



Serie de orientaciones técnicas de GAIA para responsables políticos y financieros sobre medidas rápidas en materia de residuos y metano

Basura Cero como Solución Eficaz: Evitar el Calentamiento que Provoca la Incineración

Resumen ejecutivo

A medida que las temperaturas globales siguen aumentando, la reducción de las emisiones de metano se ha convertido en una prioridad mundial urgente. El metano atrapa más de 80 veces más calor que el dióxido de carbono (CO₂) en un período de 20 años y es responsable de aproximadamente una cuarta parte del calentamiento global actual.^{1,2} El sector de los residuos, en particular la descomposición incontrolada de los residuos orgánicos en rellenos sanitarios y vertederos, es uno de los principales contribuyentes a las emisiones globales de metano. En respuesta a ello, las ciudades y países están **impulsando cada vez más reformas del sector de los residuos como parte de sus estrategias climáticas.**

Este informe evalúa los impactos a largo plazo sobre el calentamiento global de tres estrategias de gestión de residuos: las prácticas habituales basadas en la eliminación, como el vertido y el relleno sanitario (BAU, por sus siglas en inglés), la incineración y las prácticas Basura Cero, como la separación en origen y el tratamiento de los residuos orgánicos y reciclables (ZW). El análisis se centra en tres contextos urbanos: Lagos (Nigeria), Barueri (Brasil) y Quezon City (Filipinas). Utilizando la herramienta de estimación de emisiones de residuos sólidos (SWEET) y el modelo climático de respuesta impulsiva de amplitud finita (FaIR), el análisis calcula los impactos previstos en la temperatura para cada estrategia hasta 2060.

Al modelar los resultados reales del calentamiento en lugar de basarse únicamente en métricas de emisiones como el dióxido de carbono equivalente (CO₂e), este enfoque evita las distorsiones contables habituales. Estas métricas comprimen los diferentes ciclos de vida y los impactos sobre el calentamiento de gases como el metano, de vida corta, y el CO₂, de vida larga, en un único valor, lo que oculta los efectos climáticos a corto plazo. **Al modelar directamente los resultados de la temperatura, este análisis ofrece una imagen más clara y relevante para las políticas de cómo las diferentes intervenciones en materia de residuos configuran realmente las trayectorias climáticas a lo largo del tiempo.**

Principales conclusiones

- Basura Cero supera sistemáticamente a la incineración y al BAU en las tres ciudades, logrando las mayores reducciones del calentamiento a largo plazo. En Quezon City y Lagos, la estrategia de Basura Cero permite evitar hasta nueve veces más calentamiento que la incineración para 2060, lo que equivale a retirar más de 11 millones y 100 millones de coches de circulación durante un año en Quezon City y Lagos, respectivamente. En Barueri, donde el escenario de incineración supone un caso inusualmente favorable en el que se quema el 100 % de los residuos de la ciudad, mucho más que en las incineradoras municipales típicas, Basura Cero sigue obteniendo un rendimiento casi un 40 % mejor, lo que evita un calentamiento equivalente al causado por más de 650.000 coches circulando durante un año.
- La incineración proporciona beneficios climáticos modestos o insignificantes, principalmente por la reducción a corto plazo del metano. Estas ventajas se ven finalmente superadas por las emisiones de CO₂ de larga duración procedentes de la quema de materiales orgánicos y reciclables.
- Para alcanzar niveles de incineración exhaustivos, Quezon City necesitaría construir tres incineradoras adicionales, mientras que Lagos necesitaría construir siete más, lo que equivale a 4 y 8 veces sus capacidades de incineración previstas, respectivamente. Dado el alto costo, la resistencia política y los largos plazos asociados con la construcción de una sola instalación, tal expansión no solo es poco realista, sino también mucho menos eficaz que ampliar las estrategias Basura Cero.
- Las estrategias Basura Cero minimizan las emisiones de metano y CO₂ mediante la separación en origen, el compostaje, el reciclaje y la reducción de la dependencia de los rellenos sanitarios o la combustión. Estos beneficios se acumulan con el tiempo, especialmente a medida que el CO₂ se convierte en el principal factor del calentamiento a medio y largo plazo. La incorporación de estrategias de prevención, reparación y reutilización de residuos en las fases iniciales, que no se incluyeron en este análisis, mejoraría aún más el rendimiento del escenario Basura Cero.
- La diferencia de rendimiento entre Basura Cero y la incineración aumenta con el tiempo. A medida que las ciudades crecen y aumentan los volúmenes de residuos, los beneficios climáticos a largo plazo de la Basura Cero se hacen más significativos.

Este análisis confirma que Basura Cero ofrece la vía más eficaz y alineada con el clima para abordar las emisiones del sector de los residuos. Al reducir tanto el metano como el CO₂, respalda compromisos climáticos internacionales como el Compromiso Global sobre el Metano, el Acuerdo de París y la Declaración sobre la reducción del metano procedente de residuos orgánicos. La incineración, por el contrario, sólo ofrece reducciones de metano a corto plazo, al tiempo que impulsa el calentamiento a largo plazo debido a las emisiones persistentes de CO₂.

Índice

Resumen ejecutivo	2
Introducción	5
Resumen de la metodología	7
Resultados	9
Lagos, Nigeria	9
Quezon City, Philippines	12
Barueri, Brazil	16
Conclusiones generales	21
Conclusión	24
Apéndice metodológico	25
Modelización de las emisiones con la herramienta de estimación de emisiones de residuos sólidos (SWEET)	25
Supuestos específicos de cada ciudad	27
Modelización climática con FairR	30
Equivalencias entre temperatura y coches	30
Referencias	36
Agradecimientos	38



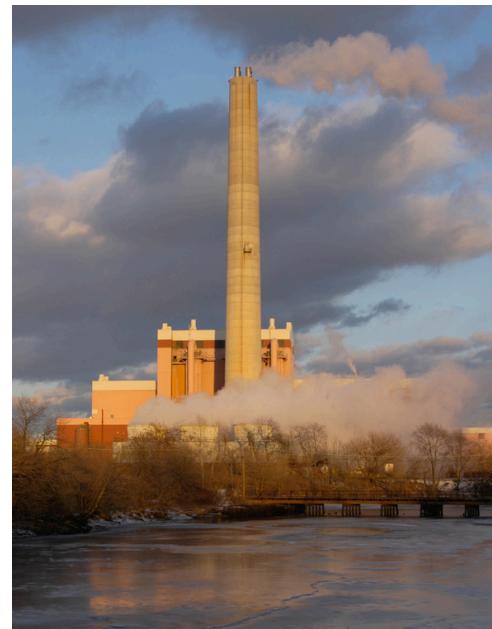
Introducción

A medida que se intensifica la crisis climática, la reducción del metano se ha convertido en una prioridad mundial fundamental para la mitigación del cambio climático a corto plazo. El metano es un potente gas de efecto invernadero, más de 80 veces más potente que el dióxido de carbono en un periodo de 20 años, y es responsable de aproximadamente el 20-30 % del calentamiento global observado hasta la fecha.^{1,2} En respuesta, los países se han comprometido a alcanzar ambiciosos objetivos de metano en el marco de iniciativas como el Compromiso Global sobre el Metano, el Acuerdo de París y la Declaración sobre la Reducción del Metano procedente de Residuos Orgánicos, adoptada en la COP29. Estos esfuerzos han situado al sector de los residuos, responsable de aproximadamente el 20% de las emisiones antropogénicas de metano,^{3,4} bajo un escrutinio y una presión política cada vez mayores.

El metano del sector de los residuos se genera principalmente a través de la descomposición de materiales orgánicos en rellenos sanitarios y vertederos con falta de oxígeno (también conocida como descomposición anaeróbica), muchos de los cuales siguen estando mal gestionados o totalmente sin control. En las ciudades en rápida urbanización del Sur Global, los sistemas de residuos suelen depender del vertido abierto y la quema a nivel doméstico, con una cobertura limitada de los servicios de recogida formales. Estas condiciones suponen tanto una responsabilidad medioambiental como una oportunidad crítica de intervención. Como resultado, es cada vez más importante evaluar el papel de los residuos en los compromisos climáticos nacionales, una necesidad que se aborda en otras publicaciones.⁵

Sin embargo, el enfoque adoptado para lograr la reducción de metano determinará si estas intervenciones aportan beneficios climáticos duraderos o si, por el contrario, consolidan daños a largo plazo. Los actores de la industria y algunos gobiernos nacionales han promovido la incineración de residuos, a menudo denominada “conversión de residuos en energía” (WTE, por sus siglas en inglés), como una solución rápida y tecnológicamente conveniente para las emisiones relacionadas con los rellenos sanitarios. Estas propuestas han ganado terreno en algunos planes de financiación climática y planes nacionales de residuos, especialmente en ciudades que luchan contra el aumento del volumen de residuos y la capacidad limitada de los rellenos sanitarios.

Si bien la incineración puede reducir las emisiones de metano de los rellenos sanitarios al desviar los residuos orgánicos de los vertederos y basureros, introduce emisiones significativas de dióxido de carbono, tanto biogénico como fósil, que tienen un mayor impacto en el calentamiento global a largo plazo.



Estas emisiones de CO₂ contribuyen al calentamiento atmosférico de larga duración, contrarrestando cualquier beneficio a corto plazo derivado de la reducción del metano. Además, las incineradoras socavan los sistemas de prevención y reciclaje de residuos al requerir un flujo constante y sustancial de residuos combustibles. Esto desincentiva el desvío de los residuos orgánicos y la recuperación de los materiales reciclables durante toda la vida útil de la incineradora, excluyendo estas soluciones superiores durante décadas. En las ciudades donde los trabajadores informales ya realizan altos niveles de reciclaje y compostaje sin apoyo formal, la incineración amenaza además con desplazar los medios de vida y reducir la eficiencia general del sistema.⁶

Este informe evalúa los impactos a largo plazo sobre el calentamiento global de tres estrategias distintas de gestión de residuos: el escenario habitual (BAU, que se basa principalmente en el relleno sanitario o el vertido), la incineración y un escenario Basura Cero (ZW) que incorpora intervenciones clave como la separación en origen y el tratamiento de los residuos orgánicos y reciclables, en tres contextos urbanos: Lagos (Nigeria), Barueri (Brasil) y Quezon City (Filipinas). Si bien el escenario Basura Cero incluye estrategias básicas, como el compostaje y el reciclaje, no representa un sistema integral Basura Cero; en la modelización no se incluyeron enfoques ascendentes como la prevención, la reparación y la reutilización de residuos. Cada escenario se modeló utilizando la Herramienta de Estimación de Emisiones de Residuos Sólidos (SWEET) para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero, que luego se analizaron mediante un modelo climático simple llamado modelo de Respuesta de Impulso de Amplitud Finita (FAlR) para evaluar los impactos del calentamiento proyectados hasta 2060, un plazo coherente con la vida útil estándar de un relleno sanitario o una incineradora.

