




Estrategias basadas en optimización para el uso de agua de lluvia

Optimization-based strategies for rainwater use

Ana Paula Biscay Lorenzo-Luaces^{1*}, Ronnie Torres Hugues², Fernando Raul Rodriguez Flores³

Resumen En este trabajo se proponen 4 estrategias para el ahorro de agua potable en un edificio de viviendas. Para ello, se cuenta con un conjunto de actividades que se conoce que se pueden realizar con agua de lluvia, y el objetivo es determinar cuáles de ellas realizar. De cada actividad se conoce la cantidad de agua que requiere. Las dos primeras estrategias son heurísticas que consisten en ordenar las actividades de acuerdo a la cantidad de agua que requiere en cada mes. En la primera se ordenan de mayor a menor demanda y en la segunda, de menor a mayor. En ambos casos se realizan tantas actividades como sean posibles empezando por la primera, y siguiendo con el orden establecido. En ambas heurísticas, el agua de lluvia que no se usa en un mes, se puede usar en el siguiente. La tercera estrategia es una secuencia de modelos de optimización con variables binarias que maximiza el uso de agua de lluvia para un mes específico, y el agua de lluvia que no se use en un mes, se puede usar en el siguiente. La cuarta es un modelo de optimización para una planificación anual. Este último modelo es un problema de optimización lineal con 60 variables binarias, que se resuelve en 0.1138 segundos, lo que permite obtener varias soluciones óptimas para el problema (todas con el mismo valor de la función objetivo). Con este modelo de optimización anual se consigue utilizar el 100% del agua de lluvia acumulada.

Palabras Clave: ahorro de agua potable, optimización lineal con variables binarias, uso de agua de lluvia.

Abstract *In this work, we propose four strategies for saving potable water in a residential building. To do that, we have a set of activities that can be performed using rainwater, and our goal is to determine which activities to perform with rainwater. We know, for each month, the amount of water each activity requires. The first two strategies are heuristic approaches that prioritize activities based on their monthly water demand. The first strategy ranks activities from highest to lowest demand, while the second uses the inverse ranking (lowest to highest). In both cases, we sequentially select as many activities as possible following the established order. Both heuristics allow carrying over unused rainwater to subsequent months. The third strategy involves the solution of a sequence of binary optimization models that maximize rainwater usage for specific months, with unused rainwater being transferred to the following month. The fourth strategy is an annual optimization model. This final model is a linear optimization problem with 60 binary variables, that can be solved in 0.1138 seconds. This time enables finding multiple optimal solutions (all with the same objective function value). The annual optimization model achieves 100% utilization of the accumulated rainwater.*

Keywords: *potable water savings, linear optimization problem with binary variables, domestic use of rainwater.*

Mathematics Subject Classification: 90C10, 90C90, 90B50, 86A05, 90C59.

¹Facultad de Matemática y Computación, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba. Email: anapaulabiscay@gmail.com.

²Compañía Contratista de Obras para la Aviación, CCOA. Email: torresymas79@gmail.com.

³Departamento Matemática Aplicada, Facultad de Matemática y Computación, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba. Email: fernan@matcom.uh.cu.

*Autor para Correspondencia (*Corresponding Author*)

Editado por (*Edited by*): Damian Valdés Santiago, Facultad de Matemática y Computación, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba.

Citar como: Biscay Lorenzo-Luaces, A.P., Torres Hugues, R., & Rodriguez Flores F.R. (2025). Estrategias basadas en optimización para el uso de agua de lluvia. *Ciencias Matemáticas*, 39(1), 31–38. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17456315>. Recuperado a partir de <https://revistas.uh.cu/rcm/rcm/article/view/11107>.

Introducción

En la historia de la humanidad el agua ha sido un recurso fundamental para el establecimiento y desarrollo de las principales civilizaciones: Mesopotamia se asentó entre los ríos Tigris y Eufrates, Egipto a la sombra del río Nilo, India en los valles del Indo y del Ganges y China a orillas del río Amarillo y del Yangtsé [3], por solo citar algunos ejemplos.

En la actualidad, la presión demográfica, el ritmo de desarrollo económico, la urbanización, la contaminación y la pérdida indiscriminada del agua debida a una mala gestión están ejerciendo una presión sin precedentes sobre la principal fuente de vida del planeta [1]. Esta situación conlleva a retomar y mejorar soluciones ancestrales dentro de la gestión integral del agua para un desarrollo próspero y sostenible.

Desde hace siglos se ha realizado lo que se conoce como cosecha del agua o crianza de agua y abarca la captación del agua de lluvia y de la niebla, condensar el vapor, almacenar el agua superficialmente y, en el suelo, captar el agua subterránea y recoger agua de los ríos, entre otras [17].

