vivienda 2020. Fichas por alcaldía de la Ciudad de México [2020 Population and Housing Census. Sheets by municipality of Mexico City]. INEGI.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). Indicadores Económicos de la Ciudad de México [Economic Indicators of Mexico City]. Secretaría de Desarrollo Económico de la CDMX/INEGI. <https://www.sedeco.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/indicadores-economicos-de-la-cdmx.pdf>
- Jiménez-Carrasco, J. y Segura-Salazar, C. (2024). Educación ambiental universitaria y sustentabilidad: Brecha entre preocupación y acción [University environmental education and sustainability: Gap between concern and action]. *Revista Investigium IRE: Ciencias Sociales y Humanas*, 15(2), 55–69. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.241502.04>
- Konat, G., Dürrü, Z. y Han, A. (2024). Investigación de la hipótesis de la curva de Kuznets de residuos en países seleccionados de la UE miembros de la OECD: análisis de datos de panel [Investigation of waste Kuznets curve hypothesis in selected OECD member EU countries: Panel data analysis]. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*. <https://doi.org/10.54688/ayd.1473301>
- López-Ibáñez, M. y Blum, C. (2010). Beam-ACO para el problema del viajante con ventanas de tiempo [Beam-ACO for the travelling salesman problem with time windows]. *Computers & Operations Research*, 37(9), 1570–1583. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.015>
- Secretaría de Desarrollo Económico. (s. f.). La actividad económica de la Ciudad de México [The economic activity of Mexico City]. Gobierno de la Ciudad de México. <https://www.sedeco.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/evolucion-de-la-actividad-economica-cdmx.pdf>
- Trujillo Lora, J. C., Carrillo Bermúdez, B., Charris Vizcaíno, C. A. e Iglesias Pinedo, W. J. (2013). La curva ambiental de Kuznets (EKC): un análisis de residuos sólidos enterrados en Colombia [The environmental Kuznets curve (EKC): An analysis of landfilled solid waste in Colombia]. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 21(2), 7–16.
- Yu, Z. (2021). Evaluación de las curvas de Kuznets ambientales para residuos sólidos industriales en China [Assessment of environmental Kuznets curves for industrial solid waste in China] [Tesis de maestría, Cornell University]. Cornell Theses and Dissertations.

Anexos

AÑO	PIB de la CDMX (MILLONES DE PESOS)	Población por año	Azcapotzalco	Coyoacán	Cuajimalpa	Gustavo A. Madero	Iztacalco	Iztapalapa	Magdalena Milpa Alta	Álvaro Obregón	Tláhuac	Tlalpan	Xochimilco	Benito Júarez	Cuauhtémoc	Miguel Hidalgo	Venustiano Carranza	
2008	\$2,037,419.00	2008	417958	622986	181886	1186170	387534	1821139	234975	125143	718922	355617	632703	412427	370881	527361	363772	436921
2009	\$2,265,313.00	2009	416138.97	621626	184193	1185682	385718	1818764	237051	127927	723006	358143	641643	413886	377921	525681	368171	433776
2010	\$2,450,000.00	2010	414711	620416	186391	1185772	384326	1815786	239086	130582	727034	360265	650567	415007	385439	531831	372889	430976
2011	\$2,540,000.00	2011	413720	619346	188551	1186236	383407	1812581	241036	133120	730983	362132	659296	415948	393194	534066	377820	428626
2012	\$2,640,000.00	2012	413215	618407	190741	1186867	383012	1809523	242857	135553	734829	363896	667654	416865	400947	536239	382859	426817
2013	\$2,680,000.00	2013	413240	617589	193031	1187462	383191	1806990	244507	137883	738550	365706	675465	417915	408459	538303	387902	425650
2014	\$2,760,000.00	2014	413844	616883	195490	1187815	383993	1805357	245943	140152	742123	367713	682550	419256	415489	540214	392843	425224
2015	\$2,880,000.00	2015	415071	616278	198188	1187720	385468	1804998	247120	142342	745523	370067	688733	421044	421799	541923	397577	425636
2016	\$2,960,000.00	2016	416970	615766	201195	1186973	387667	1806291	247996	144476	748729	372919	693837	423435	427149	543386	401999	426984
2017	\$3,050,000.00	2017	419586	615337	204578	1185367	390639	1809610	248527	146585	751716	376420	697686	426588	431298	544556	406005	429366
2018	\$3,120,000.00	2018	422966	614980	208408	1182699	394434	1815332	248671	148622	754462	380718	700102	430658	434009	545386	409488	432882
2019	\$3,130,000.00	2019	427156	614687	212754	1178762	399103	1823832	248384	150658	756943	385966	700908	435802	435040	545831	412345	437628
2020	\$2,860,000.00	2020	432205	614447	217686	1173351	404695	1835486	247622	152685	759137	392313	699928	442178	434153	545844	414470	443704
2021	\$2,940,000.00	2021	438156	614252	223272	1166261	411260	1850669	246343	154716	761020	399910	696985	449942	431108	545379	415758	451207
2022	\$3,557,648.00	2022	445059	614090	229583	1157288	418848	1869758	244503	156763	762568	408907	691901	459252	425665	544389	416104	460236
2023	\$4,717,467.00	2023	452958	613954	236687	1146225	427510	1893127	242059	158837	763760	419454	684500	470263	417585	542829	415403	470888

Derechos de Autor© 2026 De la Cruz-Márquez, Bernardino; Martínez-Rodríguez, María Concepción; Domínguez-Solís, Diego.



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.