Resumen de la metodología

Las emisiones de gases de efecto invernadero para cada escenario modelado se estimaron utilizando la Herramienta de Estimación de Emisiones de Residuos Sólidos (SWEET), una calculadora desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para ayudar a las ciudades a comprender cómo las diferentes estrategias de gestión de residuos afectan a las emisiones a lo largo del tiempo.⁷ La SWEET tiene en cuenta una serie de métodos de tratamiento, entre los que se incluyen el vertido en rellenos sanitarios, el compostaje, el reciclaje y la incineración, y permite la personalización en función de la composición de los residuos y la infraestructura local. SWEET está diseñada para reflejar la diversidad de las prácticas de gestión de residuos en todo el mundo, incluidos los vertidos y la quema al aire libre. En SWEET, las emisiones de CO₂ biogénico procedentes de la incineración y la quema a cielo abierto se incluyen por defecto, mientras que el CO₂ biogénico procedente del relleno sanitario y el compostaje no se incluyen. Para garantizar la coherencia entre las diferentes vías, el CO₂ biogénico procedente del relleno sanitario y el compostaje se calculó por separado y se añadió a este análisis utilizando factores de emisión obtenidos de publicaciones revisadas por pares.

Las condiciones de los tres escenarios se pueden resumir de la siguiente manera:

- BAU: refleja las prácticas existentes, que varían según la ciudad e incluyen diferentes combinaciones de vertidos a cielo abierto, rellenos sanitarios (con o sin captura de gases de relleno), quema a cielo abierto, reciclaje limitado y gestión mínima de los residuos orgánicos.
- Incineración: refleja los volúmenes de residuos y las capacidades de las instalaciones descritas en las propuestas reales de incineradoras municipales y en los documentos de autorización de cada ciudad. Se supone que todos los materiales reciclables disponibles se desvían a la incineración para garantizar que los residuos se queman a una temperatura suficiente para mantener una combustión eficiente y estable.
- Basura Cero: utiliza la separación y la gestión en origen (compostaje/digestión anaeróbica, reciclaje), con objetivos fijados en un 80% de separación y tratamiento de los residuos orgánicos y entre un 40% y un 60% de captura de los materiales reciclables, en función de la composición de los residuos locales. En este escenario no se ha tenido en cuenta la reducción de residuos en fases previas debido a las limitaciones de la herramienta de modelización. Aunque estas tasas de desviación no reflejan un sistema Basura Cero, representan objetivos alcanzables basados en ejemplos del mundo real (véase el apéndice sobre metodología).

Las estimaciones de emisiones resultantes se utilizaron como datos de entrada para el modelo climático Finite Amplitude Impulse Response (FaIR), una herramienta utilizada por investigadores y responsables políticos para evaluar los impactos del calentamiento global de diferentes tipos de emisiones de gases de efecto invernadero.⁸ El modelo se ejecutó desde 2026 hasta 2060, reflejando la vida útil prevista de los principales proyectos de infraestructura de residuos, como rellenos sanitarios o incineradoras. El modelo se ejecutó utilizando el mismo conjunto de hipótesis climáticas y niveles de variabilidad en todos los escenarios y ciudades. A continuación, se compararon los resultados de temperatura absoluta entre sí para calcular el impacto relativo de los diferentes escenarios. El BAU se trata como la línea de referencia (línea cero en los gráficos de resultados), y los resultados de la incineración y Basura Cero se muestran como desviaciones de esa línea de referencia. En realidad, el BAU contribuiría al calentamiento global con el tiempo, pero este enfoque aísla el impacto climático relativo de la adopción de las diferentes estrategias.

El uso de FaiR de esta manera permite evaluar las estrategias de gestión de residuos modeladas en términos de impactos reales sobre el calentamiento de la temperatura media global. Si bien los inventarios de emisiones y la contabilidad de CO₂ e pueden ser útiles, no reflejan directamente cómo los diferentes gases contribuyen al cambio de temperatura a lo largo del tiempo. Las métricas de conversión, como el potencial de calentamiento global (PCG), comprimen los efectos del calentamiento de varios gases de efecto invernadero en un solo valor, pero pueden ocultar diferencias importantes en el comportamiento de los gases en la atmósfera, especialmente en escalas temporales más cortas. El metano, por ejemplo, es mucho más potente que el CO₂ a corto plazo, pero el CO₂ persiste en la atmósfera durante siglos. Esto dificulta la evaluación de las consecuencias reales para el calentamiento global de las estrategias que reducen un gas mientras aumentan otro. Al modelar la respuesta real de la temperatura en lugar de basarse en los valores de CO₂e, este enfoque ofrece un análisis más preciso y relevante para las políticas. Los resultados de temperatura se presentan en microgrados °C (millionésimas de grado Celsius) de calentamiento o enfriamiento en relación con el BAU, lo que refleja el impacto global de las estrategias locales de gestión de residuos.

En todos los escenarios, se asumió que la generación de residuos crecería a un ritmo constante basado en las tendencias demográficas, y no se incluyó ninguna reducción de residuos en las fases iniciales, aunque esto reforzaría aún más los beneficios del enfoque de Basura Cero en posibles análisis futuros. Las hipótesis clave sobre la cantidad de residuos que podrían desviarse o incinerarse se basaron en estudios locales, planes municipales, bibliografía académica y consultas a expertos. Para obtener información detallada sobre las fuentes de datos, el diseño de los escenarios y los datos técnicos del modelo, consulte el apéndice metodológico.



Resultados

Las diferencias de temperatura modeladas en relación con el escenario sin cambios revelan un patrón claro en las tres ciudades: **la ruta de Basura Cero ofrece, de manera sistemática, la mayor reducción del calentamiento**, superando tanto al escenario BAU como a la incineración en todos los casos.

Lagos, Nigeria

Población: ~21 millones

Generación de residuos: ~0,6 kg/persona/día

Métodos de eliminación primarios (BAU):

vertido a cielo abierto en el vertedero de Olusosun y otros sitios informales; quema a cielo abierto; recogida formal limitada; reciclaje informal por parte de recolectores de residuos; desviación mínima de residuos orgánicos

Resultados climáticos para 2060 (en relación con el BAU):

- **Incineración:** +5,4 microgrados °C
- **Basura Cero:** -209,1 microgrados °C

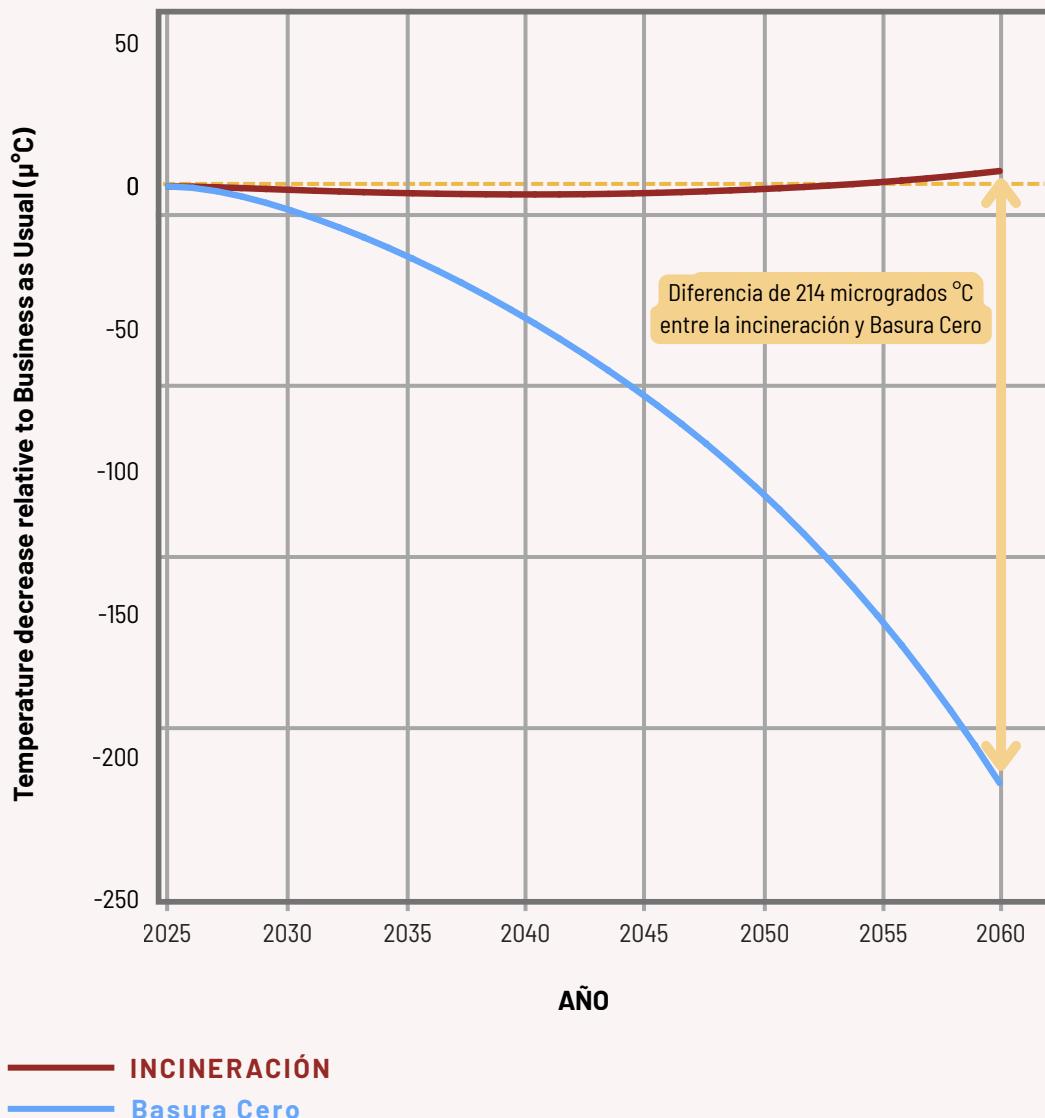
En Lagos, el escenario BAU modelado incluye emisiones significativas procedentes de la quema a cielo abierto, una práctica habitual en el vertedero principal de la ciudad y en las zonas circundantes. Ambos escenarios alternativos, incineración y Basura Cero, reducen el volumen de residuos enviados a vertederos abiertos y reducen la quema a cielo abierto de forma proporcional. Cabe señalar que, si bien la quema a cielo abierto produce CO₂ y emisiones atmosféricas nocivas, reduce las emisiones de metano de los residuos, mejorando así el rendimiento del escenario BAU estrictamente desde el punto de vista del calentamiento global.

El escenario de incineración, en el que la incineradora municipal prevista quemaría aproximadamente el 14 % de los residuos actuales de Lagos, muestra inicialmente una mejora modesta con respecto al BAU debido a la disminución de las emisiones de metano. Sin embargo, con el tiempo, las emisiones de CO₂ procedentes de la incineración se acumulan, los volúmenes de residuos aumentan mientras que la capacidad de incineración se

mantiene estable, y la tendencia se invierte. Para 2060, la incineración da lugar a un aumento de 5,4 microgrados °C en la temperatura en relación con el BAU. Por el contrario, el escenario Basura Cero supera sistemáticamente tanto al BAU como a la incineración en todo el período modelado. Para 2060, la vía Basura Cero, centrada en la separación en origen y el desvío de los residuos orgánicos, diverge significativamente, alcanzando una diferencia de temperatura de más de 200 microgrados °C por debajo del BAU. Las diferencias generales de calentamiento reflejan el efecto

combinado del desvío de residuos, la prevención de metano y la reducción de la quema al aire libre a lo largo del tiempo, y equivalen a retirar más de 100 millones de coches de la circulación durante un año (véase el apéndice sobre metodología para más detalles). Estos resultados refuerzan el valor de la separación en origen y el desvío de residuos orgánicos como estrategias climáticas más eficaces y duraderas que los enfoques basados en la combustión.

