

# Reduction of Water Scarcity in Water Management Boards of the Central District with Linear Programming

Estefany Waleska Robles Zúniga, Estudiante de Ingeniería Industrial<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras, [estefanyrobles@unitec.edu](mailto:estefanyrobles@unitec.edu)

*Abstract– This study focuses on developing a plan for the distribution of drinking water through tanker trucks for the Water Management Boards of the Central District. It employs linear programming to alleviate water scarcity. The existing distribution was evaluated, identifying areas for improvement to ensure equitable and consistent access through tanker trucks. Mapping and interviews were used to mathematically model the issue of poor planning in water supply in the Central District of Honduras.*

*The quantitative methodology delimited variables and constraints, utilizing integer linear programming and OpenSolver in Excel to create a solving model, validated by experts and optimality testing. A weekly supply plan was formulated based on the optimal solution, providing a schedule.*

*Findings include 2816 decision variables and 2924 constraints obtained through interviews. The proposed model estimated a reduction in the scarcity index from 1185% to 369%. Validation was done through triangulation and optimality analysis, generating the interval of optimality and feasibility. The study concludes with findings, conclusions, and recommendations to improve water supply in Honduran communities.*

*Keywords– water scarcity, water distribution, Water Management Boards, operations research, linear programming*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

# Reducción de Escasez de Agua en Juntas de Agua del Distrito Central con Programación Lineal

Estefany Waleska Robles Zúniga, Estudiante de Ingeniería Industrial<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras, [estefanyrobles@unitec.edu](mailto:estefanyrobles@unitec.edu)

**Resumen Ejecutivo**– Este estudio se enfoca en desarrollar un plan de distribución de agua potable mediante camiones cisterna para las Juntas Administradoras de Agua del Distrito Central, utilizando programación lineal para mitigar la escasez de agua. Se evaluó la distribución existente, identificando áreas de mejora para asegurar un acceso equitativo y constante a través de camiones cisterna. Se empleó mapeo y entrevistas para modelar matemáticamente la problemática de planificación deficiente en el abastecimiento de agua en el Distrito Central, Francisco Morazán, Honduras.

La metodología cuantitativa utilizada delimitó variables y restricciones, empleando la programación lineal entera y OpenSolver en Excel para crear un modelo resolvente, validado por expertos y pruebas de optimalidad. Se formuló un plan de abastecimiento semanal a partir de la solución óptima, proporcionando un horario.

Los hallazgos incluyen 2816 variables de decisión y 2924 restricciones, obtenidos mediante entrevistas. El modelo propuesto estimó la reducción del índice de escasez del 1185% al 369%. La validación se realizó mediante triangulación y análisis de optimalidad, generando el intervalo de optimalidad y factibilidad. El estudio concluye con hallazgos, conclusiones y recomendaciones para mejorar el suministro de agua en comunidades hondureñas.

**Keywords**– escasez de agua, distribución de agua, juntas de agua, investigación de operaciones, programación lineal

## I. INTRODUCCIÓN

El problema central de este estudio radica en la deficiente infraestructura de alcantarillado en Honduras, que repercute severamente en las comunidades denominadas barrios en desarrollo. Estas comunidades dependen de métodos alternativos para obtener agua, como el acarreo manual, la perforación de pozos, o la contratación de camiones cisterna. Las Juntas Administradoras de Agua, que proveen agua potable, suministran agua hasta cada 12 días por medio de camiones. La ausencia de un sistema estructurado para la distribución de agua potable contribuye a la escasez, debido a que la distribución se realiza de forma empírica y reactiva.

La escasez de agua en Honduras es un fenómeno alarmante donde la oferta disponible no cumple con la demanda de consumo, afectando tanto a nivel doméstico como industrial. Según el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT), para el año 2012 aproximadamente el 20% del territorio nacional experimentaba una escasez hídrica significativa [1], demostrando que más de la mitad del país carece de un suministro de agua adecuado. La situación se vuelve crítica entre enero y abril de cada año, debido al incremento del consumo poblacional, los incendios, el fenómeno del niño y el manejo inapropiado de este recurso.

Datos proporcionados por el Ente Regulador de Agua Potable y Saneamiento (ERSAP) indican que la demanda de agua en el sector rural hondureño alcanza aproximadamente

cuatro barriles por vivienda semanalmente. Esta cifra subraya la magnitud del desafío que enfrenta el país para garantizar un abastecimiento equitativo y suficiente de agua potable, especialmente en las zonas rurales que son las más afectadas por la deficiencia o inexistente infraestructura de saneamiento y distribución de agua en muchas regiones.

El objetivo general de la investigación es crear un plan eficiente para el abastecimiento de agua mediante camiones cisterna, destinado a 44 juntas de agua en el Distrito Central, utilizando técnicas de investigación de operaciones. Así mismo, se concentra en satisfacer la demanda y optimizar las horas laborales para mitigar la escasez de agua en las comunidades afectadas. De manera más específica, se definieron las variables y restricciones indispensables para la formulación del modelo, la búsqueda de soluciones óptimas y su posterior validación con los actores beneficiarios.

