



C O B E A L ®

T H E C O B E A L G R O U P

Cartografía de la Economía Circular de México

Diseño de un Programa Nacional de Residuos a Valor

Sophy M. Laughing, Ph.D., MBA
Bo Erik Gustav Hollsten Ruvalcaba
The Cobeal Group
<https://cobeal.com/>

INICIATIVA DE ECONOMÍA CIRCULAR DE MÉXICO

Resumen Ejecutivo

Un problema sistémico definido por geografía, composición, caudal y adecuación de procesos

8.95 Mt/año

Pérdida y Desperdicio de Alimentos generado en centros de distribución y venta al menudeo de México

476 Sitios

Ubicaciones prioritarias de plantas WtE-DA con balance energético positivo ($E > 1.0$)

0.22 Mt CO₂

Emisiones anuales de gases de efecto invernadero evitadas por desvío de rellenos sanitarios

TRES VÍAS DE CONVERSIÓN — ARQUITECTURA DE RED ESPECÍFICA POR PROCESO

Conversión Biológica

Orgánicos Húmedos / PDA

Digestión anaeróbica de corrientes biodegradables de alta humedad. Produce biogás, electricidad, calor, combustible de transporte y biofertilizante.

Conversión Térmica

Residuos Post-Reciclaje

Oxidación/gasificación a alta temperatura de RSU mixtos tras la recuperación de materiales. Tratamiento controlado de gases de combustión y gestión de cenizas.

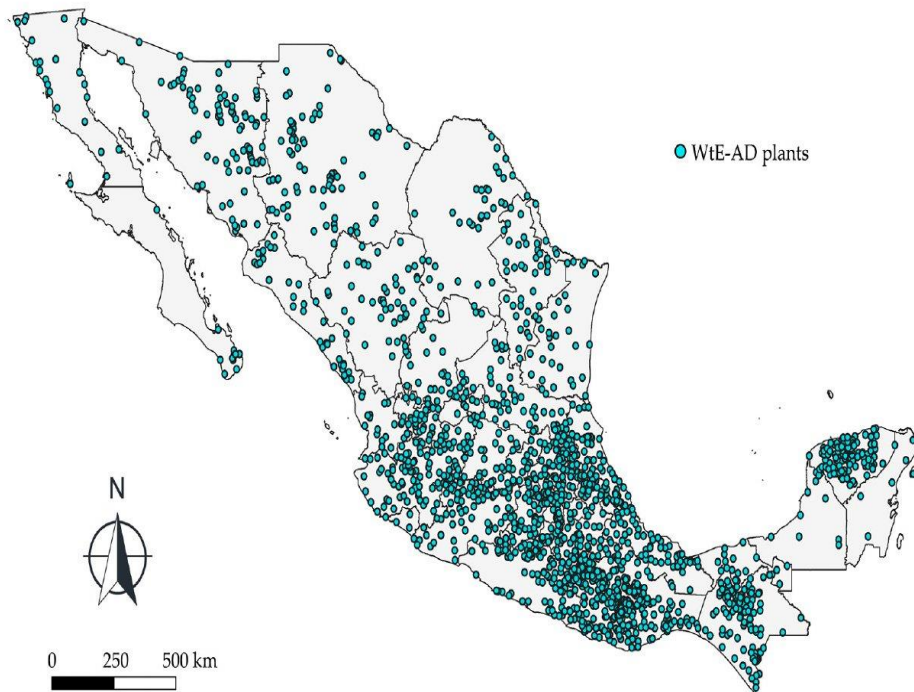
Pirólisis Controlada

Corrientes Homogéneas de Alta Energía

Descomposición térmica con oxígeno limitado de neumáticos al final de su vida útil. Produce aceite de pirólisis, syngas, negro de carbono y metales recuperados.