Para 2060, la estrategia Basura Cero evita un aumento significativo de la temperatura, mientras que la incineración de residuos contribuye al calentamiento global. Caso de estudio: Lagos, Nigeria.





CADA COCHE REPRESENTA
1,000,000 COCHES

LAGOS, NIGERIA

**i460 millones de
toneladas de CO₂
evitadas, el equivalente
a sacar 100 millones de
autos de circulación!**

Escenario	Gestión de residuos en 2060	Resultados climáticos para 2060
BAU	Vertidos y quema al aire libre con un desvío mínimo de residuos orgánicos y un reciclaje limitado	Referencia
Incineración con recuperación de energía	14% de los residuos enviados a incineradoras de valorización energética a partir de 2026*	+5,4 microgrados °C
Basura Cero	Separación en origen + compostaje 80% de los residuos orgánicos y reciclaje del 42% del total de materiales reciclables**	-209,1 microgrados °C

*Volúmenes de residuos incinerados basados en las capacidades previstas de las incineradoras propuestas, según se indica en las solicitudes de permisos, los documentos de planificación y las evaluaciones de impacto ambiental.

**Los objetivos de compostaje y reciclaje se basan en la composición del flujo de residuos y en los mejores objetivos de reciclaje por material, así como en consultas con expertos locales. Véase el apéndice sobre metodología para obtener más detalles.

Quezon City, Philippines

Población: ~3 millones

Generación de residuos: ~1,3 kg/persona/día

Métodos de eliminación primarios (BAU):

Recolección casi universal; eliminación en rellenos sanitarios municipales con sistemas de recolección de gases de relleno; altas tasas de reciclaje apoyadas principalmente por recolectores de residuos; desviación mínima de residuos orgánicos en sitios piloto y a pequeña escala.

Resultados climáticos para 2060 (en relación con el BAU):

- **Incineración:** -0,7 microgrados °C
- **Basura Cero:** -23,5 microgrados °C

En Quezon City, el escenario Basura Cero vuelve a ofrecer una ventaja climática clara y consistente tanto con respecto al BAU como a la incineración. Desde el inicio del período modelado en 2026, la estrategia Basura Cero reduce de forma constante el calentamiento año tras año, alcanzando una reducción de la temperatura de aproximadamente 23 microgrados °C con respecto al BAU en 2060. El escenario de incineración, por el contrario, sólo ofrece un beneficio climático marginal. La incineradora municipal prevista, diseñada para quemar aproximadamente el 25 % de los residuos de Quezon City, ofrece inicialmente una ligera reducción del calentamiento en comparación con el BAU. Sin embargo, este beneficio disminuye con el tiempo, y la trayectoria de la incineración se estabiliza y acaba invirtiendo su dirección en 2050, mientras que la vía la estrategia Basura Cero sigue ampliando la brecha.

Este cambio de tendencia se debe principalmente al hecho de que la capacidad de incineración no puede aumentar gradualmente con el aumento del volumen de residuos, mientras que las soluciones Basura Cero pueden crecer con el tiempo gracias a una mano de obra flexible y escalable en materia de reciclaje y compostaje, y a una infraestructura a pequeña escala.

Para 2060, la trayectoria de la incineración da lugar a una diferencia de calentamiento inferior a 1 microgrado Celsius, lo que la hace aproximadamente 30 veces menos eficaz que Basura Cero durante el mismo período. Si se ampliara el periodo de estudio y se mantuviera la tendencia actual, la incineración provocaría un calentamiento neto en relación con el BAU, mientras que el escenario Basura Cero seguiría reduciendo el calentamiento en relación con el BAU. El calentamiento evitado gracias a la aplicación de estrategias Basura Cero de este tipo equivale al que se conseguiría retirando más de 11 millones de coches de circulación durante un año.

Cabe señalar que el escenario BAU incluye sistemas de captura de gases de relleno sanitario en los rellenos sanitarios modelados. Si bien estos sistemas pueden reducir las emisiones de metano, están sujetos a limitaciones significativas, entre ellas la disminución de la eficiencia con el tiempo, la dependencia de un suministro constante de residuos orgánicos descomponibles para generar gas y el mantenimiento para evitar fugas y emisiones fugitivas.^{9,10} A medida que los rellenos sanitarios envejecen o reciben menos residuos, la producción de gas disminuye, lo que reduce la eficacia del sistema de captura y, en ocasiones, pone en peligro la continuidad de los sistemas de captura de LFG, en particular los que utilizan el gas capturado para producir energía, lo que entra en conflicto con los objetivos de reducción de residuos.^{11,12} Mientras tanto, la vía de la incineración evita algunas emisiones de metano al desviar los residuos orgánicos de los rellenos sanitarios, pero las sustituye por emisiones de CO₂ fósiles y biogénicas que se acumulan en la atmósfera y debilitan el beneficio climático general.

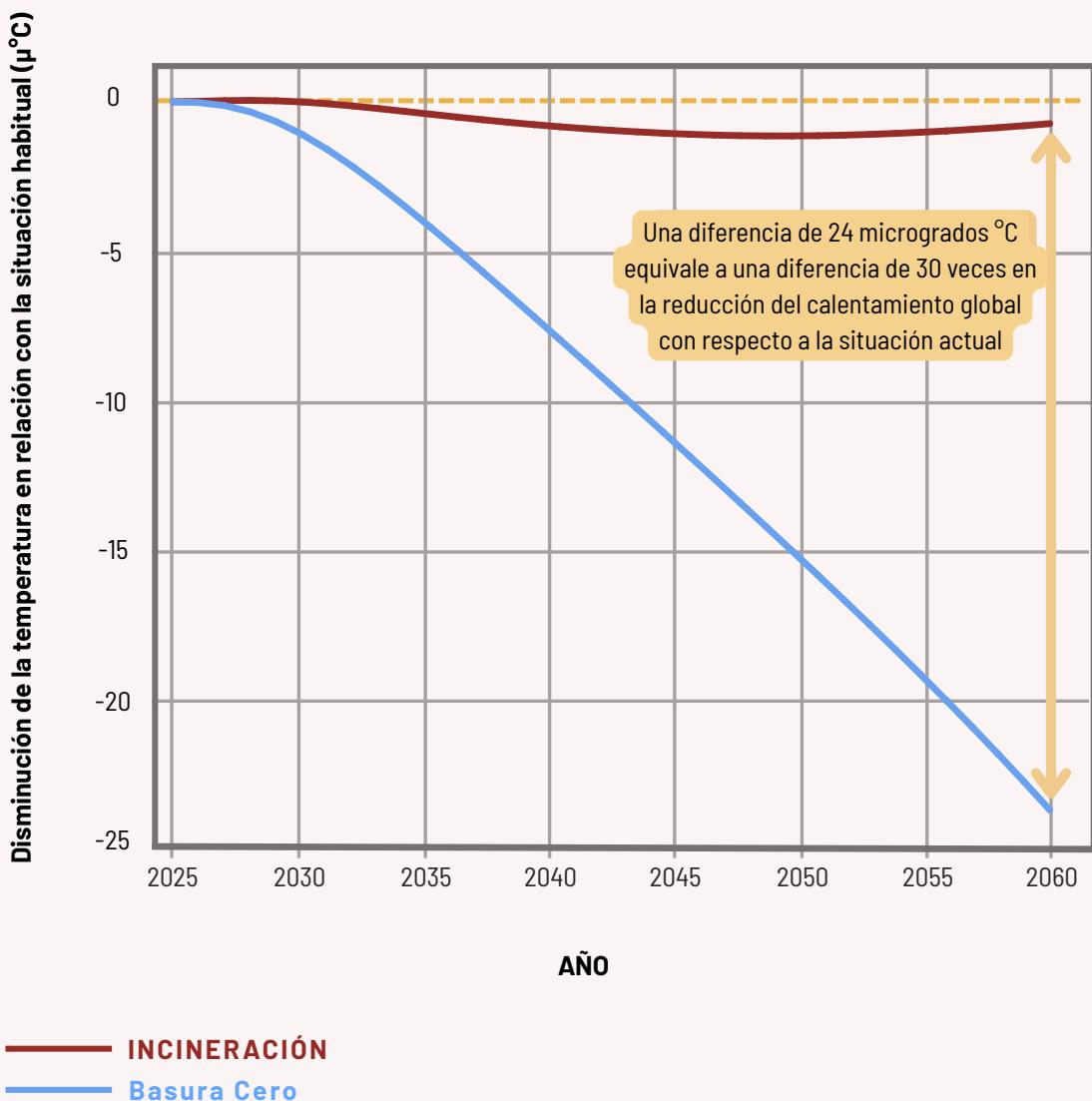
La estrategia Basura Cero evita tanto las emisiones de metano como las de CO₂ de larga duración al desviar los residuos orgánicos de los rellenos sanitarios y la incineración. Aunque existan sistemas de captura de gases de efecto invernadero, Basura Cero sigue ofreciendo el mejor rendimiento, lo que resalta la importancia de la separación en origen y el desvío de residuos.

Los resultados de Quezon City refuerzan que Basura Cero ofrece la vía más duradera para lograr impactos en el calentamiento desde el sector de los residuos.





Para 2060, Basura Cero será treinta veces más eficaz que la incineración de residuos para prevenir el calentamiento global.
Quezon City, Filipinas.





CADA COCHE REPRESENTA
200,000 COCHES

QUEZON CITY, PHILIPPINES

**i50,6 millones de
toneladas de CO₂
evitadas, equivalentes
a sacar 11 millones de
autos de circulación!**

Escenario	Gestión de residuos en 2060	Resultados climáticos para 2060
BAU	Relleno sanitario con captura de gases y recuperación de energía, gestión mínima de residuos orgánicos, altas tasas de reciclaje.	Referencia
Incineración con recuperación de energía	25% de los residuos enviados a incineradoras de valorización energética a partir de 2026*	-0,7 microgrados °C
Basura Cero	Separación en origen + compostaje 80% de los residuos orgánicos y reciclaje del 60% del total de materiales reciclables**	-23,5 microgrados °C

*Volúmenes de residuos incinerados basados en las capacidades previstas de las incineradoras propuestas, según se indica en las solicitudes de permisos, los documentos de planificación y las evaluaciones de impacto ambiental.

**Objetivos de compostaje y reciclaje basados en la composición del flujo de residuos, los mejores objetivos de reciclaje por material y la consulta con expertos locales. Véase el apéndice sobre metodología para obtener más detalles.

Barueri, Brazil

Población: ~300 000

Generación de residuos: ~0,8 kg/persona/día

Métodos de eliminación primarios (BAU):

Eliminación en un relleno sanitario sin captura de gases de relleno; servicios municipales de reciclaje limitados; los recolectores informales de residuos contribuyen a la recuperación de materiales, pero los residuos orgánicos siguen sin gestionarse en su mayor parte y se depositan en rellenos sanitarios.