En contextos internacionales, estudios similares han ofrecido soluciones innovadoras. Tal es el caso de Brasil, en la cual desarrollaron una red de distribución de agua mediante programación matemática determinista, considerando tuberías, nodos y bucles. Se optimizaron longitudes y diámetros de tuberías para minimizar costos, incorporando restricciones de balances en nodos, energía en bucles y ecuaciones hidráulicas. Concluyeron que, aunque complejas, las soluciones son funcionales para dos ciudades pequeñas de Brasil [2].

Por otro lado, expertos venezolanos, utilizaron la programación lineal para determinar un plan óptimo de distribución de agua en las áreas rurales de la comuna Combarbalá en Chile, mediante camiones cisterna. El objetivo consistió en minimizar viajes y reducir costos de transporte de agua. La solución propuesta logró un ahorro del 21% en los costos operativos y garantizó la distribución de agua a toda la población [3].

En Honduras, la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) en 2021 llevó a cabo una investigación para evaluar el estado actual, los problemas y las oportunidades de mejora del servicio de agua en Tegucigalpa. El objetivo del proyecto fue describir la situación para mejorar los servicios prestados a la población. Como agencia de cooperación, propusieron medidas estructurales y posibilidades de apoyo no estructurado a través de cooperación técnica, culminando en un plan integral para mejorar el servicio del suministro de agua en Tegucigalpa [4].

Este artículo se estructura en secciones que incluyen la metodología aplicada, los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas de la investigación. Además, se ofrecen recomendaciones y se exploran otras aplicaciones de los hallazgos para contribuir a la resolución de esta problemática en Tegucigalpa y regiones similares.

## II. METODOLOGÍA

### A. Enfoque y Alcance

La presente investigación se llevó a cabo mediante un enfoque cuantitativo. Este enfoque fue seleccionado porque todos los objetivos se completaron mediante herramientas de ingeniería que involucran la recolección de datos numéricos y el análisis de estos para brindar resultados y comparaciones medibles con el fin de obtener conclusiones más específicas y acertadas. [5]

El alcance de esta investigación se definió como correlacional ya que tuvo como finalidad conocer la relación entre las variables y qué efecto tuvo una sobre la otra. Este alcance fue establecido porque se quiso relacionar las variables de capacidad del camión cisterna, demanda, oferta de las fuentes de agua con la minimización de los viajes de los camiones cisterna que representa una reducción del costo y recursos. Todas estas variables contienen un valor numérico y se relacionarán a través de la solución de un modelo de programación lineal. [5]

### B. Población, muestreo y muestra

#### i. En relación con las Juntas de Agua

Se estableció una población de 44 juntas administradoras de agua del Distrito Central de la ciudad de Tegucigalpa capital de Honduras cuyo método de abastecimiento es a través de camiones cisterna. El muestreo del estudio se realizó a través de un muestreo aleatorio simple con 99.7% de confiabilidad usando la ecuación (1).

$$n = \frac{N(Z)^2(P)(Q)}{e^2[N - 1] + Z^2(P)(Q)} \quad (1)$$

En donde:

- $n$  = tamaño de la muestra
- $N$  = tamaño de la población
- $e$  = error
- $P$  = probabilidad a favor
- $Q$  = probabilidad en contra

Luego de realizar el cálculo mediante la fórmula de muestreo aleatorio simple, se determinó que la investigación debe llevarse a cabo con una muestra que coincide a su vez con el tamaño de la población: 44 juntas administradoras de agua del Distrito Central cuya ubicación se muestra a continuación en la Figura 1.



Fig. 1 Juntas Administradoras de Agua del Distrito Central  
Fuente: Elaboración propia

#### ii. En relación con los entrevistados

Se determinó necesario definir una segunda población para analizar a los involucrados propiamente en el proceso de recolección de agua. En esta segunda etapa, se definió como población a 13 colaboradores de la Unidad Municipal de Agua Potable y Saneamiento (UMAPS) (12 conductores de camiones cisterna y la coordinadora de cisternas). Similar al primer muestreo, a través de un muestreo aleatorio simple con 95% de confiabilidad, se seleccionaron los 13 funcionarios de la UMAPS como muestra.

### C. Nomenclatura matemática de variables analizadas

Se definieron 7 variables escritas en nomenclatura matemática para que fueran las mismas representadas en el modelo matemático (función objetivo y restricciones). Estas mismas se definieron a través de entrevistas aplicadas a los 13 sujetos seleccionados en el muestreo 2, con el fin de alimentar el modelo con datos lo más parecidos a la funcionalidad real del sistema. La nomenclatura utilizada para definir las variables es la siguiente:

- $i$  (tipo de camión cisterna el cual se usa para distribuir: 1, ..., 12)
- $j$  (destino al que se distribuye el agua: 1, ..., 44)
- $k$  (día de la semana en el cual se ejecuta la distribución: 1, ..., 7)
- $cap_i$  (capacidad del camión tipo  $i$ )
- $x_{ijk}$  (número de viajes que realiza un camión  $i$ , al destino  $j$ , en el día  $k$ )
- $D_j$  (demanda del sector  $j$ )
- $T_{ij}$  (Tiempo que tarda el traslado del camión  $i$  al destino)