Geografía Nacional de Plantas

720,606 centros de distribución y venta al menudeo mapeados mediante SIG — Plantas WtE-DA co-ubicadas en sitios de disposición final existentes



89

Principales centros de abastecimiento con infraestructura física y operativa

3.27 km²

Centro de abastecimiento de CDMX — el más grande del mundo, >330,000 t/año de mercancía

~28%

Tasa de PDA en CDMX por negligencia operativa y descomposición

Centro-Sur

La región genera el 66% de todo el PDA nacional

Source: Rueda-Avellaneda et al. (2021), *Renew. Sustain. Energy Transit.*

Conversión Biológica: Diseño del Proceso WtE-DA

Límite de proceso de cuatro unidades — acondicionamiento, digestión, cogeneración y recuperación de nutrientes

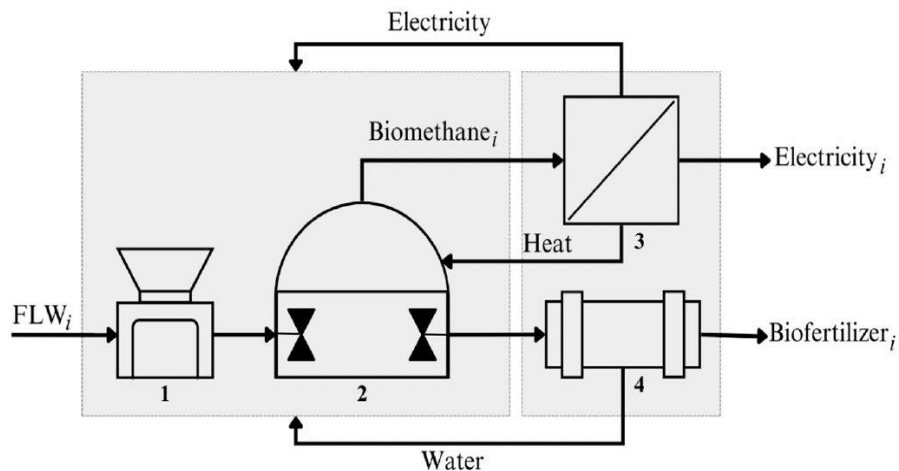


Figure 2. Process flow diagram for waste-to-energy plant i . (1) Industrial food shredder, (2) anaerobic digester with heat and agitation systems, (3) heat and power cogeneration system, (4) rotatory drum sludge dryer.

01 Trituradora Industrial de Alimentos

Reducción mecánica de tamaño. Energía: $152 \ln(TC) + 37$ kWh/d. Escala eficientemente — $15 \rightarrow 4$ kWh/t al aumentar TC.

02 Digestor Anaeróbico

Calentado y agitado. Principal consumidor de energía (40–533 kWh/t PDA). El costo de calefacción cae drásticamente con la escala.

03 Cogeneración CHP

$\eta = 0.46$. Convierte biometano en electricidad y calor de proceso. La retroalimentación de calor reduce la demanda de calefacción.

04 Secador de Tambor Rotatorio

Lodo \rightarrow biofertilizante. Energía: $38.52 \times TC^{0.804}$ kWh/d. Secado de lodo: $42 \rightarrow 13$ kWh/t con la escala.

Caracterización de Materia Prima: Rendimiento de Metano por Categoría Alimentaria

Análisis estadístico de >70 artículos revisados por pares — siete categorías de PDA de la cadena de distribución alimentaria de México