En el proceso de captación de agua, determinar el volumen del depósito para contener este recurso es un paso importante y está resuelto [16]. Sin embargo, también deben establecerse estrategias para maximizar el uso de la misma mediante planes de explotación que estén en función de las demandas características de cada usuario. En la Figura 1 se muestra qué consumos domésticos pueden ser cubiertos con agua de lluvia.

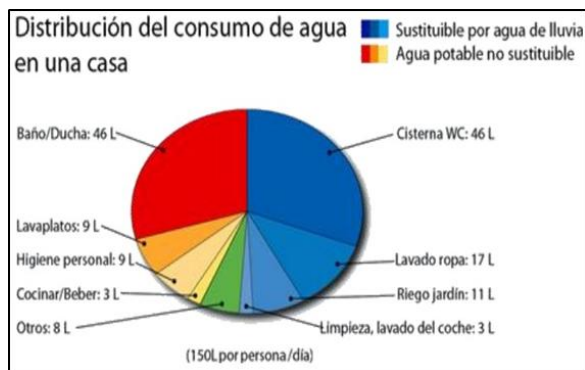


Figura 1. Consumo doméstico de agua sustituible por agua de lluvia [*Household Water consumption substitutable by rainwater*].

Tomando en cuenta que el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos hace un llamado para implementar estrategias que tributen a un uso más eficiente y productivo del agua [8], el objetivo de este trabajo es determinar para cada mes cuál es la forma óptima de usar el agua de lluvia almacenada, conociendo las posibles actividades que se pueden realizar con agua de lluvia, la cantidad de agua que demanda cada una de ellas, y la cantidad de agua acumulada cada mes para un edificio de viviendas.

Para resolver este problema se proponen cuatro estrategias. Las dos primeras son heurísticas basadas en ordenar las actividades de acuerdo a sus demandas de agua y cada mes satisfacer tantas como sean posibles. La diferencia entre estas

dos estrategias es que en la primera se ordenan de mayor demanda a menor demanda y en la segunda, de menor a mayor. En ambos casos, el agua que no se consume en un mes, se puede usar el mes siguiente.

La tercera estrategia consiste en un modelo de optimización lineal con variables binarias en el que se maximiza el agua de lluvia utilizada en un mes en todas las actividades. Al igual que en las dos estrategias anteriores, el agua que no se use en un mes, se puede usar el mes siguiente.

La cuarta estrategia consiste en otro modelo de optimización con variables binarias en el que se planifica el consumo del agua a lo largo de todo el año.

Los modelos de optimización se resuelven usando PULP [9], una biblioteca en Python para la modelación y solución de problemas de programación lineal.

Las soluciones que brinda el modelo de optimización anual permite usar el 100 % del agua de lluvia acumulada, dos que las soluciones heurísticas, garantizan más del 99 % y la segunda estrategia solo garantiza un 95 %.

Tomando en cuenta que los tiempos de solución del modelo anual son inferiores a 0,1 segundos, se decidió correr el modelo varias veces para buscar varias soluciones óptimas, en las que se use el 100 % del agua acumulada.

Este trabajo tributa al llamado del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos para un uso más eficiente y productivo del agua [8], porque en las situaciones en que la disponibilidad de agua no cubre toda la demanda requerida, como ocurre muchas veces en Cuba, resulta conveniente tener una herramienta que permita decidir cuál es la mejor manera de usarla.

Este documento está estructurado de la siguiente forma: en la sección 1 se presentan los preliminares del trabajo: el estado de la captación de agua en Cuba y PULP, que es la biblioteca de Python utilizada para resolver los modelos de optimización. En la sección 2 se presentan las estrategias propuestas en este trabajo para hacer un uso óptimo del agua de lluvia acumulada. Seguidamente, en 3, se muestran los resultados obtenidos con cada estrategia y para finalizar se presentan las conclusiones y recomendaciones, así como la bibliografía consultada.

Relevancia del estudio

Son escasos los trabajos científicos relacionado con la captación de agua de lluvia dedicados a determinar eficientemente como aprovechar este recurso cuando la disponibilidad sea menor que la demanda. En este trabajo se proponen cuatro criterios para tomar esta decisión, que incluyen modelos de optimización, y se analiza cuáles parecen ser los más recomendables.

1. Preliminares

En esta sección se presentan resultados relacionados con la captación de agua de lluvia en Cuba, así como los elementos básicos de los problemas de optimización lineal con variables binarias y los algoritmos genéticos. Estos últimos se proponen

en este trabajo como estrategias para determinar la mejor forma de utilizar el agua de lluvia captada.