Resultados climáticos para 2060 (en relación con el BAU):

- **Incineración:** -3,5 microgrados °C
- **Basura Cero:** -4,9 microgrados °C

El escenario BAU de Barueri incluye la recolección casi completa de residuos, pero no la gestión del metano de los rellenos sanitarios. Por lo tanto, ambos escenarios alternativos (incineración y Basura Cero) muestran reducciones sustanciales en las emisiones de metano simplemente al desviar los residuos orgánicos de los rellenos sanitarios.

Sin embargo, el escenario de incineración modelado para Barueri es atípico y representa un caso idealizado que es poco probable que se repita en otros lugares. Los informes de impacto ambiental y las solicitudes de permisos para la incineradora propuesta indican que la instalación está destinada a procesar los residuos de Barueri y de los municipios vecinos. Para tener en cuenta esta capacidad sobredimensionada propuesta, el escenario modelado en este análisis supone que, a partir de 2026, el 100% de los residuos municipales de Barueri se incineran. Esta elección de modelo es favorable a la incineración y no refleja las limitaciones técnicas, legales o regionales que rodean el proyecto.

Para empezar, el escenario también supone el desvío completo de los residuos orgánicos del relleno sanitario a la incineración, lo que introduce importantes desafíos técnicos. Los residuos orgánicos constituyen aproximadamente el 50% del flujo de residuos de Barueri y suelen tener un alto contenido de humedad, lo que reduce su potencial energético y la eficiencia de la combustión. En la práctica, las incineradoras que tratan residuos con alto contenido orgánico suelen necesitar combustibles fósiles suplementarios, como diésel o gas natural, para mantener temperaturas de combustión estables, lo que socava los beneficios medioambientales y energéticos que se les atribuyen. Si la incineradora excluye los residuos orgánicos húmedos para evitar estos problemas, no lograría reducciones significativas de metano.

Además, la incineradora propuesta, tal y como se ha modelado aquí, es legalmente incompatible con el artículo 9 de la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS, Ley n.º 12.305/2010) de Brasil, que establece una jerarquía de gestión que da prioridad a la prevención, la reutilización y el reciclaje de los residuos. La recuperación de energía sólo está prevista para los residuos residuales que no pueden recuperarse de otra manera. Las estimaciones sugieren que estos residuos no reciclables representan no más del 30 % de los residuos sólidos urbanos. La incineración de materiales reciclables u orgánicos contradice la intención de la ley, pone en peligro los objetivos de la economía circular y amenaza el papel de los recicladores en el sistema de reciclaje inclusivo de Brasil.

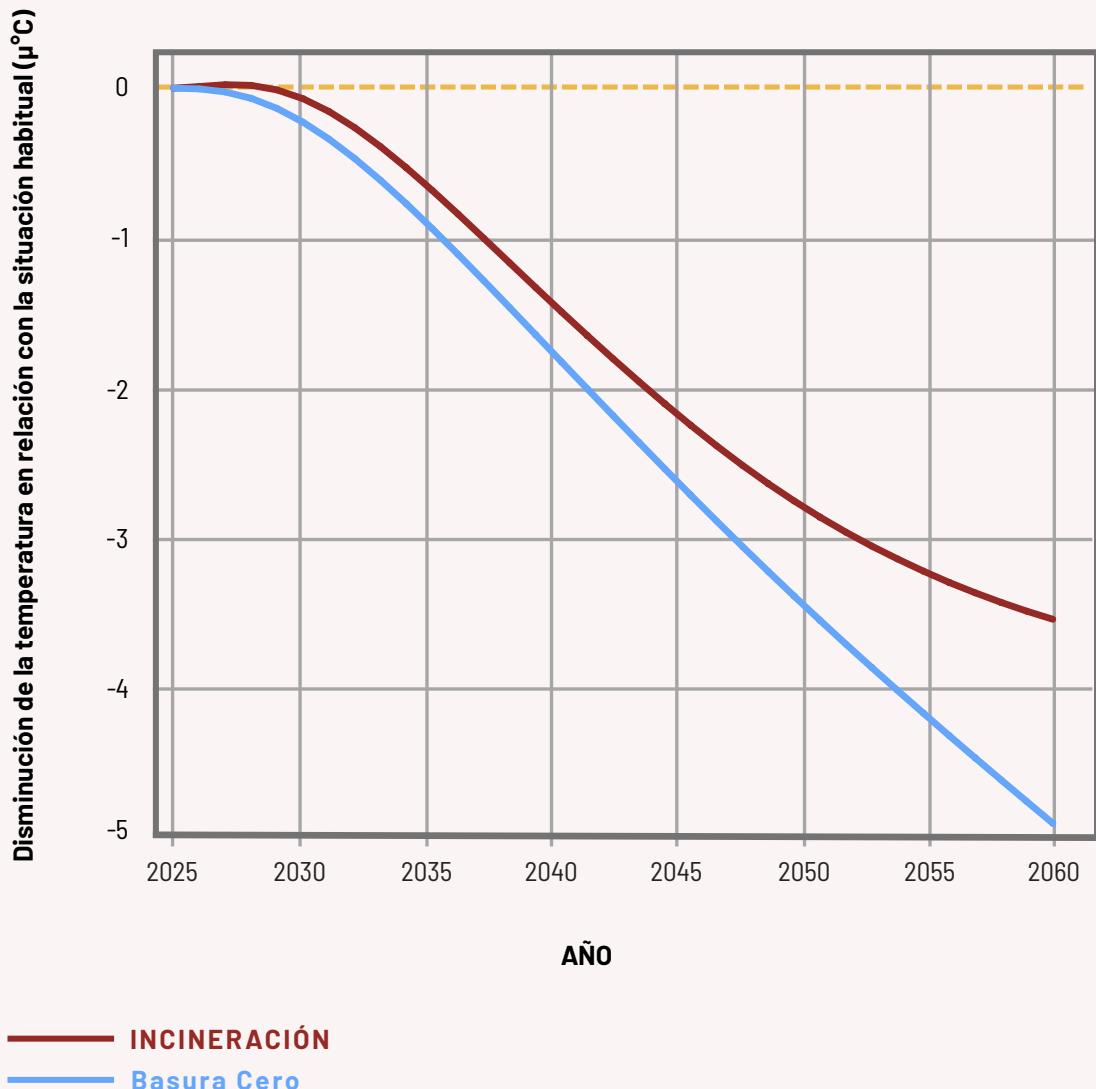
A pesar de estas limitaciones, el escenario se basa en las solicitudes de permisos y la documentación medioambiental presentada para la instalación propuesta. Representa una versión simplificada de lo que, en la práctica, sería una empresa difícil desde el punto de vista tecnológico, logístico y jurídico, si no inviable. El análisis modela el impacto climático de la quema del volumen de residuos especificado en los documentos del proyecto y lo compara con una trayectoria BAU y una alternativa Basura Cero. Esta simplificación tiene por objeto aislar el impacto previsto del calentamiento de la propia instalación, sin tener en cuenta los retos reales que plantea la aplicación de un sistema de este tipo.

Incluso con todas estas hipótesis inusualmente favorables, Basura Cero sigue obteniendo mejores resultados. Tanto la incineración como Basura Cero dan lugar a un aumento constante de los beneficios climáticos a lo largo del tiempo en comparación con el BAU, pero la diferencia entre ambos comienza a ampliarse a mediados de la década de 2030. En 2060, la trayectoria Basura Cero logra una reducción de la temperatura de aproximadamente 5 microgrados °C, mientras que la incineración sólo alcanza unos 3,5 microgrados °C menos que el BAU, una divergencia en el rendimiento que representa una mejora de 1,4 veces con respecto a la incineración y el equivalente a retirar más de 650.000 coches de la carretera durante un año.

La diferencia relativamente pequeña observada en las primeras décadas refleja el hecho de que ambas estrategias eliminan las emisiones de metano al desviar los residuos orgánicos de los rellenos sanitarios. Sin embargo, con el paso del tiempo, el impacto climático de las emisiones continuas de CO₂ de la incineración comienza a prevalecer. Además, las soluciones Basura Cero pueden ampliarse para hacer frente al aumento de la generación de residuos, mientras que las grandes plantas de incineración tienen una capacidad fija. Esto da lugar a una divergencia creciente a lo largo del período modelizado. Si se ampliara el análisis más allá de 2060, probablemente se revelarían diferencias aún mayores a largo plazo en el impacto sobre el calentamiento y la eventual inversión de la tendencia de la incineración.



Incluso en escenarios muy favorables para la incineración, Basura Cero sigue superando a esta opción en la reducción del calentamiento.





CADA COCHE REPRESENTA
26,000 COCHES

BARUERI, BRAZIL

**i2,99 millones de
toneladas de CO₂
evitadas, equivalentes
a sacar 650.000 autos
de circulación!**

Escenario	Gestión de residuos en 2060	Resultados climáticos para 2060
BAU	Relleno sanitario sin captura de gases, gestión mínima de orgánicos y reciclaje limitado	Referencia
Incineración con recuperación de energía	100% de los residuos enviados a incineradoras de valorización energética a partir de 2026*	-3,5 microgrados °C
Basura Cero	Separación en origen + compostaje 80% de los residuos orgánicos y reciclaje del 48% del total de materiales reciclables**	-4,9 microgrados °C

*Volúmenes de residuos incinerados basados en las capacidades previstas de las incineradoras propuestas, según se indica en las solicitudes de permisos, los documentos de planificación y las evaluaciones de impacto ambiental

**Objetivos de compostaje y reciclaje basados en la composición del flujo de residuos, los mejores objetivos de reciclaje por material y la consulta con expertos locales. Véase el apéndice sobre metodología para obtener más detalles.



Conclusiones generales

En las tres ciudades, los escenarios Basura Cero ofrecen sistemáticamente mayores beneficios climáticos que la incineración, evitando un calentamiento significativamente mayor para 2060. La magnitud del impacto global sobre la temperatura varía en función del tamaño de cada ciudad y de sus respectivas cantidades de residuos —Lagos gestiona muchos más residuos que Quezon City, que a su vez gestiona muchos más que Barueri—, **pero la tendencia es universal: la estrategia Basura Cero ofrece mejores resultados tanto a corto como a largo plazo.**

El caso de Barueri, en particular, ilustra que, incluso en un escenario que maximiza el potencial de la incineración —desviación total de los residuos orgánicos, mitigación de referencia cero, una instalación inusualmente grande y exclusión de los retos técnicos y logísticos que conlleva—, Basura Cero sigue siendo la estrategia climática más sólida a largo plazo. Para lograr estrategias de incineración equivalentes en ciudades como Quezon City o Lagos, sería necesario multiplicar por cuatro u ocho la capacidad de incineración prevista actualmente, lo que equivaldría a construir tres incineradoras adicionales en Quezon City y siete en Lagos, una propuesta inviable para la mayoría de las ciudades.