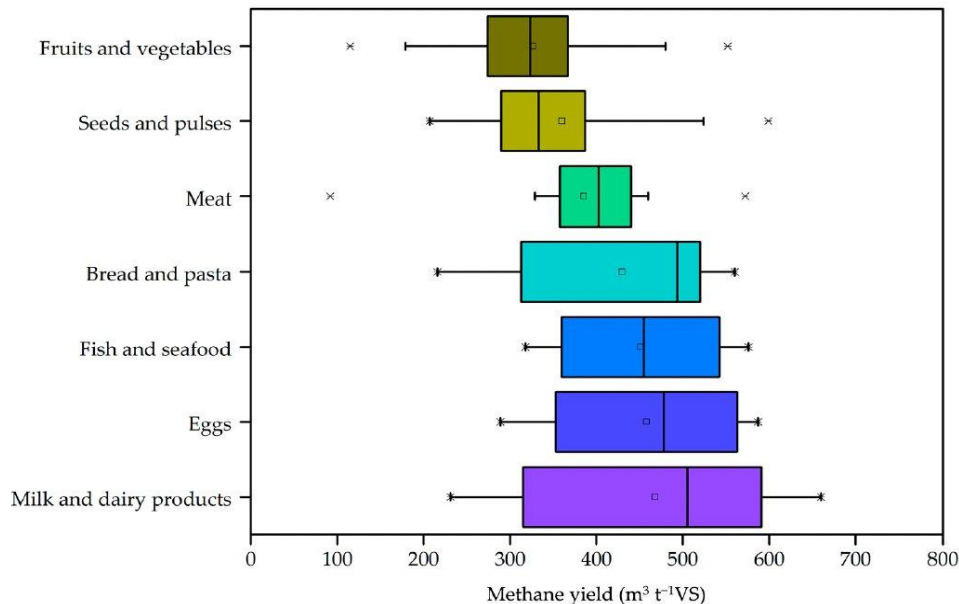


Figure 3. Box-and-whisker plot for the methane yields of the seven food categories found in Mexican FLW from food distribution and retail centers. VS: volatile solids. X-dots represent atypical values.

HALLAZGOS CLAVE

Leche y Lácteos 468 m³/t VS

Mayor rendimiento — el balance proteínas/lípidos impulsa la producción sinérgica de CH₄

Huevos 458 m³/t VS

La alta proporción de proteínas crea una composición de sustrato óptima

Pescado y Mariscos 452 m³/t VS

Contenido de proteínas/lípidos comparable con los lácteos

Frutas y Verduras 360 m³/t VS

Rápida generación de ácidos grasos volátiles; riesgo de acidificación

Semillas y Legumbres 326 m³/t VS

La acumulación de ácidos grasos de cadena larga inhibe la metanogénesis

± La variación en el rendimiento de CH₄ desplaza el cociente E hasta en un 30%

Simulación de Balance Energético: Capacidad de Tratamiento vs. Rendimiento

Economías de escala confirmadas — $E_{\text{quotient}} \geq 1.0$ alcanzado con $TC \geq 8 \text{ t PDA/día}$

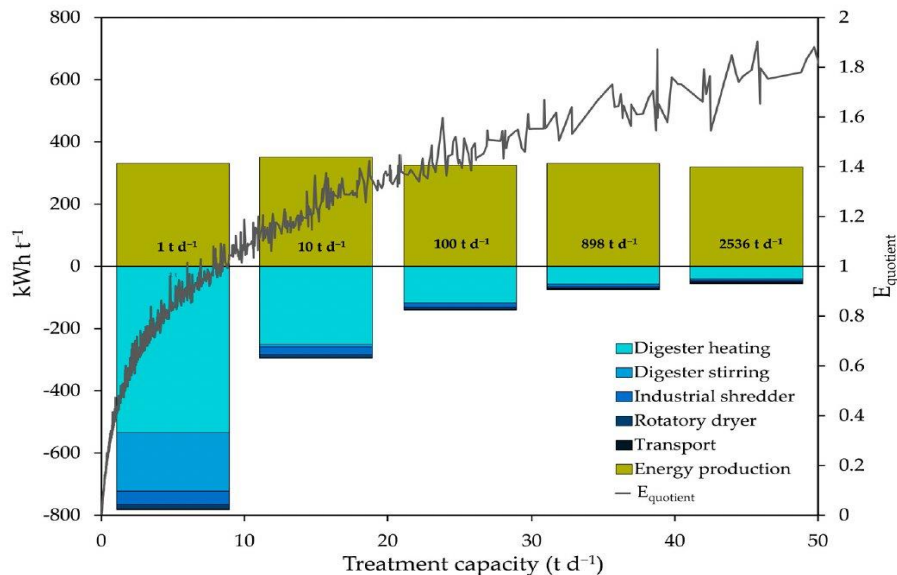


Figure 4. Anaerobic digestion waste-to-energy plant simulation results. Principal axis (left): energy expenditure and energy production per ton of FLW managed in five representative plants. Secondary axis (right): energy quotient of all the anaerobic digestion waste-to-energy plants in Mexico.

