

# Optimización del Reparto de Agua en Pipas con Restricciones Temporales, de Almacenamiento y Equidad: Un Modelo Inspirado en el Contexto Mexicano

Adrian-Josue Guel-Cortez

## Abstract

En diversas regiones de México, el reparto de agua mediante camiones cisterna (pipas) constituye una solución de emergencia ante el desabasto de agua potable. Sin embargo, este sistema presenta múltiples retos logísticos y de equidad que aún no han sido abordados mediante herramientas formales de optimización. Este trabajo propone un modelo de programación lineal con sensibilidad temporal que busca mejorar la eficiencia y justicia del reparto de agua en pipas. El modelo incorpora restricciones realistas inspiradas en casos nacionales: capacidad máxima de camión, límites de demanda por colonia, horas operativas diarias, mínimos de entrega por día y semana, y capacidad de almacenamiento. Además, se considera la variación del costo según la franja horaria del reparto. La solución obtenida permite simular políticas públicas viables y adaptables en contextos reales, ofreciendo una herramienta accesible para ingenieros e instituciones interesadas en mejorar la gestión de recursos hídricos en condiciones de escasez.

## Introducción

La escasez de agua en diversas regiones de México ha dado lugar a un sistema de distribución de emergencia a través de camiones cisterna, conocidos como *pipas*. Este mecanismo, aunque esencial, presenta retos operativos, logísticos y sociales considerables. En ciudades como La Paz, San Luis Potosí, Monterrey y la Ciudad de México, los gobiernos han lanzado iniciativas para reforzar el abastecimiento mediante pipas, incluyendo la expansión de flotas [2], entrega de unidades adicionales [3], decretos presidenciales para asegurar el suministro [5] y programas sociales como “Agua Gratuita para tu Familia” [4]. Sin embargo, gran parte de estos sistemas se operan sin modelos de optimización formal, lo que limita su eficiencia y equidad.

En zonas urbanas densamente pobladas como la Ciudad de México, se han documentado problemas graves de distribución y apropiación desigual del recurso hídrico, donde incluso se reportan protestas por robo de agua a través de pipas públicas [7]. Este panorama se ve agravado por tensiones políticas e institucionales que obstaculizan soluciones sostenibles y técnicas al problema [9].

A pesar de estos retos, emergen oportunidades desde la ingeniería de control y optimización para proponer soluciones prácticas a la distribución de agua en pipas. En este trabajo formulamos un modelo matemático de programación lineal, centrado en el problema de asignación de entregas, considerando factores críticos como la capacidad de los camiones, la demanda máxima por punto de entrega, ventanas temporales diarias, equidad operativa, mínimos de reparto por colonia y límites de almacenamiento semanal.

También se reconoce el papel creciente de la tecnología en el sector privado y social. Empresas mexicanas están utilizando herramientas como sensores IoT y algoritmos de optimización para mejorar la eficiencia del reparto [6], mientras que organizaciones civiles han desarrollado soluciones como captación pluvial o aplicaciones móviles para gestionar solicitudes comunitarias de agua [10]. Estas innovaciones representan una base valiosa para integrar modelos inteligentes en la operación real del sistema [1], y refuerzan el rol de actores no gubernamentales en el combate al desabasto [8].

En este contexto, proponemos un modelo de optimización con horizonte semanal que incorpora:

- Variación de costos por bloque horario (mañana, mediodía, tarde).
- Restricciones operativas por capacidad, tiempo de operación y demanda.

- Mínimos de reparto diarios por camión para balancear la carga operativa.
- Mínimos y máximos semanales por colonia, considerando su demanda y capacidad de almacenamiento.
- Salida visual interactiva para evaluación de resultados.

Este modelo, aunque preliminar, muestra que es factible aplicar herramientas accesibles de optimización matemática para diseñar políticas de reparto más justas y eficientes, sirviendo como base para futuras aplicaciones en tiempo real con datos reales de infraestructura y demanda. Además, busca motivar a más profesionales de la ingeniería a involucrarse activamente en la solución de problemas sociales críticos como el acceso al agua.

## Descripción del Problema

Modelamos un problema de distribución de agua con sensibilidad temporal en un horizonte de planificación de 7 días, con:

- $n = 3$  camiones cisterna
- $m = 4$  puntos de entrega
- $T = 21$  bloques temporales (3 por día)

El objetivo es minimizar el costo total de entrega cumpliendo con restricciones de capacidad, tiempo, almacenamiento y equidad, todas ellas inspiradas en condiciones reales observadas en programas de distribución de pipas en México.

