

# Localización óptima de una planta de transferencia de residuos textiles para una gestión eficiente y sostenible

## Optimal location of a textile waste transfer plant for efficient and sustainable management

Presentación: xx/10/2024

### Juan Ignacio Ardenghi

Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Bahía Blanca  
Universidad Nacional del Sur-Departamento de Matemática  
ardenghi@frbb.utn.edu.ar

### Marta Cecilia Vidal

Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Bahía Blanca  
mcvidal@frbb.utn.edu.ar

### Resumen

Con el aumento de la población y el creciente consumo que ello conlleva, la generación de residuos textiles se ha convertido en un problema cada vez más arduo. La disposición final de un alto porcentaje de estos residuos en rellenos sanitarios, si bien se considera una mejora en comparación con una quema a cielo abierto o la eliminación en vertederos no controlados, presenta serias consecuencias ambientales, sociales y económicas que exigen atención urgente. Reducir la cantidad de residuos textiles que se envían a estas instalaciones requiere de la implementación de estrategias integrales que contemplen el reciclaje, la reutilización y la valorización de estos materiales. Para abordar esta problemática, en este trabajo se plantea una solución estratégica: la localización óptima de una planta de transferencia de residuos textiles para centralizar la gestión de estos desechos, mejorando su manejo, procesamiento y valorización. Para ello, se desarrolla un modelo matemático que permite identificar la ubicación más adecuadas para esta planta, minimizando los costos de transporte y maximizando la eficiencia del sistema.

Palabras clave: Residuos textiles, plantas de transferencia, modelos matemáticos, optimización.

### Abstract

With the increase in population and the growing consumption that this entails, the generation of textile waste has become an increasingly difficult problem. The final disposal of a high percentage of this waste in landfills, although considered an improvement compared to open burning or disposal in uncontrolled dumps, actually presents serious environmental, social and economic consequences that require urgent attention. Reducing the amount of textile waste sent to these facilities requires the implementation of comprehensive strategies that contemplate the recycling, reuse and valorization of these materials. To address this problem, this work proposes a strategic solution: the optimal location of a textile waste transfer plant to centralize the management of this waste, improving its handling, processing and valorization. To do this, a mathematical model is developed that allows identifying the most suitable location for this plant, minimizing transportation costs and maximizing the efficiency of the system.

Keywords: textile wastes, transfer plants, mathematical models, optimization.

## Introducción

El aumento de la población y el consecuente incremento en el consumo han impulsado un problema ambiental cada vez más acuciante como es la generación de residuos textiles. La disposición final de un alto porcentaje de estos residuos en rellenos sanitarios, si bien representa un avance frente a la quema a cielo abierto o la eliminación en vertederos no controlados, conlleva serias consecuencias ambientales, sociales y económicas. Reducir la cantidad de residuos textiles que se envían a estas instalaciones requiere de la implementación de estrategias integrales que contemplen tanto la reducción de generación de residuos de parte de las industrias, como el reciclaje, la reutilización y la valorización de estos materiales. Este problema no es exclusivo de un país o región. A nivel mundial, se estima que la industria textil genera más de 92 millones de toneladas de residuos textiles cada año, una cifra que se prevé que aumente en un 50% para el año 2030 (Sandin et al., 2018). Esta problemática ha llevado a diferentes países a tomar medidas para abordar la gestión de estos residuos de manera más responsable y sostenible. Si bien se han desarrollado diversas estrategias para mitigar el impacto ambiental de la producción textil, como el diseño eco-amigable, modelos de negocio circulares y sistemas de trazabilidad, ninguna solución por sí sola ha logrado erradicar el problema.

La transición hacia un modelo de gestión de residuos más sostenible requiere un enfoque integral que combine la responsabilidad individual, políticas públicas efectivas, inversión en infraestructura y el desarrollo de tecnologías innovadoras. Implementar estrategias de manera coordinada y sistémica contribuye a evitar la sobrecarga de rellenos sanitarios, siendo esta una medida crucial para proteger el medio ambiente, mejorar la salud pública y promover una economía circular más resiliente.