#### D. Instrumentos y Técnicas

Los instrumentos utilizados para este estudio fueron:

- i. Entrevista: Se realizó un cuestionario con 10 preguntas abiertas y cerradas aplicada a los 13. La entrevista fue revisada y validada previo a la aplicación. Los datos proporcionados por la entrevista serán ingresados en el modelo.
- ii. Microsoft Forms: Instrumento diseñado para conocer la satisfacción del producto final entregado (plan de abastecimiento de agua potable) aplicado a la coordinadora de cisternas de la Unidad Municipal de Agua Potable y Saneamiento UMAPS. [7]
- iii. Google Maps: Instrumento requerido para definir las distancias existentes entre la fuente de abastecimiento y las juntas de agua que se requieren abastecer.

Por otro lado, las técnicas de análisis utilizadas incluyeron:

- i. Programación Lineal: Técnica seleccionada para transformar el modelo de variables y restricciones en un plan de abastecimiento de agua para las juntas de agua [8].
- ii. Programación lineal entera: Técnica definida para establecer variables con numeración entera. [9]
- iii. OpenSolver de Excel: Técnica utilizada para buscar, con los datos recolectados, la solución óptima o viable del modelo de variables y restricciones [10]. El Open Solver se muestra a continuación en la Figura 2.

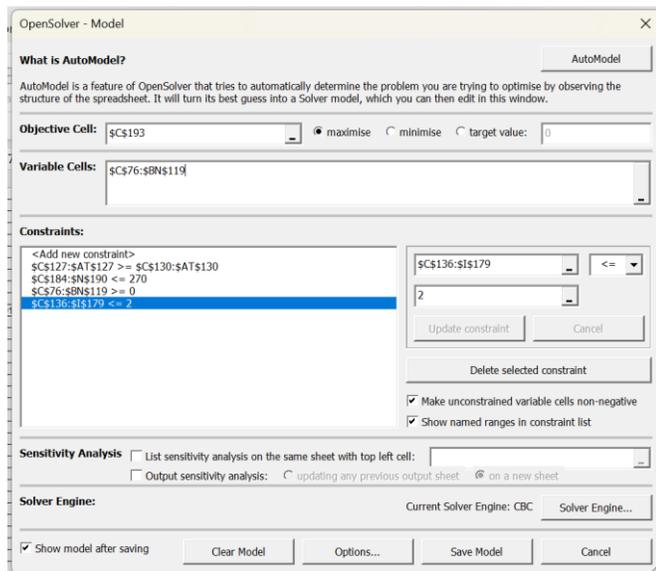


Fig. 2 Open Solver

#### E. Bases Metodológicas

Este estudio emplea la programación lineal para optimizar la distribución de agua potable en el Distrito Central de Honduras, abordando un problema complejo con múltiples restricciones y objetivos, ya que es una técnica que brinda la solución óptima global. También, por su compatibilidad con softwares, la programación lineal ofrece soluciones precisas.

Finalmente, como se requería un modelo de asignación de recursos (camiones) limitando las horas de trabajo y las entregas, esta técnica resultó eficiente.

Este modelo matemático busca optimizar la asignación del recurso, transformando las necesidades de agua, capacidades de camiones cisterna y distancias entre comunidades en variables y restricciones lineales para reducir el índice de escasez de agua. La utilización de la programación lineal garantiza un plan de distribución que maximiza la cobertura y mantiene la equidad entre las comunidades afectadas por la escasez de agua.

La complejidad del modelo se refleja en la cantidad de variables de decisión y restricciones, derivadas de un meticuloso proceso de recopilación de datos mediante entrevistas, garantizando una representación precisa de la realidad operativa del Distrito Central. Aunque este detalle implica un mayor esfuerzo computacional, OpenSolver es capaz de manejar extensos modelos de programación lineal en plataformas como Excel.

Aunque la programación lineal es un método eficaz, tiene limitaciones. Principalmente, asume relaciones lineales entre variables, simplificando la complejidad del sistema de distribución de agua, lo que puede no reflejar totalmente la realidad. La precisión de los resultados también depende de la actualidad y exactitud de los datos utilizados, y cualquier imprecisión puede afectar la eficacia de las recomendaciones. Estas limitaciones se mitigaron parcialmente mediante la validación del modelo con expertos y pruebas de optimalidad, pero aún deben considerarse al interpretar los resultados y planificar futuras acciones.

### III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### A. Recolección de información a través de entrevistas a personal de la UMAPS

Como se plantea en el muestreo 2, se realizaron entrevistas a 13 funcionarios que trabajan en la UMAPS que participan directamente en la distribución de agua potable a las colonias marginales mediante camiones cisterna y dentro de los hallazgos más relevantes para definir el modelo matemático se establecieron:

- i. Existen 12 camiones cisterna disponibles para distribución de agua en la UMAPS
- ii. Los camiones cisterna se abastecen a 77 barriles, aunque tengan una capacidad real para 88 barriles
- iii. Debido a restricciones de capacidad de almacenamiento y pago, solamente se permite llevar 2 viajes por día a cada junta administradora de agua
- iv. Se tiene una disponibilidad de 4.5 horas para abastecer a las juntas de agua (7:30 a.m. – 12:00 p.m.)