## Variables de Decisión

$$x_{ijt} \geq 0 \quad (\text{litros entregados del camión } i \text{ al punto } j \text{ en el bloque temporal } t)$$

## Parámetros

$C$	Capacidad máxima del camión por bloque temporal
$R$	Límite de demanda por punto de entrega en cada bloque
$r$	Tasa de entrega (litros por hora)
$H$	Horas disponibles por camión por bloque
$D_{\min}$	Mínimo total semanal a entregar
$P_j^{\min}$	Mínimo semanal que debe recibir el punto $j$
$P_j^{\max}$	Capacidad máxima de almacenamiento en el punto $j$
$Q_{i,d}^{\min}$	Mínimo que debe entregar el camión $i$ en el día $d$
$c_{ijt}$	Costo de entrega del camión $i$ al punto $j$ en el tiempo $t$

## Función Objetivo

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ijt} \cdot x_{ijt}$$

## Restricciones

### 1. Capacidad del camión por bloque temporal

$$\sum_{j=1}^m x_{ijt} \leq C \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

(Modela el límite físico de cada camión para no repartir más de su capacidad por turno)

## 2. Límite de demanda por punto en cada bloque

$$\sum_{i=1}^n x_{ijt} \leq R \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

(Refleja que las colonias no deben recibir más agua de la que pueden aceptar por jornada)

## 3. Mínimo total semanal

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ijt} \geq D_{\min}$$

(Asegura que el sistema entregue una cantidad base de agua para cubrir necesidades básicas)

## 4. Tiempo máximo por camión por bloque

$$\sum_{j=1}^m \frac{x_{ijt}}{r} \leq H \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

(Captura la duración total operativa considerando la velocidad de entrega y horas laborales)

## 5. Mínimo semanal por colonia

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n x_{ijt} \geq P_j^{\min} \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$$

(Evita que colonias vulnerables queden excluidas del servicio durante la semana)

## 6. Mínimo diario por camión

Sea  $\mathcal{T}_d$  el conjunto de bloques temporales del día  $d$ . Entonces:

$$\sum_{t \in \mathcal{T}_d} \sum_{j=1}^m x_{ijt} \geq Q_{i,d}^{\min} \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall d \in \{1, \dots, 7\}$$

(Busca balancear el trabajo diario de la flota para evitar sobrecargas y subutilización)

## 7. Capacidad de almacenamiento por colonia

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n x_{ijt} \leq P_j^{\max} \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$$

(Evita el desperdicio por sobrellenado de tinacos y cisternas comunitarias)

## 8. No negatividad

$$x_{ijt} \geq 0 \quad \forall i, j, t$$

(Garantiza que las entregas sean cantidades reales y no negativas)

## Discusión de Resultados

La solución obtenida mediante programación lineal genera una asignación detallada de entregas por camión, por colonia y por franja horaria durante un horizonte semanal. En la Figura 1 se observa cómo se distribuye el volumen de agua por camión y punto de entrega en cada uno de los 21 bloques temporales.

El modelo asigna patrones operativos diferenciados entre camiones:

- **El Camión 0** realiza entregas constantes de 100 litros por bloque exclusivamente al Punto 1, cumpliendo con su cuota diaria mínima de reparto. Su patrón indica que el modelo lo utiliza como un “camión de apoyo” para cubrir cuotas base sin intervenir en zonas de alta demanda, posiblemente debido a su costo relativo o su disponibilidad operativa.
- **El Camión 1** opera con un patrón similar al Camión 0, pero centrado exclusivamente en el Punto 0. Esto sugiere que ambos camiones fueron asignados para cubrir colonias con menor variabilidad de demanda, utilizando trayectos más estables en términos de tiempo y costo.
- **El Camión 2** absorbe la mayor carga operativa, entregando altos volúmenes a múltiples colonias, en particular al Punto 3, donde consistentemente entrega hasta los 600 litros máximos permitidos por franja horaria. Esto refleja que el modelo encuentra en el Camión 2 una opción más económica o flexible para abastecer las colonias más demandantes. Su patrón de operación es dinámico, alternando entre puntos y horarios, lo que indica un aprovechamiento estratégico del tiempo y la capacidad.

Desde una perspectiva de política pública, los resultados reflejan una asignación eficiente pero desigual en términos de uso de flota. Aunque todos los camiones cumplen su mínimo diario, solo uno realiza entregas sustanciales. Esto puede interpretarse como un fenómeno de “especialización operativa”, donde el modelo asigna los recursos de forma óptima, pero no equitativa en esfuerzo.

Además, el modelo logra cumplir con las restricciones de almacenamiento por colonia, ya que ningún punto presenta acumulación excesiva o repetitiva de entregas. La variabilidad horaria también es aprovechada, con cambios de franja según la combinación costo-demanda.

Estos resultados son consistentes con las observaciones en programas reales de México, donde se identifica que algunas pipas cubren zonas críticas con mayor intensidad, mientras otras realizan rondas básicas por zonas de menor prioridad o población. El uso de restricciones como los mínimos por camión y por colonia, así como los máximos de almacenamiento, permite al modelo adaptarse a contextos operativos reales, sirviendo como base para simulaciones futuras más complejas (por ejemplo, con refills, distancias o fallas).