Razones clave por las que Basura Cero supera a la incineración:

- **Compensaciones entre metano y CO₂:** aunque la incineración reduce las emisiones de metano al desviar los residuos orgánicos de los rellenos sanitarios, genera emisiones adicionales de CO₂, que se acumulan y provocan calentamiento a largo plazo.
- **Desplazamiento del reciclaje:** las incineradoras dependen de materiales reciclables altamente combustibles, como papel, cartón y plásticos, para una combustión eficiente. Esto compite con los esfuerzos de reciclaje, reduciendo las tasas de recuperación de materiales valiosos.
- **Beneficios acumulativos de Basura Cero:** las estrategias Basura Cero reducen las emisiones de metano y CO₂ al minimizar los residuos que llegan a los rellenos sanitarios, preservar los materiales y evitar la combustión por completo. Estos beneficios aumentan de manera constante con el tiempo, especialmente a medida que los impactos del calentamiento a largo plazo del CO₂ se hacen evidentes en el período modelado.
- **Escalabilidad:** las estrategias de Basura Cero se adaptan eficazmente al tamaño de las ciudades y pueden ampliarse gradualmente añadiendo más capacidad de compostaje, reciclaje o recolección según sea necesario. Por el contrario, las incineradoras requieren grandes inversiones iniciales y están dimensionadas para volúmenes fijos durante décadas, lo que las hace inflexibles y menos capaces de manejar el aumento de residuos y las emisiones de metano asociadas.



Si bien este análisis se centró en los resultados de temperatura modelados, es importante reconocer los beneficios colaterales más amplios de los sistemas Basura Cero, como la creación de empleo, las mejoras en la salud pública y el fortalecimiento de los sistemas informales de reciclaje. A nivel mundial, millones de recolectores de residuos —que recogen, clasifican y venden materiales reciclables sin reconocimiento formal— ya desempeñan un papel fundamental para mantener los recursos valiosos fuera de los rellenos sanitarios y las incineradoras.¹³ Integrarlos en los sistemas formales de residuos no solo reconoce el servicio que ya prestan, sino que también mejora el rendimiento del sistema de residuos en su conjunto. Ciudades como Buenos Aires (Argentina), Bangalore (India) y Rabat (Marruecos), que han contratado a cooperativas de recolectores de residuos, han logrado mayores tasas de reciclaje y han reducido la dependencia de los rellenos sanitarios, al tiempo que han proporcionado mejores salarios, acceso a la atención sanitaria y condiciones de trabajo más seguras para los recolectores de residuos.¹⁴ Al reconocer la experiencia y las contribuciones de los recicladores, los sistemas de Basura Cero pueden aprovechar la infraestructura existente, crear más puestos de trabajo por tonelada de residuos que la incineración o la eliminación,¹⁴ y garantizar que la acción climática del sector de los residuos esté alineada con otros beneficios sociales.

Por el contrario, los proyectos de incineración suelen requerir una elevada inversión inicial, contratos a largo plazo y un suministro constante de residuos, lo que condena a las ciudades a sistemas intensivos en carbono durante décadas.¹⁵ También plantean riesgos medioambientales y financieros, especialmente para las ciudades de ingresos bajos y medios, donde los recursos públicos son limitados.¹⁵

Más fundamentalmente, es crítico evaluar el impacto climático total de las intervenciones en el sector de los residuos. Como demuestra el caso de Lagos, si se analiza únicamente desde la perspectiva de la mitigación del metano, la quema a cielo abierto tiene un rendimiento casi igual al de la incineración. Sin embargo, ambas prácticas generan grandes cantidades de CO₂ y contaminantes atmosféricos peligrosos, lo que socava su viabilidad a largo plazo. Esto subraya la necesidad de metodologías de evaluación exhaustivas que tengan en cuenta toda la gama de emisiones y los impactos ambientales y sanitarios.

Más allá de los resultados climáticos, los sistemas de Basura Cero ofrecen beneficios colaterales fundamentales que los enfoques basados en la incineración no pueden igualar. Requieren una infraestructura menos intensiva en capital, pueden implementarse de forma gradual y crean muchos más puestos de trabajo por tonelada de residuos gestionados, especialmente cuando los trabajadores informales del sector de los residuos son reconocidos formalmente e integrados en el sistema.¹⁴ El compostaje y el reciclaje reducen la carga que supone la eliminación de residuos, al tiempo que crean oportunidades económicas locales y transforman los materiales desechados en nuevas fuentes de valor, como productos reciclables y compost para uso agrícola. Estas ventajas son especialmente importantes en ciudades como Lagos, Barueri y Quezon City, donde los recursos financieros son limitados, la generación de residuos está aumentando y el trabajo informal desempeña un papel fundamental en el sistema existente.

En las tres ciudades, la ventaja de Basura Cero frente a otros escenarios se amplía con el tiempo. A medida que aumentan los volúmenes de residuos y los efectos a largo plazo del CO₂ superan el impacto de corta duración del metano, la superioridad de un sistema Basura Cero se vuelve cada vez más evidente.

Estos resultados indican que, aunque la incineración puede reducir parcialmente las emisiones de metano, no constituye una solución climática duradera, incluso en condiciones favorables.

Basura Cero, en cambio, ofrece beneficios de mitigación sostenidos y escalables, alineados con los objetivos climáticos a largo plazo.



Conclusión

Este análisis confirma que las estrategias Basura Cero representan la vía más eficaz para reducir el calentamiento a largo plazo del sector de los residuos. En las tres ciudades modeladas, el escenario Basura Cero supera sistemáticamente tanto al escenario habitual como al de incineración en términos de aumento acumulado de la temperatura hasta 2060. Si bien la incineración reduce las emisiones de metano al desviar los residuos orgánicos de los rellenos sanitarios, esas ganancias se ven superadas por las emisiones sostenidas de CO₂ fósil y biogénico. El resultado es una trayectoria que, en la mayoría de los casos, conduce a reducciones mínimas del calentamiento en relación con el escenario habitual.

Los sistemas Basura Cero, en cambio, evitan la compensación metano-CO₂ al reducir ambos tipos de emisiones de manera simultánea.



Mediante una combinación de desviación de orgánicos, recuperación de materiales y menor dependencia de los rellenos sanitarios y la combustión, estos sistemas producen perfiles de emisiones que mejoran constantemente con respecto al BAU a lo largo del tiempo. Como muestran los resultados del modelo FalR, estas diferencias se acumulan con el tiempo, y la estrategia Basura Cero logra evitar hasta nueve veces más calentamiento que la incineración para 2060, lo que equivale a retirar de las carreteras entre cientos de miles y cientos de millones de automóviles durante un año. Además, es importante señalar que el análisis se centra únicamente en los resultados de temperatura modelados, y no tiene en cuenta las consecuencias para la salud pública, la justicia medioambiental o la economía de desviar los materiales reciclables de los recolectores de residuos a la incineración.

En general, los enfoques Basura Cero son los que más se ajustan a los compromisos climáticos, como el Compromiso Global sobre el Metano, el Acuerdo de París y la Declaración de la COP29 sobre la reducción del metano procedente de residuos orgánicos. A diferencia de los grandes proyectos de incineración, que requieren mucho capital y condenan a las ciudades a flujos de residuos intensivos en carbono durante décadas, los sistemas Basura Cero ofrecen flexibilidad, menor riesgo financiero, una mayor alineación con los objetivos de sostenibilidad a largo plazo y, lo que es más importante, una mayor reducción del calentamiento global.

Apéndice metodológico

Modelización de las emisiones con la herramienta de estimación de emisiones de residuos sólidos (SWEET)

La herramienta de estimación de emisiones de residuos sólidos (SWEET), desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, se utilizó para generar emisiones anuales específicas para cada escenario de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), y carbono negro (BC) para cada ciudad. SWEET permite introducir datos detallados sobre la composición de los residuos, las vías de tratamiento y las condiciones específicas de cada lugar, y captura las reducciones de emisiones derivadas de intervenciones como el compostaje, el reciclaje y la separación en origen. Tiene en cuenta el impacto de las emisiones procedentes del relleno sanitario, el compostaje, la digestión anaeróbica, la quema a cielo abierto y la incineración. Debido a la disponibilidad limitada de datos y a la hipótesis de que estos componentes se mantienen constantes en todos los escenarios, se excluyeron de este análisis las emisiones procedentes del transporte y los equipos de manipulación. No se espera que esta omisión afecte a las diferencias relativas en los resultados climáticos entre los distintos escenarios, ya que la literatura académica indica que las emisiones de GEI relacionadas con el transporte y la manipulación representan solo una pequeña parte de las emisiones totales del sector. Sin embargo, cabe señalar que las flotas de recogida que utilizan diésel pueden seguir siendo una fuente local importante de contaminación por partículas y otros impactos en la calidad del aire, aunque su contribución al calentamiento global sea menor.

Los datos sobre la composición y la generación de residuos utilizados en SWEET se obtuvieron de una combinación de bibliografía académica, documentos de planificación municipal y consultas con expertos locales. Entre ellos se incluyen estimaciones de la generación de residuos, perfiles de composición de los residuos, métodos de tratamiento actuales, objetivos de desviación y especificaciones de diseño de las incineradoras.

Los tres escenarios se definieron de la siguiente manera:

- Prácticas habituales (BAU): la eliminación en rellenos sanitarios o vertederos es el método dominante de tratamiento de residuos, con un reciclaje y compostaje limitados por parte de los trabajadores informales de residuos, que continúan a las tasas actuales. Se modela que los residuos ingresan a un solo relleno sanitario en cada ciudad (a menos que se especifique lo contrario a continuación), que permanece activo hasta 2060.
- Incineradora: en 2026 se introduce una incineradora municipal. Se supone que todos los residuos que antes se reciclaban en el escenario BAU se desvían a la incineradora para mantener un contenido calórico suficiente para la combustión. Cada incineradora se modela con un factor de capacidad del 80%, lo que refleja el rendimiento real de las incineradoras de residuos de combustión masiva descrito en la literatura académica (véase la tabla 1). Solo se utiliza electricidad, no calor. Las emisiones de carbono evitadas gracias a la electricidad generada por las incineradoras modeladas se estimaron utilizando los factores de emisión por defecto de la red nacional procedentes de fuentes de la CMNUCC.¹⁶ Los factores de producción de electricidad para las incineradoras se obtuvieron de la literatura académica sobre el rendimiento de las incineradoras en jurisdicciones con un alto contenido de residuos orgánicos similar al de las ciudades modeladas.¹⁷

- Basura Cero: a partir de 2026, se implementa la separación de residuos en origen a nivel doméstico y municipal, junto con el compostaje centralizado para gestionar los residuos orgánicos y programas de reciclaje para gestionar los materiales reciclables. Se establecieron objetivos ambiciosos pero realistas tanto para el compostaje como para el reciclaje, basados en programas de alto rendimiento existentes en todo el mundo (véanse las tablas 2 a 6). Se establecieron objetivos de reciclaje para cada tipo de material basándose en puntos de referencia alcanzables de sistemas de residuos de alto rendimiento (véanse las tablas 2-5 a continuación), y estas tasas se aplicaron al perfil de composición de residuos específico de cada ciudad para estimar el desvío total. Se asumió que los servicios de reciclaje existentes prestados por el sector informal se ampliarían con el tiempo a medida que aumentara la producción de residuos. Si bien las tasas generales de reciclaje podrían ser más altas en la práctica, especialmente con un fuerte apoyo político, este enfoque conservador proporciona una base de referencia para la comparación de escenarios.
- El tratamiento mecánico-biológico (MBT/MRBT) de los residuos no se ha modelado debido a su ausencia en SWEET, lo que significa que algunos beneficios climáticos de la vía Basura Cero pueden estar infrarrepresentados. Se han elaborado objetivos de desviación específicos para cada ciudad en materia de residuos orgánicos y reciclables basándose en las condiciones locales y en evaluaciones de viabilidad (véanse las hipótesis para cada ciudad más adelante).