### B. Demanda de las Juntas Administradoras de Agua

Debido a la falta de información demográfica de las juntas administradoras de agua por parte de la UMAPS, se buscó el dato de la población de manera alternativa. A través de investigación, se encontró un estudio realizado por Vargas et al. en 2022 [11] que enumera la cantidad de viviendas que componen a cada Junta Administradora de Agua, respaldado por la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), el Observatorio Económico Universitario y de Emprendimiento, el Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales y el Fondo de Población de Naciones Unidas.

TABLA I  
CANTIDAD DE VIVIENDAS POR JUNTAS ADMINISTRADORAS DE AGUA

Junta Administradora de Agua	Cantidad de viviendas
Mirador de oriente	280
Lomas Universitarias	470
Enmanuel	262
La Cañada	200
Manzanitos Mololoa	870
Unidad y Fuerza	800
Aldea Santa Cruz	350
Millenium Sur	170
Altos de la Laguna	468
El Guanábano	376
Ciudad Cataluña	366
Altos de la soledad	488
Ciudad Berlín	350
Ciudad Guzmán	225
Villa de San Miguel	16
Fortín Hernández	478
Santa Clara	232
Monte de los Olivos	410
Altos de la Lomita	460
Quebrachitos Ojo de Agua	295
José Trinidad Cabañas	147
La Ciénega	120
Aldea Villa Vieja	470
Aldea San José	500
Reynel Funez	2200
La Finca	478
Nueva Jerusalén No.2	61
Aldea San José de Soroguara	259
Brisas de Oriente	325
El Japón No.2	465
Peña Colorada	471
Villa Madrid	176
Villa Oriente	476
Aldea la Soledad	299
Mary Flakes de Flores	1500
Monte Fresco	200
Dora de Asfura	250
La Fuente	84
Buena Vista	82
Nueva Capital	3800
Aldea Las Pozas	470
La Huerta	110
El Buen Samaritano	262
Villa Linda Miller	209
TOTAL DE VIVIENDAS	20980

Fuente: Elaboración propia

### B. Modelo Matemático

Para esta investigación, se planteó como objetivo la maximización de la cantidad de agua potable entregada a las juntas administradoras de agua con el fin de incrementar la oferta hídrica en las comunidades para reducir el índice de escasez. Expresada en términos matemáticos, la función objetivo se define mediante la ecuación (2).

$$\max \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{44} \sum_{k=1}^7 cap_i x_{ijk} \quad (2)$$

En donde:

$cap_i$  (capacidad del camión tipo  $i$ )

$x_{ijk}$  (número de viajes que realiza un camión  $i$ , al destino  $j$ , en el día  $k$ )

Seguidamente, para las restricciones del modelo, se plantearon cinco ecuaciones de forma general: la (3), define que lo entregado debe ser mayor o igual a la demanda de cada comunidad, la ecuación (4) define que el tiempo trabajado debe ser menor o igual a 4.5 horas por cada camión cisterna al día, la ecuación (5) define que cada junta de agua puede recibir máximo 2 viajes por día por temas de almacenamiento y capacidad económica y finalmente, las ecuaciones (6) y (7) definen que la variable de decisión deben ser solamente número enteros y no negativos.

$$\sum_{i=1}^{12} \sum_{k=1}^7 cap_i x_{ijk} \geq D_j \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^7 T_{ij} x_{ijk} \leq 4.5 \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{44} x_{ijk} \leq 2 \quad \forall k \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^7 x_{ijk} \in Z \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^7 x_{ijk} \geq 0 \quad (7)$$

En donde:

$cap_i$  (capacidad del camión tipo  $i$ )

$x_{ijk}$  (número de viajes que realiza un camión  $i$ , al destino  $j$ , en el día  $k$ )

$D_j$  (demanda del sector  $j$ )

$T_{ij}$  (Tiempo que tarda el traslado del camión  $i$  al destino  $j$ )

### C. Plan de Abastecimiento para Juntas Administradoras de Agua del Distrito Central

El modelo fue resuelto mediante la herramienta de OpenSolver, seguidamente, sus resultados fueron resumidos según las juntas de agua que debe visitar cada camión cisterna

y según los días de abastecimiento que le toca a cada junta administradora de agua. El resumen de cómo se introdujeron los datos en el software se presentan a continuación.

Con el fin de satisfacer de mejor manera la demanda de las juntas de agua, se resolvió el modelo de programación lineal planteado anteriormente utilizando el software OpenSolver de Excel. A continuación, en la Tabla II, se describen los días de la semana en los que se abastecerá cada comunidad.