Al momento de aportar una solución estratégica para este problema, los modelos matemáticos desempeñan un papel crucial. Aplicados de manera efectiva conducen a soluciones promisorias y son un apoyo clave en la toma de decisiones para una gestión sostenible de este tipo de residuos. Ejemplo de esto son los modelos de predicción de generación de residuos, utilizados en general para predecir la cantidad de residuos textiles generados en el tiempo (Rosecky et al., 2021). Los modelos de optimización para el reciclaje, utilizados para optimizar la recolección, clasificación y procesamiento de residuos textiles, maximizando el reciclaje y minimizando los costos (Simsek et al., 2022). Cabe mencionar también los modelos de análisis de ciclo de vida, aplicados para cuantificar el impacto ambiental de diferentes estrategias de gestión de residuos textiles, considerando aspectos como las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de agua y la generación de desechos (Bianco et al., 2023).

La ciudad de Bahía Blanca no está ajena a esta problemática, coincidiendo diferentes actores que los residuos textiles son un verdadero problema. Atendiendo a necesidades de diferentes sectores de la ciudad, es posible plantear un modelo matemático para la localización óptima de una planta de transferencia de residuos textiles para centralizar la gestión de estos desechos, mejorando su manejo, procesamiento y valorización. Este modelo no exige la restricción de una ubicación alejada de la zona urbana, dado que una planta de transferencia de residuos textiles no genera resistencias en el vecino de la ciudad por su bajo nivel de impacto ambiental. De esta forma, las restricciones a tener en cuenta solo involucran cuestiones logísticas y limitaciones de capacidad de trabajo. Documentación brindada por el municipio acerca de la determinación de la composición de los residuos sólidos urbanos de la ciudad aporta la información que permite definir un modelo matemático acorde a las necesidades de la comunidad (Municipio de Bahía Blanca, 2022). A partir de este modelo será posible identificar la ubicación más adecuada para esta planta, minimizando los costos de transporte y maximizando la eficiencia del sistema.

## Modelo matemático del problema basado en la ciudad de Bahía Blanca

El informe acerca de la determinación de la composición de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Bahía de Blanca permite establecer la cantidad de residuos textiles producidos anualmente en las 6 zonas en las que se realizaron las muestras primarias. Estas zonas fueron determinadas como muestra representativa de diferentes niveles socioeconómicos y de distintos sectores geográficos de la ciudad a partir de una clasificación de las rutas de recolección (Municipio de Bahía Blanca, 2022).

Por cada zona se determinó la cantidad de residuos en kg que se generan y se establecieron como potenciales puntos de recolección los centroides de cada zona delimitada por las rutas. A partir del flujo de residuos por cada

zona representativa se realizó la extrapolación a las 16 regiones adicionales siguiendo la taxonomía socioambiental establecida en el estudio realizado acerca del consumo cultural en la ciudad de Bahía Blanca (Leonardi et al, 2019). El objetivo es ubicar un centro de reciclado en un punto de la ciudad, minimizando el costo de transporte desde los puntos de recolección hasta este centro y teniendo en cuenta que el flujo de residuos no es uniforme respecto a las 22 zonas. El problema se representa como un modelo de localización de mediana ponderada.

Definición de variables de decisión:

- $Z_i$ : Zona  $i$  (donde  $i=1,2, \dots, 22$ ).
- $P_i$ : Punto de recolección en la zona  $i$ .
- $W_i$ : Cantidad de residuos generados en el punto de recolección  $P_i$  (en kg).
- $(x_i, y_i)$ : Coordenadas del punto de recolección  $P_i$ .
- $(X, Y)$ : Coordenadas del centro de reciclado que queremos determinar.
- Parámetros del modelo:
  - $C$ : Capacidad de carga de un camión (en kg).
  - $k$ : Número de camiones disponibles.
  - $T_i$ : Número de viajes necesarios desde el punto de recolección  $P_i$  al centro de reciclado.
  - $\alpha_i$ : Coeficiente de transitabilidad desde el punto  $P_i$  al centro de reciclado (ajusta el costo de transporte según la dificultad de la ruta).