$\geq 8 \text{ t/día}$

TC mínimo para balance energético positivo ($E_{\text{quotient}} \geq 1$)

$\sim 2.0\times$

Cociente energético en 2,536 t/día (escala máxima)

40–533

kWh/t PDA rango de demanda de calefacción (planta grande \rightarrow pequeña)

476

Plantas en México que cumplen el umbral de TC viable

El calentamiento del digestor domina el gasto energético en todas las escalas. El 69% de los sitios propuestos cae por debajo del umbral viable por densidad insuficiente de materia prima.

Análisis de Sensibilidad: Impacto del Rendimiento de Metano en el Cociente Energético

Los rendimientos máximos de CH₄ desbloquean 698 sitios viables — un aumento del 47% con respecto a la línea base de 476 sitios

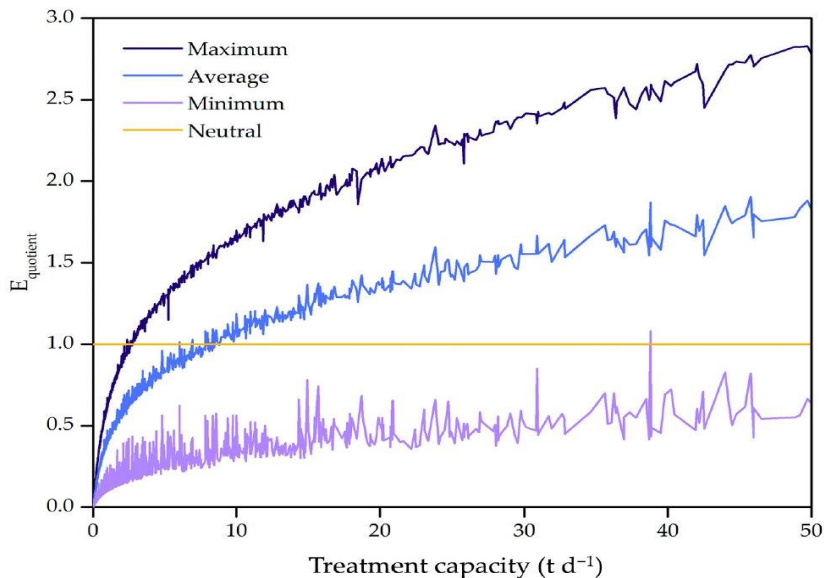


Figure 5. The energy quotient of anaerobic digestion waste-to-energy plants in Mexico. The middle profile corresponds to anaerobic digesters with average methane yields of the seven food categories considered. Light- and dark-purple lines show the sensitivity analysis for the energy balance regarding maximum and minimum methane yields in the digesters, respectively.

COMPARACIÓN DE ESCENARIOS

CH₄ Máximo

698 sitios | TC ≥ 3 t/día

E_quotient: Hasta 2.85x

CH₄ Promedio

476 sitios | TC ≥ 8 t/día

E_quotient: Hasta 1.85x

CH₄ Mínimo

< 100 sitios | TC > 50 t/día

E_quotient: < 0.7 típico

Estrategia: co-digestión y pretratamiento para desplazar la materia prima hacia el potencial máximo de rendimiento.

Sitios Prioritarios de Implementación: 476 Sitios Energéticamente Viables

Morado = rendimiento promedio de CH₄ viable | Amarillo = sitios adicionales desbloqueados al rendimiento máximo