Tabla II

PLAN DE ABASTECIMIENTO PARA JUNTAS ADMINISTRADORAS DE AGUA

Junta Administradora de Agua	LU	MA	MI	JU	VI	SA	DO
Mirador de oriente	2		1	2	2		
Lomas Universitarias	2	2	2	2	2	1	1
Enmanuel		1		1			
La Cañada	2	2	2	2	2	2	
Manzanitos Mololoa	1			1			
Unidad y Fuerza	2	2	2	2	2	1	2
Aldea Santa Cruz		2	2	2	1		
Millenium Sur	2	2	1	2	2		
Altos de la Laguna					1		
El Guanábano	2	2	2	2	2		
Ciudad Cataluña	1			1			
Altos de la soledad	2	2	2	2	2		
Ciudad Berlín	2	2	2	2	2		
Ciudad Guzmán	2	2	2	2	2	1	2
Villa de San Miguel	1						
Fortín Hernández	2	2	2	2	2		
Santa Clara	2	2	2	2	2		
Monte de los Olivos				1			
Altos de la Lomita	2	2	2	2	2		
Quebranchitos Ojo de Agua	2	2	2	2	2		
José Trinidad Cabañas		1					
La Ciénega		2					
Aldea Villa Vieja	2	2	2	2	2	1	
Aldea San José	1		1		1		
Reynel Funez	2	2	2	2	2	2	2
La Finca	2	2	2	2	2		
Nueva Jerusalén No.2			1		2		
Aldea San José de Soroguara	2						
Brisas de Oriente	2	2	2	2	2	1	1
El Japón No.2	2	2	2	2	2		
Peña Colorada		1					
Villa Madrid			2				
Villa Oriente	2	2	2	2	2		
Aldea la Soledad	2	2	2	2	2		
Mary Flakes de Flores	2	2	2	2	2		
Monte Fresco	2	2	2	2	2	1	
Dora de Asfura	2	2	2	2	2		
La Fuente	2	1		1	1		
Buena Vista	2	1	1				
Nueva Capital	2	2	2	2	2	2	1
Aldea Las Pozas			2		2		
La Huerta		2	2		2		
El Buen Samaritano	2	2	2	2	2		
Villa Linda Miller				1			

Fuente: Elaboración propia

En vista de que cada camión tiene la capacidad i de transportar 77 barriles, según el plan definido, existe la posibilidad de entregar un total de 12,936 barriles en 168 viajes. Comparado al método de llamadas de emergencia con

el cual trabaja actualmente la UMAPS donde de entregaban solamente 6,237 barriles semanales.

### C. Índice de Escasez

Con el fin de determinar el índice de escasez de las colonias, se realizó un análisis oferta demanda para las juntas de agua, según lo viajes expuestos en el apartado anterior. La Tabla II, muestra la oferta y demanda en términos de barriles para cada comunidad.

Tabla III

OFERTA DEMANDA JUNTAS ADMINISTRADORAS DE AGUA

Junta Administradora de Agua	Oferta (barriles)	Demanda (barriles)
Mirador de oriente	539	1120
Lomas Universitarias	1078	1913
Enmanuel	154	1048
La Cañada	847	800
Manzanitos Mololoa	154	3480
Unidad y Fuerza	1232	3200
Aldea Santa Cruz	539	1400
Millenium Sur	693	680
Altos de la Laguna	77	1872
El Guanábano	770	1504
Ciudad Cataluña	154	1464
Altos de la soledad	847	1952
Ciudad Berlín	770	1400
Ciudad Guzmán	1078	900
Villa de San Miguel	77	64
Fortín Hernández	770	1913
Santa Clara	770	928
Monte de los Olivos	77	1640
Altos de la Lomita	847	1913
Quebranchitos Ojo de Agua	770	1180
José Trinidad Cabañas	77	588
La Ciénega	154	480
Aldea Villa Vieja	847	1913
Aldea San José	231	2000
Reynel Funez	1078	8800
La Finca	770	1913
Nueva Jerusalén No.2	231	244
Aldea San José de Soroguara	154	1036
Brisas de Oriente	1078	1300
El Japón No.2	770	1913
Peña Colorada	77	1913
Villa Madrid	77	704
Villa Oriente	770	1913
Aldea la Soledad	847	1196
Mary Flakes de Flores	770	6000
Monte Fresco	847	800
Dora de Asfura	770	1000
La Fuente	462	336
Buena Vista	308	328
Nueva Capital	1078	15200
Aldea Las Pozas	308	1913
La Huerta	462	440
El Buen Samaritano	770	1048
Villa Linda Miller	77	836

Fuente: Elaboración propia

Analizando la tabla mostrada anteriormente, no todas las demandas de las juntas administradoras de agua fueron cumplidas al 100%, debido a la disponibilidad de los camiones

cisterna y el tiempo de 4.5 horas que tiene conductor de cisterna para abastecer.

Como formulado anteriormente, el objetivo principal de la investigación es reducir el índice de escasez de agua de las localidades. Específicamente, este índice, indica cuánta agua se demanda o necesita en un sector en relación con el agua disponible para este mismo sector [12]. Finalmente, la fórmula para calcular el índice de escasez de agua se escribe de la siguiente manera:

$$I_e = \frac{D}{O_h} \times 100\%$$

Fuente Posada, 2005

Donde  $I_e$  es el índice de escasez en porcentaje,  $D$  es la demanda de agua en la unidad establecida por el investigador y  $O_h$  es la oferta hídrica neta establecida por el investigador [13]. Como establecido en la tabla 4, según el autor Ayala, se definen las características del índice de escasez de la siguiente forma.