Conjunto de restricciones:

- Restricción de Capacidad Total: La capacidad total de transporte debe ser suficiente para todos los residuos generados. Esto se puede formular como:

$$\sum_{i=1}^{22} W_i \leq k \cdot C$$

- Restricción de Capacidad por Punto de Recolección: Cada punto de recolección  $P_i$  debe cumplir con la restricción de capacidad de los camiones. Esto significa que los residuos generados en cada punto no pueden exceder la capacidad total de los camiones disponibles para ese punto.

$$T_i = \left\lceil \frac{W_i}{C} \right\rceil$$

Donde  $\lceil \cdot \rceil$  denota la función techo, que redondea el argumento al siguiente entero mayor o igual.

- Función Objetivo: el propósito es minimizar el costo de transporte, que se modela como la distancia ponderada por la cantidad de residuos considerando el número de viajes necesarios. Suponiendo que el costo de transporte es proporcional a la distancia y la cantidad de residuos, la función objetivo se expresa como:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^{22} T_i \cdot \alpha_i \cdot d(P_i, (X, Y))$$

donde  $d(P_i, (X, Y))$  es la distancia entre el punto de recolección  $P_i$  y el centro de reciclado  $(X, Y)$ . Esta distancia  $d(P_i, (X, Y))$  entre puntos no será la distancia euclídea por la imposibilidad de realizar recorridos rectilíneos directos por tierra en esta zona urbana. En un sistema de coordenadas rectangulares, dos puntos y la intersección de la recta vertical que contiene a uno de ellos con la recta horizontal que contiene al otro determinan un triángulo rectángulo. En este caso, la distancia entre los puntos será la suma de los catetos de dicho triángulo. Esto es:

$$d(P_i, (X, Y)) = |x_i - X| + |y_i - Y|$$

Resolución y análisis

La delimitación de las 6 zonas muestreadas para la determinación de la composición de los residuos sólidos urbanos es la que se muestra en la figura 1. La figura 2 muestra el resultado de la extrapolación a los barrios restantes de la ciudad. Para la resolución del problema se utilizaron como parámetros  $C=1500$  kg,  $k=10$ , y los parámetros restantes son los que se muestran en las tablas 1 y 2.

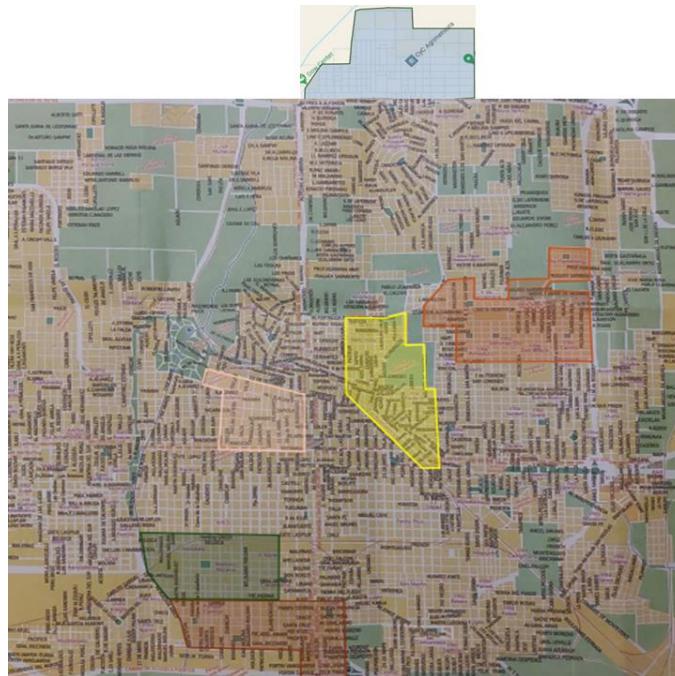


Figura 1. Delimitación de zonas muestreadas para la determinación de la composición de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Bahía Blanca.