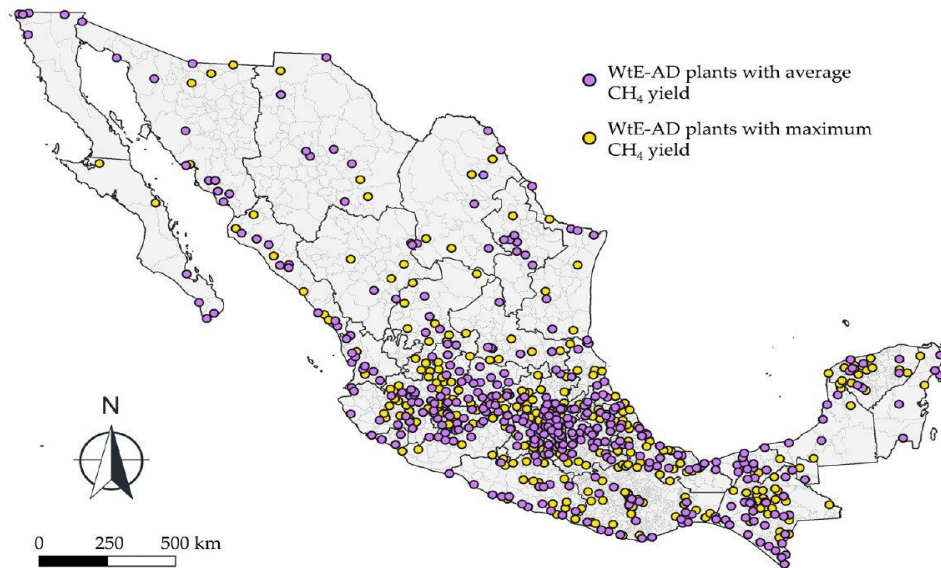


Figure 6. Geographical locations of WtE-AD plants in Mexico. Purple markers represent the locations of the 476 plants with $E_{\text{quotient}} > 1$ from the energetic feasibility analysis with the average methane yield. Yellow markers represent the locations of the new WtE-AD plants with $E_{\text{quotient}} > 1$ from the sensitivity analysis for Equotient improvement with the maximum methane yield.

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

México Centro-Sur

Mayor densidad de plantas viables — 66% del PDA nacional generado aquí

Centro-Occidente

Alta densidad de materia prima; corredor clave para el despliegue de la Fase 1

Región Norte

Solo los clusters urbanos son viables al rendimiento promedio; el rendimiento máximo desbloquean nuevos sitios

Península de Yucatán

Denso cluster viable en el sureste; buena logística para plataforma regional

Prioridad Fase 1: los 50 mejores sitios >100 t/día.

Fase 2: ~426 sitios restantes.

Sensibilidad a la Distancia de Transporte: Degradación del Cociente Energético

Las plantas más grandes toleran mayores distancias de transporte — la disciplina de ubicación es la palanca de ingeniería principal

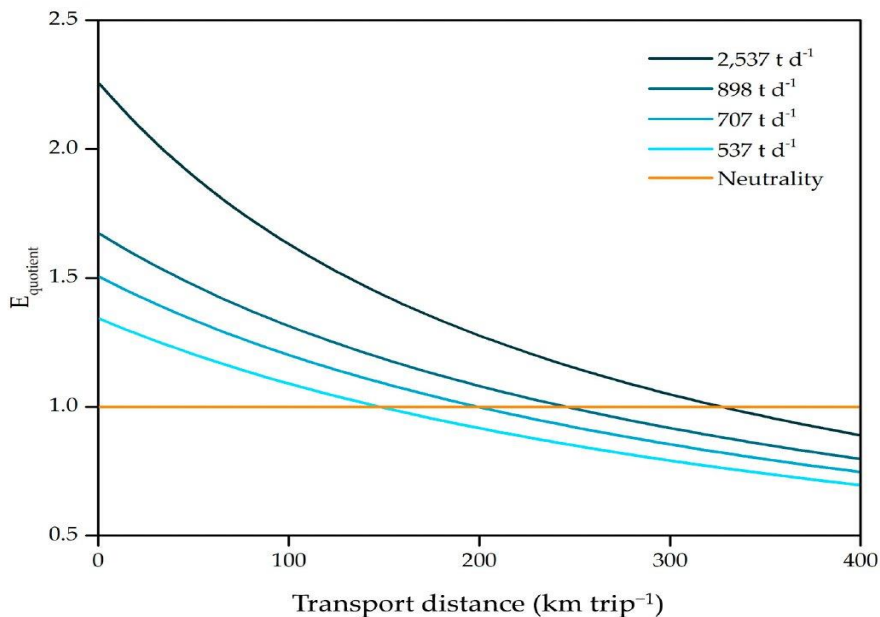


Figure 7. Sensitivity analysis to determine the effect of transportation on the energy quotient of the top four anaerobic digestion waste-to-energy plants.