TABLA IV  
CATEGORÍAS DE ÍNDICE DE ESCASEZ

Categoría	Descripción
Índice Alto	La demanda alcanza el 40% o más de la oferta hídrica total
Índice Medio	La demanda alcanza entre el 20% y 40% de la oferta hídrica total
Índice Moderado	La demanda alcanza entre el 10% y 20% de la oferta hídrica total
Índice Bajo	La demanda alcanza menos del 10% de la oferta hídrica total

Fuente: Elaboración propia

La unidad de medición definida fueron barriles y a continuación se presenta una tabla comparativa del índice escasez actualmente y con el uso del modelo propuesto. Según la tabla superior se puede concluir que con el método actual y con el método propuesto, siempre se tiene una categoría alta del índice por que supera el 40%

TABLA V  
ÍNDICE DE ESCASEZ JUNTAS ADMINISTRADORAS DE AGUA

Índice de escasez método actual	Índice de escasez con modelo propuesto
1185%	369%

Fuente: Elaboración propia

#### D. Validación del modelo

Como primera metodología de validación se utilizó la triangulación de expertos que es una estrategia de validación de investigaciones que implica la evaluación y comparación de los hallazgos por parte de múltiples expertos en el campo. Esta metodología se enfoca en aumentar la fiabilidad de los resultados y fortalecer la validez del estudio mediante una perspectiva más completa con múltiples enfoques [15]. Los principales aspectos considerados a evaluar se resumen en la siguiente tabla:

TABLA VI  
ASPECTOS A CONSIDERAR MEDIANTE TRIANGULACIÓN DE EXPERTOS

Aspectos	Elementos
Población y muestra a estudiar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Población de juntas de agua y conductores</li> <li>• Muestra de juntas de agua y conductores</li> </ul>
Instrumentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrevista para coordinadora de cisterna y 12 conductores de camiones cisterna</li> </ul>
Variables	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nomenclatura</li> </ul>
Modelo matemático	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Función objetivo, restricciones y variable de decisión</li> <li>• Entrada de datos en Excel</li> <li>• Desarrollo de OpenSolver</li> </ul>
Resultados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Como segunda metodología de validación, se realizó un análisis de sensibilidad. La idea general consiste en determinar rangos de variación de los parámetros del modelo matemático de forma de mantener una cierta base óptima, teniendo en cuenta que una solución básica es factible solo si todas las variables basales tienen un valor no negativo. Principalmente, se basa en establecer modificaciones de un parámetro como ser variables de decisión o restricciones, a la vez manteniendo los restantes fijos. [16] Dado el gran número de variables de decisión (2816), el análisis abordado en dos aspectos clave se resume en las siguientes tablas.

El primer análisis abordó las variables de decisión para determinar el intervalo de optimalidad. La Tabla 7 muestra coeficientes que indican que los viajes pueden aumentar infinitamente y disminuir hasta ciertos valores bajos. Esto respalda la interpretación de que maximizar la entrega de agua potable aumenta la función objetivo. La tabla resume el promedio del intervalo de optimalidad para las variables de decisión, validando que la optimización de la entrega de agua es eficiente para maximizar la función objetivo.

TABLA VII  
INTERVALO DE OPTIMALIDAD

Celdas	Nombre	Valor final	Valor objetivo	Promedio de aumento permitido	Promedio de disminución permitida
Variable de decisión	$x_{ijk}$	números entre 0 y 2	77	4.65199E+98	0.0000001

Fuente: Elaboración propia

El análisis de sensibilidad, resumido en la Tabla 8, se enfoca en tres restricciones con impacto directo en la variable de decisión. Para la restricción de cantidad de viajes, se permite un aumento infinito para maximizar la entrega de agua, mientras que la disminución es limitada, ya que reducir significativamente los viajes no es conveniente. En la segunda restricción, el aumento es infinito para satisfacer o superar la demanda, y la disminución se limita a un rango permisible de incumplimiento. En la tercera restricción, se permite un de minutos de trabajo para los camiones.

TABLA VIII  
INTERVALO DE FACTIBILIDAD

Celdas	Nombre	Valor final	Valor objetivo	Promedio de aumento permitido	Promedio de disminución permitida
Restricción 1: Cantidad de viajes	$x_{ijk} \leq 2$	números entre 0 y 2	2	9.5348E+99	1.89866871
Restricción 2: Demanda	$cap_i x_{ijk} \geq D_j$	números mayores a 77	77	8.1395E+99	1312.43252
Restricción 3: Horas laborales	$T_{ij} x_{ijk} \leq 4.5$	números menor o igual a 270 minutos	270	25.9701704 5	47.3078328

Fuente: Elaboración propia

#### IV. CONCLUSIONES

Para optimizar la distribución de agua y reducir el índice de escasez, se planteó una función objetivo que maximiza la cantidad de agua entregada a cada junta administradora. A través de entrevistas con actores clave, se definieron 7 variables globales con 2816 variables de decisión y 5 restricciones con 2924 restricciones individuales. La entrevista, en conjunto con el análisis de principios de programación lineal no solo solidificaron la base para el modelado usando programación lineal, sino que también capturaron las características específicas del sistema. Es crucial que cada elemento del modelo esté diseñado para identificar claramente la variable o restricción relevante.

