

# Modelo de Programación Lineal Multiobjetivo para la Logística Inversa en la Industria del Polipropileno Reciclado

Mario Wilfredo Ramírez Puma

Universidad Nacional del Altiplano Puno  
Escuela Profesional de Ingeniería Estadística e Informática

Mayo 2025

# Idea principal del artículo

- El artículo desarrolla un modelo de Programación Lineal Multiobjetivo (PLM) aplicado a la logística inversa del polipropileno reciclado.
- Busca optimizar simultáneamente:
  - Los costos totales del sistema.
  - La calidad del servicio.
  - El impacto ambiental.
- Se enfoca en decisiones logísticas: transporte, acopio, uso de aditivos y recursos humanos.
- Aplicación contextualizada en la industria chilena del reciclaje, con posibilidad de adaptarse a otros entornos.

## Función Objetivo 1: Minimizar costos totales

$$Z_1 = \sum_{p=1}^P \left[ \sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R (Trans_{rp} \cdot CTrans_{rp} + Alm_{np} \cdot CAlm_R) + Pdp \cdot CMP + HhRp \cdot CH \right]$$

## Función Objetivo 2: Minimizar índice de degradación

$$Z_2 = \sum_{p=1}^P (PDI_0 + m \cdot Adtp)$$

# Restricciones del modelo (I)

- **Producción:**  $(Dmp + Inv_p + Inv_{p-1}) \leq Pdp \leq Cpd$ . Esta restricción asegura que la cantidad de producción en cada período sea suficiente para cubrir la demanda ( $Dmp$ ), considerando el inventario actual y el anterior, pero sin exceder la capacidad máxima de producción de la planta ( $Cpd$ ).
- **Mano de obra:**  $Hhp \leq Mhh$ . Controla que las horas hombre trabajadas en cada periodo no superen el máximo permitido por la empresa, ya sea por políticas internas o por límites físicos del personal.
- **Contratación/despido:**  $Cp \leq MC$ ;  $Dp \leq MD$ . Establece un límite a la cantidad de trabajadores que se pueden contratar ( $Cp$ ) o despedir ( $Dp$ ) en cada periodo, para evitar fluctuaciones abruptas en la fuerza laboral.
- **Horas extras y ociosas:**  $HEp \leq X\% \cdot HhRp$ ;  $HhOp \leq HhRp$ . Las horas extras ( $HEp$ ) no deben superar un porcentaje permitido del total de horas regulares trabajadas ( $HhRp$ ), y las horas ociosas ( $HhOp$ ) deben ser menores o iguales a las horas regulares. Esto asegura eficiencia en el uso del recurso humano.

## Restricciones del modelo (II)

- **Inventarios:**  $Invp \leq MInv$ . Limita el nivel máximo de inventario almacenado, considerando ya sea la capacidad física del almacén o políticas de gestión del stock.
- **Producción no entregada a tiempo:**  $PNSp \leq Dmp$ . La cantidad de producción no entregada a tiempo ( $PNSp$ ) no puede ser mayor que la demanda de ese periodo. Esto representa los posibles retrasos o faltantes frente a lo solicitado.
- **Producción subcontratada:**  $PSp \leq CPS$ . La cantidad de producción subcontratada ( $PSp$ ) a empresas externas no debe superar un límite definido ( $CPS$ ), ya sea por costos, calidad o políticas de la empresa.
- **Aditivo estabilizante:**  $0.05\% \leq Adtp \leq 0.6\%$ . Controla la proporción del aditivo estabilizante usado en la producción, para garantizar que la calidad del polipropileno reciclado esté dentro de parámetros técnicos y normativos.
- **No negatividad:**

$$Invp, HhRp, Cp, Dp, HEp, HhOp, PNSp, PSp, Adtp \geq 0.$$

- El modelo propuesto permite tomar decisiones óptimas sobre transporte, uso de recursos y calidad del reciclaje.
- Al considerar múltiples objetivos, ofrece soluciones balanceadas entre costo, servicio y sostenibilidad ambiental.
- Constituye un aporte metodológico útil para empresas recicladoras con enfoque en economía circular.
- Las restricciones aseguran viabilidad operativa, legal y técnica en todo el sistema logístico inverso.