1.1 Sobre el uso de agua de lluvia y su recolección en Cuba

En la actualidad, las mediciones realizadas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y el Instituto de Meteorología (INSMET) a través de sus estaciones hidrometeorológicas, registran una disminución de las precipitaciones en La Habana [8]. Estas precipitaciones son la fuente fundamental para la obtención del recurso [8]. Tal es el caso que, en el plan del estado cubano para el enfrentamiento del cambio climático, lo que se conoce como Tarea Vida, se plantea que el clima futuro está caracterizado por menos precipitaciones, mayores temperaturas y ocurrencia de sequías [8].

Respecto a la disponibilidad potencial del agua, se prevé una reducción del 37 % para el 2100 [8]. Esto, acompañado de la creciente demanda de agua para una gran cantidad de habitantes, como es el caso de La Habana [5], trae como consecuencia que esta provincia se encuentre con un índice de estrés hídrico muy elevado. El estrés hídrico es una condición que se produce cuando la demanda de agua supera la cantidad disponible durante un período determinado o cuando su calidad impide su uso específico. En otras palabras, es el desequilibrio entre la disponibilidad de agua y la demanda de la misma, tanto en términos de cantidad como de calidad.

Ante este escenario, el INRH hace un llamado para implementar estrategias y lograr un uso más eficiente y productivo del agua, con el fin de revertir la situación de estrés a partir de lograr un uso más eficiente y productivo [8]. Estas acciones deberían encaminarse al aumento de disponibilidades relativas de la misma, comenzando por incrementar la cantidad y calidad de agua a partir de otras formas no convencionales como la captación directa de agua de lluvia, entre otras [8].

En respuesta a este llamado, varias instituciones han desarrollado investigaciones sobre este tema. En el INRH, el Ing. Driggs el cual, estableció en 2009, en su tesis maestría, una Metodología para la captación de agua de lluvia [2]. También se han realizado trabajos de diploma relacionados con este tema [2, 5, 6].

En el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), en la figura del Dr.C. Ing. Ronnie Torres Hugues se han realizado desde 2018 dos trabajos de diplomas y se han publicado cuatro artículos que abordan esta problemática desde distintos puntos de vista: en un caso de estudio de un edificio alto en una zona crítica [14], en un estudio histórico lógico sobre el avance y la evolución de esta técnicas en una propuesta de indicadores para el diseño de viviendas y otras edificaciones [15] y en un estudio comparativo sobre los métodos para la determinación del volumen de la cisterna [16].

Desde 2018, en el Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAGRIC), en la figura de M.Sc. Martha Paula Ricardo Calzadilla, se han realizado un trabajo de diploma [6] y varios artículos dirigidos a la aplicación de la recogida de lluvia en la agricultura [13, 12].

Por todo lo anterior, en el campo de la captación de lluvia, se conoce cómo determinar las dimensiones de la tubería de conducción de las aguas pluviales [14] y existen expresiones matemáticas para determinar el volumen de la cisterna [16]. Sin embargo, los usuarios, tanto empresas como hogares, no cuentan con una herramienta que les permita decidir cómo se aprovecharía mejor el agua captada.

El objetivo de este trabajo es proponer estrategias que permitan responder a la pregunta de cuál es la mejor forma de aprovechar el agua captada. Para ello se proponen 2 estrategias heurísticas, dos modelos de optimización lineal con variables binarias y se propone un algoritmo genético para resolver uno de estos modelos, dado el tiempo que puede demorarse su solución. A continuación se presentan los elementos fundamentales de los modelos de optimización con variables binarias y de los algoritmos genéticos.

1.2 Solución de problemas de optimización lineal con PuLP

En este trabajo se proponen cuatro estrategias para decidir en qué tareas es preferible utilizar el agua de lluvia, de forma que se desperdicie la menor cantidad posible de agua potable. De las cuatro estrategias planteadas, dos incluyen la solución de problemas de programación lineal con variables binarias que se resuelven usando la biblioteca PuLP de Python.

PuLP [9] es una biblioteca de programación matemática escrita en Python, que permite la formulación y solución de problemas de optimización lineal, incluyendo variables enteras. Permite a los usuarios modelar problemas matemáticos mediante la definición de variables, funciones objetivo y restricciones, facilitando así la traducción de problemas reales en modelos computacionales que pueden ser resueltos por diversos algoritmos de optimización. El algoritmo usado *por defecto* es COIN-OR Branch and Cut (CBC) [4].

CBC es una biblioteca para la programación entera mixta que combina métodos de ramificación y acotación con planos de corte para garantizar soluciones óptimas [4].

El hecho que de PuLP esté concebido para modelar y resolver problemas de optimización como parte de código Python, permite resolver una sucesión de problemas de optimización donde los datos de cada problema depende de la solución de los anteriores. Esto se usa en tercera estrategia para incorporar al agua de lluvia disponible de cada mes, la que no se usó en el mes anterior.