Mediante la presente investigación se planteó un plan de abastecimiento de agua potable que maximizara la cantidad de agua entregada a las juntas administradoras de agua del Distrito Central de Honduras, por medio de camiones cisterna, beneficiando a aproximadamente 20,900 viviendas que están fuera de cobertura de la red de distribución de agua potable. Este enfoque redujo el índice de escasez del 1185% al 369% que representan 12,936 barriles entregados semanalmente, dentro del marco de 4.5 horas de trabajo diario. Un factor elemental en el modelo que provoca la reducción de la escasez es el aumento de la cantidad de agua entregada.

La validación del plan de abastecimiento de agua potable para las juntas de agua fue la fase final del estudio. La triangulación de expertos proporcionó confiabilidad al estudio por medio de perspectivas de 3 distintos expertos en investigación de operaciones, brindando valoraciones a través de personas externas al estudio. La convergencia de las opiniones de los expertos validó la solidez del plan propuesto. Finalmente, se realizó una prueba de optimalidad respaldada por un análisis de sensibilidad confirmando la variabilidad de las soluciones con respecto a las restricciones.

En conclusión, más allá de lograr los objetivos establecidos, se proporcionó una contribución en términos de evidenciar elementos importantes a considerar en el rubro de distribución de agua potable con camiones cisterna en localidades urbanas marginales para erradicar la escasez de agua. El plan desarrollado contribuyó como potencial guía

para futuras intervenciones y mejoras en la gestión del recurso hídrico a nivel local y regional, dándole seguimiento a los objetivos de desarrollo sostenible: agua limpia y saneamiento, salud y bienestar, ciudades y comunidades sostenibles.

#### V. RECOMENDACIONES

- i. Se recomienda a los futuros investigadores de la línea, obtener contacto de las distintas instituciones relacionadas a la distribución de agua potable y saneamiento. Entre algunas instituciones relevantes están: UMAPS, ERSAPS, CONASA, UGASAM y SANAA. Todas las instituciones mencionadas anteriormente, enriquecen la investigación realizada por medio de informes, bases de datos y documentos que poseen estas empresas.
- ii. Definir la función objetivo del modelo matemático sin desviarse del objetivo principal que es la reducción del índice de escasez en las colonias del Distrito Central. Sin embargo, se debe tener un profundo conocimiento del contexto actual de la situación para enmarcar todo el modelo con restricciones coherentes y lo más realistas posible con el fin de introducir datos útiles para recibir resultados valiosos y aplicables.
- iii. Involucrar a expertos en ambas vías del estudio, tanto en el área de conocimiento y línea investigativa como en el área de aplicación. Esto con el fin de crear modelos lo más realistas posibles involucrando de manera activa todas las partes posibles, incluyendo aquellas que no son expertas en la investigación pero que sí son las que desarrollarán el proyecto como ser la UMAPS.

#### VI. APLICABILIDAD

El estudio propuso un modelo matemático para minimizar la escasez de agua en el Distrito Central, específicamente para las juntas administradoras de agua que dependen de camiones cisterna. Aunque el plan fue formalmente aceptado por la Unidad Municipal de Agua Potable y Saneamiento (UMAPS), no se implementaron las medidas sugeridas. Se concluye que el problema de escasez de agua no se resuelve completamente, pero el modelo ofrece una contribución significativa para una gestión hídrica sustentable a mayor escala mediante una distribución inteligente.

La investigación puede aplicarse en otras regiones con características similares o distintas, considerando:

- i. El método de abastecimiento debe ser por medio de camiones cisterna.
- ii. De existir un número mayor o menor de juntas administradoras de agua, se debe ampliar o reducir la variable  $j$  (*destino al que se distribuye el agua*) hasta la cantidad de juntas administradoras presentes en la localidad.
- iii. De existir un número mayor o menor de camiones cisterna disponibles, se debe ampliar o reducir la variable

- $i$  (tipo de camión cisterna el cual se usa para distribuir) hasta la cantidad disponible de estos.
- iv. Los días de la semana en los cuales se ejecuta la distribución,  $k$ , pueden variar respetando fines de semana o estableciendo días específicos.
- v. La capacidad del camión  $i$ ,  $cap_i$ , puede variar de región en región.
- vi. La demanda del sector  $j$ ,  $D_j$ , puede variar según la localidad.
- vii. El tiempo de traslado del camión  $i$  al destino  $j$ ,  $T_{ij}$ , puede variar según las localidades.

## VII. TRABAJO FUTURO

Mientras el enfoque actual del estudio se concentra en la aplicación de la investigación de operaciones para maximizar la disponibilidad de agua y mitigar la escasez, se sugiere una evolución hacia un enfoque más integral que incluya la línea de diseño de experimentos en ingeniería industrial. Esta investigación permitiría una evaluación significativa de la calidad del agua que se entrega, empleando análisis fisicoquímicos y microbiológicos. Se podrían realizar pruebas para identificar Bacterias Coliformes Totales, Escherichia Coli, Bacterias Aerobias, medir el pH, y determinar los Sólidos Disueltos Totales, entre otros indicadores críticos de calidad.

