

## Optimización del coprocesamiento de residuos urbanos y ganaderos fomentando el aprovechamiento energético

Lorenzón, Agustina Belén<sup>1</sup>; Morero, Betzabet del Valle<sup>2</sup>; Cafaro, Diego Carlos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de desarrollo tecnológico para la industria química (CONICET) - Facultad de Ingeniería Química (UNL)

<sup>2</sup> Instituto de desarrollo tecnológico para la industria química (CONICET) - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL)  
lorenzonaugustina@gmail.com

### Resumen

La gestión de residuos sólidos es un elemento clave para el desarrollo sostenible y su importancia se ve acentuada con el aumento de la población, la urbanización y la generación de riqueza en regiones postergadas. En áreas de desarrollo productivo agrícola-ganadero resulta indispensable abordar la gestión integral de residuos derivados de estas actividades, así como de fuentes de origen urbano, aprovechando el potencial energético de los residuos.

Este trabajo presenta un modelo que optimiza el diseño de la red de transporte y tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y de los residuos de establecimientos de engorde a corral (*feedlots*) en el centro-norte de la provincia de Santa Fe. Se contemplan diversas alternativas de tratamiento: digestión anaeróbica (co-digestión de ambas corrientes de residuos), compostaje, rellenos sanitarios (*landfills*) y lagunas aireadas. A diferencia de trabajos previos, se propone un modelo MIQCP (*mixed integer quadratically constrained program*) que incorpora ajustes cuadráticos para las ecuaciones de costos de los diferentes procesos de tratamiento de residuos, considerando las economías de escala que estos representan. Además, se incluyen los ingresos provenientes de la venta de productos como energía eléctrica, bonos de carbono y fertilizante orgánico.

El modelo se evalúa en un escenario con un horizonte de tiempo de 20 años que incluye 10 ciudades y 16 establecimientos de *feedlots* ubicados en el departamento General Obligado de la Provincia de Santa Fe. Esta formulación fue codificada en GAMS 37.1.0 y resuelta en un procesador Intel X5650e2.66 GHz con 24 GB de RAM. Se utiliza el *solver* GUROBI 9.5.1, que es capaz de garantizar la optimalidad global de las soluciones encontradas. La solución propone la digestión anaeróbica como alternativa de tratamiento más conveniente, definiendo la construcción de 2 plantas de co-digestión con un equipo en cada una, y 2 plantas de digestión de residuos 100% ganaderos con 6 equipos en total. Esto se debe a que el volumen de residuos de *feedlots* es considerablemente superior al de los residuos urbanos. Esta red de tratamiento genera un valor presente neto (VPN) de USD 147.6 millones a lo largo de los 20 años.

Sin embargo, aún después de 9000 segundos de cómputo, el *gap* de optimalidad es del 3.8%, por lo cual se infiere que podrían eventualmente obtenerse aún mayores beneficios. Con el objetivo de mejorar el desempeño computacional se propone un ajuste lineal (con coeficientes de Pearson que se reducen de  $R^2 = 0.82$  a  $R^2 = 0.75$  en promedio) para los costos operativos y de inversión de las diferentes alternativas de tratamiento, a sabiendas de la pérdida de precisión enfrentada. Luego, se construye un modelo de programación mixta entera lineal (MILP) con el que se encuentra el óptimo (0% de *gap*) en 491 segundos de CPU, obteniendo un VPN estimado de USD 146.9 millones. El resultado nuevamente propone la instalación de 4 plantas de tratamiento con 8 biodigestores en total, con modificaciones en algunos de los puntos de ubicación de las plantas.

Finalmente, se procede a evaluar en el modelo MIQCP la solución reportada por el modelo MILP, alcanzando nuevamente un VPN de USD 147.6 millones. De esta forma, el caso de estudio demuestra que las aproximaciones cuadráticas no generan impacto en la calidad del diseño obtenido, no siendo posible en este caso incrementar el valor presente neto del plan de inversiones abordando un modelo más preciso. Sin embargo, resta confirmar si este comportamiento es generalizado, es decir, si no existen ciertos rangos y economías de escala para las cuales esta afirmación sea inválida. Por otro lado, y a partir de las ventajas computacionales asociadas a la solución del problema mediante el modelo lineal, como trabajo futuro se propone desarrollar algoritmos iterativos MILP-MIQCP que permitan hallar soluciones en menores tiempos que el modelo no lineal monolítico, implementando relajaciones válidas que den una idea del *gap* de optimalidad de las soluciones.

**Palabras claves:** Optimización, co-digestión, localización-asignación, MIQCP.