En cuanto a las emisiones de los rellenos sanitarios y el compostaje, SWEET, al igual que muchas calculadoras de emisiones de residuos, no tiene en cuenta el CO₂ biogénico, el dióxido de carbono generado por la descomposición o combustión de materiales orgánicos no fósiles, ya que a menudo se considera neutro en carbono según los protocolos nacionales de inventario de emisiones. Sin embargo, este análisis incluye el CO₂ biogénico para reflejar con mayor precisión las diferentes dinámicas del carbono en los distintos métodos de tratamiento de residuos. Mientras que la incineración y la quema a cielo abierto liberan casi todo el carbono biogénico en forma de CO₂ de forma inmediata, el relleno sanitario y el compostaje pueden dar lugar al almacenamiento a largo plazo y a la liberación de parte del carbono biogénico. Por lo tanto, al excluir el CO₂ biogénico no se captan todas las implicaciones de cada estrategia en el calentamiento, especialmente a largo plazo, cuando las diferencias en las emisiones de CO₂ se hacen más significativas.

El CO₂ biogénico procedente de rellenos sanitarios o vertederos resultante de la oxidación del metano (es decir, el CH₄ que se oxida a CO₂ en lugar de emitirse como metano) se calculó a posteriori basándose en los factores de oxidación predeterminados de SWEET. SWEET no informa sobre el CO₂ derivado de los rellenos sanitarios en los casos en que se produce la oxidación del metano, pero este proceso representa una contribución real al calentamiento atmosférico que debe incluirse en las evaluaciones del ciclo de vida. El CO₂ biogénico emitido directamente en los gases de los rellenos sanitarios o por la oxidación aeróbica de los residuos se calculó utilizando la metodología del modelo de descomposición de primer orden del IPCC y las cifras del contenido orgánico degradable de los residuos de cada ciudad obtenidas de la tabla de valores predeterminados de SWEET. El CO₂ biogénico emitido por el compostaje se calculó utilizando cifras de carbono orgánico degradable (DOC) liberado en forma de gas obtenidas de la literatura académica, junto con las cifras de emisiones directas de metano proporcionadas por SWEET. Como se ha mencionado anteriormente, el CO₂ biogénico procedente de la incineración ya está incluido en los factores de emisión predeterminados proporcionados y utilizados por SWEET.

Todos los escenarios asumen un aumento anual constante de la generación de residuos basado en las tasas de crecimiento demográfico previstas para cada ciudad. Aunque las estrategias de reducción de residuos podrían mitigar aún más las emisiones, se han excluido del modelo actual para aislar los impactos relativos de los diferentes

escenarios. Cabe señalar que la reducción de residuos también es menos compatible con los escenarios de incineración, que requieren un aporte sostenido de residuos para justificar los costes operativos y la inversión en infraestructuras, lo que podría subestimar los beneficios de Basura Cero en relación con la incineración.

Supuestos específicos de cada ciudad

Lagos, Nigeria

Lagos presenta importantes retos en materia de datos, entre ellos la inconsistencia de las estimaciones de población y el seguimiento incompleto de la recogida y el tratamiento de residuos. Para garantizar la coherencia con los datos disponibles sobre la generación de residuos, este análisis ha partido de una población de 21 millones de habitantes, lo que corresponde a una tasa de generación per cápita de 0,62 kg/persona/día, cifra calibrada para ajustarse a la generación diaria de residuos notificada, que es de aproximadamente 13.000 toneladas.¹⁸

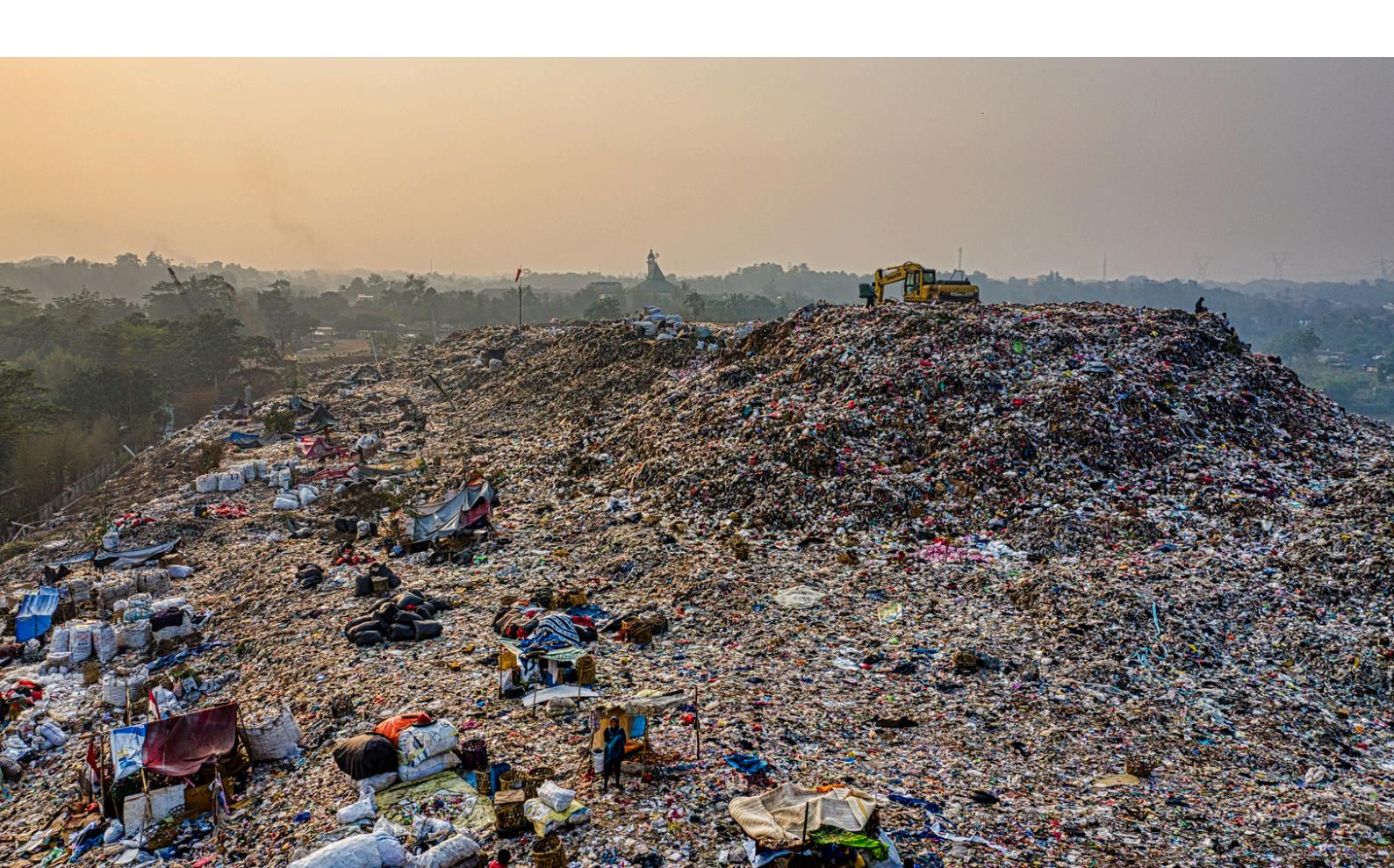
Aunque en la práctica casi la mitad de los residuos de Lagos no se recogen, el modelo ha supuesto la recogida total de todos los residuos generados con el fin de captar el impacto total de las emisiones de cada escenario. Este enfoque permite una comparación más clara de los resultados del tratamiento y no debería afectar a la precisión del análisis, ya que el impacto de las emisiones de los residuos no recogidos frente a los recogidos en SWEET se debe principalmente al uso de equipos de gestión de residuos, que se ha excluido del análisis y se ha supuesto similar en todos los escenarios.

Los datos sobre la composición de los residuos se obtuvieron de estudios específicos de Lagos, prestando especial atención a la proporción de materiales orgánicos en el flujo de residuos. El conjunto de datos primarios utilizado proporcionó un valor agregado único para los residuos orgánicos, pero dado que SWEET requiere una distinción entre los residuos alimentarios y los residuos de jardín, que tienen diferentes tasas de descomposición y factores de emisión, esta fracción se desagregó utilizando ratios medios de cinco auditorías de residuos a nivel doméstico en Lagos.^{18,19} Las tasas de reciclaje en Lagos son difíciles de determinar debido al importante papel que desempeñan los recolectores informales de residuos, cuyas contribuciones no se registran de forma sistemática. Para este análisis, se utilizó una tasa de reciclaje estimada del 6,7%, que es la media de dos cifras: una estimación nacional del 10%²⁰ y una estimación específica de Lagos del 3,4 %.²¹

En el escenario BAU, casi todos los residuos se envían a un único vertedero abierto, y la quema a cielo abierto se modela como si se produjera exclusivamente en el vertedero, y no en zonas sin recoger o en los hogares. Esta decisión ayuda a capturar todos los impactos de las emisiones de la quema a cielo abierto en este escenario. No se incluye la captura de gases de relleno sanitario ni el desvío de materia orgánica. La quema a cielo abierto, tanto en el escenario de incineración como en el Basura Cero se redujo en proporción al tonelaje de residuos desviados del vertedero hacia métodos de tratamiento alternativos.

Quezon City, Filipinas

El sistema de reciclaje existente en Quezon City está relativamente bien desarrollado, y gran parte del desvío lo realizan trabajadores informales del sector de los residuos. Se modelaron dos rellenos sanitarios: uno que funcionó desde la década de 1970 hasta su cierre en 2017, con captura de gas de relleno sanitario (LFG) instalada en 2007; y un segundo que abrió en 2007 y se modela para permanecer activo hasta 2060, con captura de LFG instalada en 2016. Dado que los rellenos sanitarios continúan emitiendo metano y CO₂ durante años después de su cierre, ambos rellenos se incluyeron en el análisis, aunque uno dejó de recibir residuos antes del año de inicio del escenario. Esto garantiza que las emisiones continuas de los residuos heredados se contabilicen de manera coherente en todos los escenarios. La quema a cielo abierto es insignificante en Quezon City y se excluyó de todos los escenarios. También se asumió que el compostaje y otros tratamientos de residuos orgánicos eran insignificantes en el escenario BAU, debido al bajo tonelaje de residuos orgánicos gestionados por los programas piloto de compostaje existentes. El escenario de incineración supone la introducción de una planta municipal de conversión de residuos en energía en 2026, con una capacidad basada en la media de dos estimaciones de capacidad (1000 y 1700 toneladas al día) proporcionadas por expertos locales. El escenario Basura Cero modela el compostaje del 80% de los residuos orgánicos basándose en ejemplos de otras ciudades con buenos resultados, y establece un objetivo de reciclaje del 60%, un aumento realista pero ambicioso con respecto a la tasa actual estimada del 48%. Estos objetivos se aplicaron a la composición de los residuos de Quezon City para estimar el tonelaje total desviado.