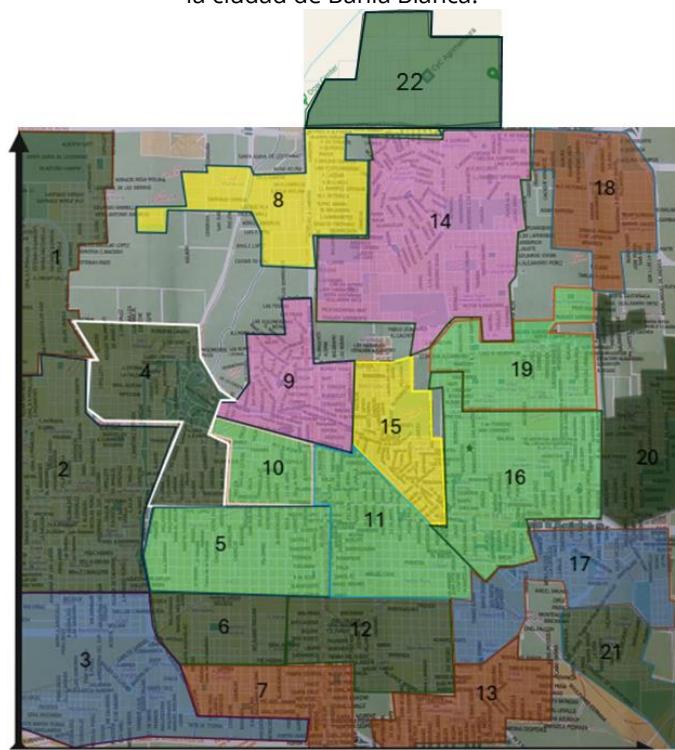


Figura 2. Delimitación de las restantes zonas de la ciudad de Bahía Blanca.

Los coeficientes  $\alpha_i$  se establecieron como un valor de densidad del recorrido por cada zona. Para determinarlo se utilizó un enmascaramiento de la imagen del mapa, como se muestra en la figura 3, estableciendo el número de pixeles correspondientes a los caminos a recorrer. De esta forma cada  $\alpha_i$  es el cociente entre pixeles de recorrido y pixeles totales de la zona.



Zona	Tipo	$W_i$	$\alpha_i$
A		632,12	0.68
B		266,95	0.7385
C		705,15	0.7772
D		722,78	0.8762
E		591,83	0.9198
F		501,17	0.912

Tabla 1: Parámetros por tipo de zona.

Zona	Tipo	Coordenadas	
		$x_i$	$y_i$
1	F	1.31	6.52
2	F	1.81	3.59
3	C	5.4	3.5
4	F	2.69	5.08
5	B	4.01	2.79
6	F	4.01	1.62
7	A	4.7	0.713
8	D	5.13	8.13
9	E	4.82	5.38
10	B	6.32	3.17
11	B	6.19	1.5

Zona	Tipo	Coordenadas	
		$x_i$	$y_i$
12	F	7.53	0.416
13	A	7.31	7.52
14	E	6.53	4.55
15	D	8.61	3.98
16	B	9.11	2.86
17	C	9.59	2.54
18	A	9.98	8.05
19	B	8.59	5.61
20	F	10.28	3.82
21	F	9.56	1.52
22	C	6.24	9.75

Tabla 2: Coordenadas de los centroides de cada zona.