UMBRALES CRÍTICOS

Distancia máxima de transporte en neutralidad (E=1.0):

2,537 t/día

Permanece positivo hasta ~320 km/viaje

898 t/día

Permanece positivo hasta ~280 km/viaje

707 t/día

Permanece positivo hasta ~200 km/viaje

537 t/día

Permanece positivo hasta ~150 km/viaje

Objetivo de energía de transporte: < 10–15% de la producción bruta. La co-ubicación en SDF (FDS en inglés) existentes minimiza el transporte reutilizando vías y conexiones de servicios.

Arquitectura de Red Nacional: Sistema de Cuatro Capas

Corredores de materia prima basados en SIG — sin intervalos de espaciado arbitrarios

01 Centros Metropolitanos de Procesamiento

Conversión térmica de RSU postreciclaje. 100–1,000+ t/día. Atienden poblaciones >500k. Producción energética: 0.5–0.8 MWh/t neto.

02 Plataformas Regionales de Orgánicos

Conversión biológica de PDA y residuos húmedos. 476 sitios prioritarios identificados. TC \geq 8 t/día mínimo; objetivo \geq 50 t/día. Producen electricidad, calor y biofertilizante.

03 Activos de Conversión Especializada

Pirólisis controlada de neumáticos al final de su vida útil y corrientes homogéneas de alta energía. Producción: aceite de pirólisis, syngas, negro de carbono, chatarra de acero. >90% de autosuficiencia energética.

04 Nodos de Preprocesamiento / Transferencia

Recolección, clasificación, embalaje y agregación de corto alcance. Alimentan las tres capas de conversión principales. Permite que las regiones subumbral se agreguen a un TC viable.

Secuencia de Implementación

Despliegue nacional en tres fases — movilización inmediata en los 476 sitios viables identificados

Fase 1 · Años 1–2

- ▶ Poner en marcha las 50 principales plataformas de orgánicos (>100 t/día)
- ▶ Desplegar 2 centros térmicos metropolitanos
- ▶ Poner en marcha 2 plantas de pirólisis de neumáticos NFU (ELT en inglés)
- ▶ Validar balances energéticos y vías de permisos
- ▶ Asegurar contratos de suministro y acuerdos de compra

Fase 2 · Años 3–5

- ▶ Desplegar las ~426 plataformas de orgánicos restantes
- ▶ Incorporar activos adicionales de conversión térmica y especializada
- ▶ Alcanzar el 70% de cobertura nacional de materias primas prioritarias
- ▶ Definir el enrutamiento basado en SIG para corredores de venta de productos
- ▶ Integrar los hallazgos económicos de las Partes 2 y 3 del estudio

Fase 3 · Años 6+

- ▶ Integración completa de la red en las cuatro capas
- ▶ Nodos de preprocesamiento en regiones desatendidas
- ▶ Refinamiento de políticas y estructura de incentivos de economía circular
- ▶ Exportación del modelo replicable a América Latina
- ▶ Desarrollo del mercado de créditos de carbono y biofertilizantes

**La lógica rectora es la conversión adaptada a la materia prima,
la ubicación impulsada por densidad y el balance energético positivo
impuesto por la escala.**

Esto reemplaza el desarrollo de proyectos ad hoc por una arquitectura sistémica capaz de generar seguridad energética medible, reducciones de gases de efecto invernadero y valor en economía circular en todo México — y un modelo replicable para América Latina.

Sophy M. Laughing, Ph.D., MBA | Bo Erik Gustav Hollsten Ruvalcaba
The Cobeal Group · cobeal.com