Barueri, Brazil

Al igual que en Lagos, el análisis de Barueri se centra únicamente en los residuos sólidos urbanos (RSU) recogidos oficialmente. Aunque es probable que esto dé lugar a una subestimación de la generación total de residuos y de las emisiones, garantiza la coherencia entre los distintos escenarios y preserva la integridad de los resultados comparativos.

Los RSU de Barueri se envían actualmente a un relleno sanitario que también acepta residuos de múltiples jurisdicciones de la región metropolitana de São Paulo. La incineradora regional propuesta está diseñada para procesar más residuos que los que genera Barueri por sí sola. Sin embargo, a efectos del presente análisis, se utilizaron la composición de los residuos y las prácticas de gestión de Barueri como valores por defecto para todos los residuos que se procesarán en la incineradora, lo que incluye el 100% de los residuos recogidos en Barueri y el tonelaje adicional de las zonas vecinas. Este enfoque proporciona una estimación realista, aunque simplificada, del rendimiento de la incineradora, al tiempo que se ajusta a los datos específicos disponibles de la ciudad.

No se disponía de datos locales detallados sobre la descomposición de los residuos orgánicos en categorías de residuos alimentarios y residuos verdes para Barueri. Para cumplir los requisitos de entrada de SWEET y distinguir entre estos dos flujos de residuos, se estimaron los valores utilizando una media derivada de múltiples estudios internacionales. La hipótesis resultante del 71% de residuos alimentarios y el 29% de residuos verdes se basa en fuentes de la literatura académica (véase la tabla 8).

Modelización climática con FalR

Las emisiones generadas por SWEET se importaron al modelo Finite Amplitude Impulse Response (FaIR) para estimar los resultados de la temperatura y el forzamiento radiativo. FaIR es un modelo climático de complejidad reducida capaz de simular la respuesta atmosférica a las trayectorias de las emisiones en marcos temporales de varias décadas.

Las emisiones de CH₄ y CO₂ para cada escenario y ciudad se introdujeron como valores anuales a partir de 2026. Para ejecutar FaIR se necesitaron categorías de emisiones adicionales, como el óxido nitroso (N₂O) y la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU), pero se fijaron en cero para aislar los efectos del sector de los residuos. Esto nos permite ver los resultados directamente atribuibles al sector de los residuos.

Las condiciones iniciales del modelo se fijaron en los valores globales de 2025, incluyendo la concentración atmosférica de CO₂, el aumento de la temperatura desde los niveles preindustriales, las emisiones acumuladas de CO₂, el forzamiento radiativo y el contenido de calor de los océanos. Cada escenario se ejecutó con tres configuraciones diferentes de sensibilidad climática, y los resultados finales se presentaron para el caso de sensibilidad “central”, ya que no había diferencias cualitativas entre las configuraciones de sensibilidad.

Para reflejar mejor la incertidumbre del mundo real sin saturar la señal de las diferencias entre los escenarios, se incluyeron elementos estocásticos en las ejecuciones finales del modelo utilizando una semilla aleatoria fija. Esto garantizó que los tres escenarios experimentaran la misma variabilidad estocástica, preservando la comparabilidad entre los resultados y simulando la variabilidad natural del sistema climático.

Equivalencias entre temperatura y coches

Las diferencias finales de temperatura entre los escenarios de incineración y Basura Cero en 2060 se tradujeron a una métrica más accesible: el número equivalente de coches retirados de la circulación durante un año. Esto se calculó utilizando valores de la literatura académica sobre el impacto del CO₂ en el calentamiento (0,44 °C por cada 1000 gigatoneladas de CO₂,²² junto con las estimaciones de la EPA de EE. UU. de que un vehículo de pasajeros típico emite 4,6 toneladas de CO₂ al año.²³ Dado que la cifra de la EPA se basa en los patrones de conducción en Estados Unidos, donde el uso de vehículos es relativamente alto, es probable que estas estimaciones subestimen el número de vehículos que habría que retirar en ciudades como Lagos, Barueri o Quezon City para lograr reducciones de emisiones equivalentes.

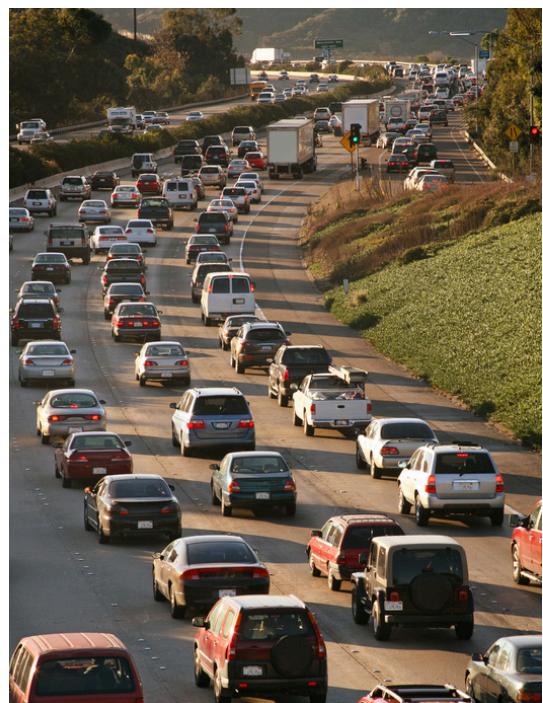


Tabla 1: Factores de capacidad de los incineradores

Factores de capacidad de los incineradores	Fuente
91%	IEA Bioenergía (2021) Valorización energética de residuos y aceptación social: Planta de energía renovable Copenhill en Copenhague https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/03/T36_WtE-and-Social-Acceptance_Copnehhill-WtE-plant-in-Copenhagen.pdf
75%	Escamilla-García, P. E., Camarillo-López, R. H., Carrasco-Hernández, R., Fernández-Rodríguez, E., & Legal-Hernández, J. M. (2020). Análisis técnico y económico de la generación de energía a partir de la incineración de residuos en México. Energy Strategy Reviews, 31, 100542. https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100542
80%	Yakah, N., Kwarteng, A. A., Addy, C., Yirenkyi, M., Martin, A. y Simons, A. (2024). Evaluación tecnoeconómica de la incineración de residuos sólidos urbanos (RSU) en Ghana. Processes, 12(7), 1286. https://psecommunity.org/wp-content/plugins/wpor/includes/file/2408/LAPSE-2024.1651-1v1.pdf
76%	Administración de Información Energética de EE. UU. (2025). Electric Power Monthly https://www.eia.gov/electricity/monthly

Las incineradoras requieren tiempo de inactividad para su mantenimiento y reparación, por lo que funcionan a menos del 100% de su capacidad nominal. Este análisis utilizó una media de factores de capacidad empíricos.

Objetivos de reciclaje por material

Tabla 2: Mejores tasas de reciclaje de vidrio

Tasa de reciclaje de vidrio	Fuente
82% - Sudáfrica	Departamento de Silvicultura, Pesca y Medio Ambiente (2022). Reciclabilidad por diseño para envases y papel en Sudáfrica https://www.dffe.gov.za/sites/default/files/legislation/2023-09/nemwa_packagingrecyclabilityguideline_g48845gon3604.pdf
92% - Encuesta de la UE, el Reino Unido y Noruega	Cerrar el círculo del vidrio (2023) El rendimiento del reciclaje de envases de vidrio en Europa. Conclusiones de una encuesta de Close the Glass Loop. https://closetheglassloop.eu/wp-content/uploads/2023/05/Packaging-Glass-Recycling-in-Europe-Performance-Report-2023.pdf

Tabla 3: Mejores tasas de reciclaje de papel

Tasa de reciclaje de papel	Fuente
80% - Alemania	Agencia Europea de Medio Ambiente (2022). Evaluación de alerta temprana relacionada con los objetivos para 2025 en materia de residuos municipales y residuos de envases https://www.eea.europa.eu/publications/many-eu-member-states/germany
73-78% - EE. UU.	Asociación Americana de Bosques y Papel (2023). Las tasas de reciclaje de papel y cartón en EE. UU. se mantienen fuertes en 2022. https://www.afandpa.org/news/2023/us-paper-and-cardboard-recycling-rates-continue-hold-strong-2022
74% - Corea del Sur	Cha, J. y Youn, Y. C. (2008). El reciclaje de papel en Corea del Sur y sus efectos en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la conservación de los bosques. <i>Revista de la Sociedad Coreana de Ciencias Forestales</i> , 97(5), 530-539. https://www.researchgate.net/profile/Youn-Yeo-Chang/publication/235931426_Paper_Recycling_of_South_Korea_and_its_Effects_on_Greenhouse_Gas_Emission_Reduction_and_Forest_Conservation/links/0fcfd5146adf22b83000000/Paper-Recycling-of-South-Korea-and-its-Effects-on-Greenhouse-Gas-Emission-Reduction-and-Forest-Conservation.pdf

Tabla 4: Mejores tasas de reciclaje de plástico

Tasa de reciclaje de plástico	Fuente
21% - Japón	BBC (2022). Abandonar el plástico de un solo uso en Japón https://www.bbc.com/future/article/20220823-quitting-single-use-plastic-in-japan
34% - Corea del Sur	Davison, Tamara (2024) «¿Cuánto plástico se recicla realmente?» CleanHub. https://blog.cleanhub.com/how-much-plastic-is-recycled https://www.sea-circular.org/wp-content/uploads/2020/05/SEA-circular-Country-Profile_SOUTH-KOREA.pdf
41% - Europa, sólo envases de plástico, donde los envases representan aproximadamente el 40% de los residuos plásticos, tasa efectiva del 16%, suponiendo que no se reciclan otros plásticos	Eurostat (2024). El 41% de los residuos de envases de plástico se reciclarán en 2022. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20241024-3 https://www.oecd.org/en/about/news/press-releases/2022/02/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.html

Tabla 5: Mejores tasas de reciclaje de metales

Tasa de reciclaje de metales	Fuente
70-97% - Aluminio en México, EE. UU. y Brasil	CanTech International (2022). Con la misión de aumentar las tasas de reciclaje de latas de bebidas. https://www.cantechonline.com/blog/28263/on-a-mission-to-increase-beverage-can-recycling-rates/ MundoLatas (2022) Recicla Latas consolida un año de trabajo a favor del reciclaje de latas de aluminio en Brasil. https://mundolatas.com/en/recicla-latas-consolidates-a-year-of-work-in-favor-of-aluminum-cans-recycling-in-brazil/
75% - Aluminio, Europa	International Aluminum Journal (2025). Nuevo récord en el reciclaje de latas de aluminio para bebidas. https://www.aluminium-journal.com/new-record-in-aluminium-beverage-can-recycling .
80-85% - Acero, Europa	Packaging Europe (2022). APEAL informa de una tasa de reciclaje del 85,5 % para los envases de acero en Europa. https://metalpackagingeurope.org/article/steel-packaging-europe-confirms-new-recycling-record ; https://packagingeurope.com/news/apeal-reports-855-recycling-rate-for-steel-packaging-in-europe/8332.article