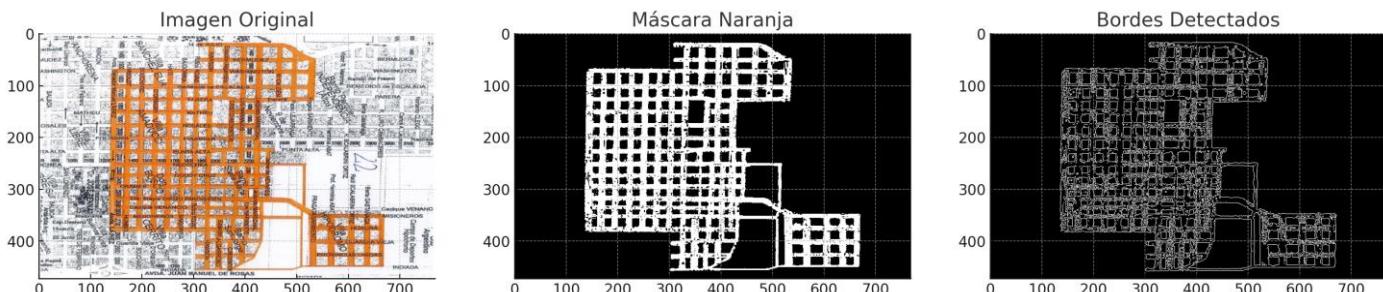


Figura 3. Pasos en la obtención de la densidad de recorrido

El problema se resolvió con el algoritmo optimizador de la librería PuLP que provee Python, ejecutado en un procesador Intel Core i7 de 2.4 GHz. Las coordenadas se establecieron ubicando el punto (0, 0) en la intersección de las rutas 3 y 33 (camino Sesquicentenario).

Al no existir restricción acerca de la posible locación del centro de transferencia, el optimizador tiene “permiso” para buscar el punto óptimo dentro del casco urbano, y su tendencia es buscar un punto que actúe como centroide de las zonas parceladas. El punto determinado por el optimizador se ubica en las coordenadas (6.24, 3.98) que a partir del sistema de referencia establecido corresponden a la zona del barrio Bella Vista en su límite sudoeste con el barrio La Falda. Esta ubicación responde a la designación de parámetros del optimizador establecida a partir de un criterio socioambiental para la clasificación de las zonas, pero estos parámetros pueden ser modificados sopesando las distintas zonas siguiendo otros criterios como son la densidad de población o la importancia estratégica.

## Conclusiones

La implementación de un modelo matemático para la localización óptima de plantas de transferencia de residuos textiles en la ciudad de Bahía Blanca representa un avance significativo hacia una gestión más eficiente y sostenible de estos desechos. A través del análisis y la optimización de factores logísticos y de capacidad, se pueden identificar ubicaciones estratégicas que no solo minimizan los costos de transporte, sino que también mejoran la eficiencia en el manejo y procesamiento de los residuos textiles.

La aplicación de estos modelos matemáticos no solo ofrece una solución práctica para la problemática local, sino que también se presenta como un ejemplo replicable en otras ciudades con desafíos similares. Al reducir la carga sobre los rellenos sanitarios y promover prácticas más sostenibles, esta estrategia contribuye a la protección del medio ambiente, mejora la salud pública y fomenta una economía circular resiliente.

El aprovechamiento de los conocimientos en la resolución de modelos de optimización constituye una herramienta poderosa en la transición hacia una gestión de residuos más responsable y sostenible. Este enfoque integral y coordinado es esencial para abordar eficazmente los desafíos ambientales actuales y futuros, mostrando el valor de las soluciones matemáticas en la toma de decisiones estratégicas.

## Referencias

- Sandin, G y Peters, G. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling- A review. *Journal of cleaner Production*, 184, 353-365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266>.
- Rosecky, M., Somplák, R., Slavík, J., Kalina, J., Bulková, G. y Bednár, J. (2021). Predictive modelling as a tool for effective municipal waste management policy at different territorial levels. *Journal of Environmental Management*, 291,112584. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112584>.
- Bianco, I., De Bona, A., Zanetti, M. y Panepinto, D. (2023). Environmental Impacts in the Textile Sector: A Life Cycle Assessment Case Study of a Woolen Undershirt. *Sustainability*, 15,11666. <https://doi.org/10.3390/su151511666>.
- Simsek, E., Demirel, Y., Ozturk, E. y Kitis, M. (2022). Use of multi-criteria decision models for optimization of selecting the most appropriate best available techniques in cleaner production applications: A case study in a textile industry. *Journal of Cleaner Production*, 335, 130311. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130311>
- Municipio de Bahía Blanca (2022). Determinación de la composición de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Bahía Blanca. Departamento de saneamiento ambiental.
- Leonardi, V.S, Elias, S.R., Tarayre, C, Tortul, M. (2019). Análisis del consumo cultural en barrios de Bahía Blanca, Argentina, 2019. *Economía, Sociedad y Territorio*. <https://doi.org/10.22136/est20231844>