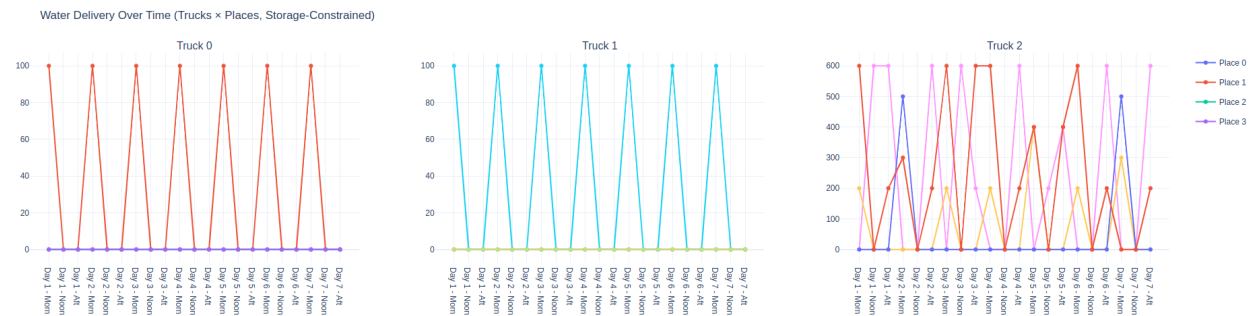


Figure 1: Distribución temporal de entregas de agua por camión y punto de entrega.

## Conclusiones

Este trabajo propone un modelo de optimización con sensibilidad temporal que permite asignar recursos hídricos de manera eficiente y justa en contextos urbanos con desabasto, inspirándose en casos reales de distribución mediante pipas en México. La formulación matemática demuestra ser una herramienta viable

para apoyar decisiones logísticas complejas, integrando restricciones operativas, sociales y económicas en un marco lineal.

Sin embargo, para que este tipo de modelos pueda ser utilizado en sistemas de reparto en tiempo real, es necesario enfrentar un reto crítico: la estimación dinámica de parámetros. En contextos reales, prácticamente todos los parámetros relevantes—no solo los costos  $c_{ijt}$ , sino también la demanda, las capacidades operativas, la disponibilidad de vehículos y los tiempos de operación—son **variables y dependientes del contexto**, lo cual exige una integración estrecha entre optimización, estimación y control.

Para abordar esta complejidad, se propone extender el modelo hacia esquemas de estimación en línea. Esto podría lograrse mediante el uso de técnicas clásicas de control automático como **filtros de Kalman** (y sus variantes extendidas o no lineales), que permiten fusionar datos ruidosos y estimar estados o parámetros ocultos del sistema. Asimismo, el uso de modelos de **machine learning** entrenados sobre datos históricos y actualizados en tiempo real puede complementar esta estimación, especialmente en la predicción de patrones de demanda o en la identificación de costos dinámicos influenciados por variables externas como el tráfico o las condiciones meteorológicas.

En esta línea, el siguiente paso natural en esta investigación es el desarrollo de un **sistema adaptativo de planificación**, donde los parámetros del modelo se actualicen constantemente a partir de datos sensorizados (GPS, medidores de caudal, reportes ciudadanos, etc.), y donde la optimización se ejecute de forma recursiva y automatizada. Este enfoque permitiría transitar hacia políticas de reparto verdaderamente inteligentes, sensibles a la variabilidad del entorno y capaces de responder con agilidad a nuevas condiciones de escasez.

Finalmente, este estudio resalta el papel que puede jugar la ingeniería de control, no solo en el diseño de sistemas físicos, sino también en el modelado y gestión de problemas sociales complejos. Integrar herramientas de estimación, predicción y optimización ofrece un camino prometedor para mejorar la resiliencia y la equidad en la distribución de recursos vitales como el agua.

## References

- [1] AdNoticias. Tecnología y crisis del agua: oportunidades y retos, 2023. Consultado en abril de 2025.
- [2] CN13 Noticias. RGC entregó 40 pipas para abasto de agua en SLP, 2023. Consultado en abril de 2025.
- [3] Diario El Independiente. Con la entrega de 4 nuevas pipas... en La Paz, 2023. Consultado en abril de 2025.
- [4] El Economista. Ricardo Gallardo arranca el programa Agua Gratuita para tu Familia, 2023. Consultado en abril de 2025.
- [5] Gobierno de México. Decreto para garantizar agua en Zona Metropolitana de Monterrey, 2023. Consultado en abril de 2025.
- [6] Mano Mexicana. Empresa mexicana mejora distribución de agua con tecnología, 2023. Consultado en abril de 2025.
- [7] Mexico News Daily. 'Pipas' and protests: Mexico City's water theft problem, 2023. Consultado en abril de 2025.
- [8] The Borgen Project. The nonprofit ensuring clean water in Mexico City, 2023. Consultado en abril de 2025.
- [9] The Revelator. While Mexico Plays Politics With Its Water..., 2023. Consultado en abril de 2025.
- [10] UNINTERPress. Aplicación gratuita para combatir desabasto en Cuernavaca, 2023. Consultado en abril de 2025.