Tabla 6: Mejores tasas de compostaje

Tasa de desviación de residuos orgánicos	Fuente
90% - Residuos alimentarios, Corea del Sur	Lee, E., Shurson, G., Oh, S. H. y Jang, J. C. (2024). La gestión del reciclaje de residuos alimentarios para un futuro sostenible: un estudio de caso sobre Corea del Sur. <i>Sustainability</i> , 16(2), 854. https://doi.org/10.3390/su16020854
56% - Residuos orgánicos no agrícolas, Quebec 100% - Residuos orgánicos agrícolas, Quebec	RecycQuebec. Materiales orgánicos. https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2021-matieres-organiques-english.pdf

Tabla 7: Tasas de quema al aire libre para estimar la quema al aire libre en el escenario BAU de Lagos

Tasas de quema al aire libre	Fuente
40-65% de los RSU - Países de bajos ingresos	Pathak, G., Nichter, M., Hardon, A., Moyer, E., Latkar, A., Simbaya, J., ... & Love, J. (2023). Contaminación plástica y quema abierta de residuos plásticos. <i>Global Environmental Change</i> , 80, 102648. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102648
80% de residuos no recogidos - Nigeria	Okafor, C. C., Ibekwe, J. C., Nzekwe, C. A., Ajaero, C. C., & Ikeotuonye, C. M. (2022). Estimación de las emisiones procedentes de la quema al aire libre de residuos sólidos urbanos no recogidos en Nigeria. <i>AIMS Environmental Science</i> , 9(2). https://doi.org/10.3934/environsci.2022011
90% de los residuos no recogidos - All Africa	Mebratu, D y Mbandi, A (2022). Quema abierta de residuos en África: retos y oportunidades. Engineering X (fundada por la Real Academia de Ingeniería y la Fundación Lloyd's Register) y los Campeones de Alto Nivel de las Naciones Unidas (UNHLC). https://engineeringx.raeng.org.uk/media/u4mnsto5/open-burning-final-report_1.pdf

Tabla 8: Cifras desglosadas de residuos orgánicos para estimar la proporción entre residuos alimentarios y residuos verdes en Barueri

Proporción de residuos alimentarios respecto a los residuos verdes	Fuente
80/20 - Dar es Salaam	Bubegwa, S (2012) Una visión general de la gestión de residuos sólidos en la ciudad de Dar es Salaam. https://www.globalmethane.org/documents/events_land_120910_12.pdf
69/31 - México	Martínez, R. D. S., Jiménez, L. D., Juárez, O. A. y Hernández, S. C. (2024). Caracterización de los residuos sólidos urbanos con perspectiva de recuperación de biocombustibles y bioproductos en el noreste de México. <i>Journal of Material Cycles and Waste Management</i> , 26(6), 3665-3680. https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-024-02069-4
81/19 - Quezon City	Programa de Gestión Ambiental (2018). Perfil ecológico 2018. Capítulo 5: Residuos sólidos. https://www.scribd.com/document/600881636/Ecological-Profile-2018
55/45 - Lagos	Olaoti, S. O. (2024). Contaminación plástica en el estado de Lagos, Nigeria: retos y soluciones sostenibles. <i>Open Journal of Environmental Research</i> (ISSN: 2734-2085), 5(2), 1-15. https://doi.org/10.52417/ojer.v5i2.667

Referencias

1. Agencia Internacional de la Energía (2021). "Metano y cambio climático – Seguimiento del metano 2021 – Análisis". AIE. www.iea.org/reports/methane-tracker-2021/methane-and-climate-change.
2. Agencia Internacional de la Energía (2022). "Methane and Climate Change – Global Methane Tracker 2022 – Analysis". AIE. www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022/methane-and-climate-change.
3. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2021) Cambio climático 2021: Bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>
4. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Coalición por el Clima y el Aire Limpio (2021) Evaluación mundial del metano: beneficios y costes de la mitigación de las emisiones de metano. <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>
5. Alianza Global para Alternativas a la Incineración (2024). Orientaciones para integrar la reducción de residuos y metano en los NDC 3.0 en consonancia con los principios de justicia ambiental. <https://www.no-burn.org/resources/guidance-on-integrating-waste-and-methane-reduction-into-the-ndcs-3-0-in-alignment-with-environmental-justice-principles-2>
6. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2024). Perspectivas mundiales sobre la gestión de residuos 2024: Más allá de la era de los residuos: convertir la basura en un recurso. Nairobi. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>
7. Iniciativa Global del Metano. "Herramienta de estimación de emisiones de residuos sólidos (SWEET) Versión 4.0.4 | Iniciativa Global del Metano". <https://globalmethane.org/resources/details.aspx?resourceid=5176>.
8. Leach, N. J., Jenkins, S., Nicholls, Z., Smith, C. J., Lynch, J., Cain, M., Walsh, T., Wu, B., Tsutsui, J. y Allen, M. R. (2021). FalRv2.0.0: un modelo generalizado de respuesta impulsiva para la incertidumbre climática y la exploración de escenarios futuros, Geosci. Model Dev., 14, 3007-3036, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3007-2021>.
9. Themelis, N. J. y Bourtsalas, A. C. (2021). Generación y captura de metano en rellenos sanitarios de EE. UU. J. Environ. Sci. Eng. A, 10(abril), 199-206.
10. Spokas K, Bogner J, Chanton JP, Morcet M, Aran C, Graff C, et al. (2006) Balance de masa de metano en tres vertederos: ¿Cuál es la eficiencia de la captura mediante sistemas de recogida de gases? Waste Management 26: 516-525.
11. Alianza Global para Alternativas a la Incineración (s.f.) Financiamiento del mecanismo de desarrollo limpio para la incineración de residuos: Financiando la desaparición del sustento de los trabajadores de residuos, la salud comunitaria y el clima <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Clean-Development-Mechanism-Flyer.pdf>

12. Alianza Global para Alternativas a la Incineración (2013) Empleos en el reciclaje: liberar el potencial para el crecimiento del empleo verde. <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2021/11/Recycling-Jobs-Unlocking-Potential-final.pdf>
13. Alianza Global para Alternativas a la Incineración (2021) Una recuperación inclusiva: los beneficios sociales, medioambientales y económicos de asociarse con recicladores informales. <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Economic-Justice-Report-SINGLES-1.pdf>
14. Alianza Global para Alternativas a la Incineración (2021) Basura Cero y recuperación económica: El potencial de creación de empleo de Basura Cero. <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Jobs-Report-ENGLISH-1.pdf>
15. Alianza Global para Alternativas a la Incineración (2018) Datos sobre las incineradoras de "conversión de residuos en energía". <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2021/11/GAIA-Facts-about-WTE-incinerators-Jan2018-1-1.pdf>
16. Grupo de Trabajo Técnico de las Instituciones Financieras Internacionales sobre Contabilidad de Gases de Efecto Invernadero (IFI TWG)(2021). Factores armonizados por defecto de la IFI 2021 v3.2. <https://unfccc.int/documents/461676>
17. Dadario, N., Gabriel Filho, L. R. A., Cremasco, C. P., Santos, F. A. d., Rizk, M. C., & Mollo Neto, M. (2023). Recuperación de energía a partir de residuos sólidos urbanos: escenario global y perspectivas de la tecnología de incineración masiva en Brasil. *Sustainability*, 15(6), 5397. <https://doi.org/10.3390/su15065397>
18. Ojowuro, O. M., Olowe, B. y Aremu, A. S. (2018). Caracterización de los residuos sólidos urbanos de la metrópoli de Lagos, Nigeria. En *Gestión de residuos y eficiencia de los recursos: Actas de la 6.ª IconSWM 2016* (pp. 159-166). Singapur: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7290-1_13
19. Olaoti, S. O. (2024). Contaminación plástica en el estado de Lagos, Nigeria: retos y soluciones sostenibles. *Open Journal of Environmental Research* (ISSN: 2734-2085), 5(2), 1-15. <https://doi.org/10.52417/ojer.v5i2.667>
20. Salau, Gbenga (2025). "La salud pública y el medio ambiente se resienten en medio de un próspero sistema de reciclaje informal". *The Guardian Nigeria*. <https://guardian.ng/features/health/public-health-environment-suffer-amid-thriving-informal-recycling-system/>
21. Salau, O., Sen, L., Osho, S., & Adejonwo-Osho, O. (2016). Investigación empírica de los sectores formales e informales en el reciclaje de residuos del sistema municipal de gestión de residuos de los países en desarrollo: el caso del estado de Lagos. *J Environ Ecol*, 7, 21-33. <https://doi.org/10.5296/jee.v7i2.10007>
22. Damon Matthews, H., Tokarska, K. B., Rogelj, J., Smith, C. J., MacDougall, A. H., Haustein, K., ... y Knutti, R. (2021). Un enfoque integrado para cuantificar las incertidumbres en el balance de carbono restante. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 7. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00064-9>
23. USEPA (2025). Emisiones de gases de efecto invernadero de un vehículo de pasajeros típico. <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>

Agradecimientos

GAIA agradece a todas las comunidades que aparecen en la publicación por aceptar ser entrevistadas y aparecer en ella, así como por compartir sus fotos para su uso en la publicación.

Este informe ha sido posible en parte gracias al apoyo financiero del Global Methane Hub. Las opiniones expresadas en esta publicación no reflejan necesariamente las del GMH ni las de sus financiadores. Este informe o partes del mismo pueden reproducirse con fines no comerciales, siempre que se cite la fuente. Queda prohibida la reproducción con fines comerciales o de venta sin el permiso por escrito del titular de los derechos de autor.

Sobre GAIA

GAIA es una red de grupos de base y alianzas nacionales y regionales que representan a más de 1000 organizaciones de más de 100 países. Con nuestro trabajo, nuestro objetivo es catalizar un cambio global hacia la justicia ambiental mediante el fortalecimiento de los movimientos sociales de base que promueven soluciones a los residuos y la contaminación. Imaginamos un mundo justo, con Basura Cero, construido sobre el respeto a los límites ecológicos y los derechos de la comunidad, donde las personas estén libres de la carga de la contaminación tóxica y los recursos se conserven de manera sostenible, sin quemarse ni tirarse a la basura. www.no-burn.org

El equipo editorial

Autores

John Ribeiro-Broomhead
Dr. Neil Tangri

Colaboradores y Revisores

Mariel Vilella
Yobel Putra
Doun Moon
Sonia Astudillo
Brex Arevalo
Weyinmi Okotie
Rafael Eudes
Victor Argentino

Diseñadores

Annika N. Hernandez

Apoyado por



Serie de orientaciones técnicas de GAIA para responsables políticos y financieros sobre medidas rápidas en materia de residuos y metano:

Zero Waste as An Effective Climate Strategy: Avoiding Warming Tradeoffs from Incineration

©Septiembre de 2025 Alianza Global para Alternativas a la Incineración
1958 University Avenue, Berkeley, CA, USA