Esta nueva perspectiva no solo enfatizaría la cantidad de agua distribuida sino también su calidad, asegurando que el agua suministrada a las comunidades cumpla con estándares de salubridad apropiados. Al integrar estas pruebas en la evaluación regular, las autoridades y organizaciones responsables podrían monitorear continuamente la calidad del agua, identificar problemas emergentes y tomar medidas correctivas de manera oportuna. Esta metodología está alineada con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, que promueve el acceso universal a servicios de agua limpia y saneamiento.

Implementar un enfoque que combine la maximización de la oferta de agua con el aseguramiento de su calidad puede transformar significativamente la gestión de recursos hídricos en áreas afectadas por la escasez. Esta integración contribuiría de manera sustancial a la salud y bienestar de las poblaciones vulnerables. De esta forma, se establecería un marco más robusto y multidimensional para la gestión del agua que potencie los esfuerzos hacia el desarrollo sostenible en Honduras.

- [1] IHCIT. (2012). ATLAS CLIMÁTICO Y DE GESTIÓN DE RIESGO DE HONDURAS. <https://ihcit.unah.edu.hn/dmsdocument/9984-atlas-climatico-y-de-gestion-de-riesgo-de-honduras-pdf>
- [2] Cassiolato, G., Carvalho, E. P., Caballero, J. A., & Ravagnani, M. A. S. S. (2021). Optimization of water distribution networks using a deterministic approach. *Engineering Optimization*, 53(1), 107-124. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2019.1702980>
- [3] Castillo-Vergara, M., Cortes, F. H., Merino, C. I. V., Gomez, R. A. D., & Arellano, C. E. (2024). Optimización de la distribución de agua potable rural mediante el uso de la programación lineal. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, IV. <https://www.redalyc.org/pdf/2150/215045726002.pdf>
- [4] Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). (2021). Estudio De Recolección De Datos Sobre El Abastecimiento De Agua En Tegucigalpa En La República De Honduras. [https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12367074\\_01.pdf](https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12367074_01.pdf)
- [5] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6a. ed. --). México D.F.: McGraw-Hill.
- [6] Díaz-Bravo, L. (s. f.). La entrevista, recurso flexible y dinámico. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-50572013000300009](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-50572013000300009)
- [7] Echeverría S., O. O., & Acosta Quevedo, J. C. (2017). Guía básica para el desarrollo e interpretación de. <https://dokumen.tips/documents/n-o-t-gua-bsica-para-el-desarrollo-e-interpretacin-de-.html>
- [8] Flores-Tapia, C. E., & Flores Cevallos, K. L. (2021). Método simplex de programación lineal aplicado a una empresa distribuidora de mobiliario. <http://biblioteca.utec.edu.sv:8080/jsui/handle/11298/1204>
- [9] Colina, Y. B. (s. f.). Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta.
- [10] Murillo, A., & Barahona, L. (2019). (AssistiveU) Herramienta para Estructuración Académica de las Asignaturas de la carrera de Licenciatura en Gastronomía – UNITEC. The 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities”. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.306>
- [11] Vargas, A., Reyes, V., Paz, I., Matamoros, R., Zepeda, S., & Osorto Ruiz, H. (2022). Perfil Sociodemográfico de Distrito Central, Francisco Morazán 2022. <https://oee.unah.edu.hn/assets/Perfiles-Sociodemograficos/Francisco-Morazan-08/Reporte-de-0801-Francisco-Morazan-Distrito-Central.pdf>
- [12] Calle, E. A. D., Rivera, H. G., Sarmiento, R. V., & Moreno, P. (2008). Relaciones Demanda-Oferta De Agua Y El Índice De Escasez De Agua Como Herramientas De Evaluación Del Recurso Hídrico Colombiano.
- [13] Posada, C. C. (2005). El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? *Revista de Ingeniería*, 22, Article 22. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i22.391>
- [14] Ayala Angulo, H., Pérez, E. A., Rojas, L. A., & Vargas, N. (2007). Validación de la metodología para el cálculo del índice de escasez de aguas subterráneas, propuesto por el Ideam en Bogotá. *Épsilon*, 1(9), 105-128.
- [15] Echeverría S., O. O., & Acosta Quevedo, J. C. (2017). Guía básica para el desarrollo e interpretación de. <https://dokumen.tips/documents/n-o-t-gua-bsica-para-el-desarrollo-e-interpretacin-de-.html>
- [16] Flores, H. (2018). Fundamentos de investigación de operaciones Investigación de operaciones I Análisis de sensibilidad. harvard. [https://www.academia.edu/37170692/Fundamentos\\_de\\_Investigaci%C3%B3n\\_de\\_Operaciones\\_Investigaci%C3%B3n\\_de\\_Operaciones\\_1\\_An%C3%A1lisis\\_de\\_Sensibilidad](https://www.academia.edu/37170692/Fundamentos_de_Investigaci%C3%B3n_de_Operaciones_Investigaci%C3%B3n_de_Operaciones_1_An%C3%A1lisis_de_Sensibilidad)