PuLP también permite agregar restricciones al problema de forma dinámica. Esto permite, en la cuarta estrategia propuesta, que se puedan obtener varias soluciones óptimas para el problema anual.

A continuación se presentan las estrategias propuestas para un uso eficiente del agua de lluvia recogida.

2. Estrategias propuestas para el uso eficiente de agua de lluvia

En este trabajo se proponen cuatro estrategias para realizar la distribución del agua de lluvia almacenada entre las posibles

actividades de forma que se maximice la cantidad de agua de lluvia disponible utilizada. Las dos primeras consisten en organizar las actividades de acuerdo a la cantidad de agua que consumen y priorizar las actividades de mayor demanda (estrategia 1) o priorizar las de menor demanda (estrategia 2). En ambos casos, el agua de lluvia que no se consuma en un mes se puede utilizar en el mes siguiente.

Las otras dos estrategias son modelos de programación lineal con variables binarias: uno para planificar el uso del agua en un mes, y otro para planificar el uso el agua a lo largo de todo el año. En el caso del modelo mensual, el agua que no se consuma en la solución óptima de un mes se considera disponible para el siguiente.

A continuación se presentan los dos modelos de optimización.

2.1 Modelo para la planificación mensual

Para construir el modelo de optimización lineal binaria para determinar en qué actividades usar el agua de lluvia acumulada durante un mes se consideran los siguientes parámetros y variables.

Parámetros:

- I : conjunto de actividades.
- D_i : demanda de la actividad $i \in I$.
- A : cantidad de agua disponible en el mes.

Variables:

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{si la actividad } i \text{ se realiza con agua de lluvia,} \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Se desea maximizar la cantidad de lluvia utilizada, sujeto a la restricción de que solo se use el agua almacenada, por lo que se obtiene el siguiente problema de optimización:

$$\begin{aligned} \text{máx}_x \quad & \sum_{i \in I} D_i X_i \\ \text{s.a.} \quad & \sum_{i \in I} D_i X_i \leq A. \end{aligned}$$

La restricción garantiza que la cantidad de agua que se use sea menor que la almacenada, y la función objetivo maximiza esta cantidad. La idea es utilizar este modelo para decidir en qué actividades utilizar el agua almacenada en cada mes. Para garantizar que el agua que no se use en un mes se use en el siguiente, se modifican los datos del mes siguiente con esa información.

En la siguiente sección se propone un modelo para la planificación anual del uso de agua de lluvia. En ese caso sí es posible decidir no usar el agua de lluvia en un mes para poderla usar en otro mes en el futuro.

2.2 Modelo para la planificación anual

En este modelo se determina el uso del agua a durante un conjunto de meses. El agua almacenada que no se use en un mes queda almacenada para el mes siguiente. Para construir el modelo se usan los siguientes parámetros y variables.

Parámetros:

- I : conjunto de tareas que se pueden realizar con agua de lluvia.
- $J = \{1, 2, \dots, 12\}$: conjunto de meses.
- A_j : cantidad de agua recogida en el mes $j \in J$.
- D_{ij} : demanda de la actividad i en el mes j , $i \in I$, $j \in J$.

En el modelo se usan las siguientes variables:

- $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si en el mes } j \text{ se realiza la actividad } i \\ & \text{con agua de lluvia,} \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases}$
- G_j : cantidad de agua gastada en el mes $j \in J$.
- C_j : cantidad de agua disponible en la cisterna en el mes $j \in J$.

Los valores de G_j se pueden calcular como:

$$G_j = \sum_{i \in I} X_{ij} D_{ij}, \quad \forall j \in J. \quad (1)$$

Por su parte, los valores de C_j se pueden calcular de la siguiente forma:

$$C_1 = A_1, \quad (2)$$

$$C_j = C_{j-1} - G_{j-1} + A_j, \quad j = 2, \dots, 12. \quad (3)$$

La ecuación (3) indica que la cantidad de agua disponible en la cisterna en el mes j es la que existía el mes anterior (C_{j-1}), más la que se recogió en el mes j (A_j), menos la que se gastó el mes anterior (G_{j-1}).

En este modelo, es necesario que la cantidad de agua que se consume cada mes sea menor que disponible en la cisterna ese mes, que se puede escribir matemáticamente como:

$$G_j \leq C_j, \quad j \in J. \quad (4)$$

Por último, se desea maximizar la cantidad de agua de lluvia utilizada en todos los meses:

$$\text{máx} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ij} * X_{ij}. \quad (5)$$

El modelo completo quedaría de la siguiente forma:

$$\text{mín} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ij} * X_{ij}$$

s.a:

$$G_j = \sum_{i \in I} X_{ij} D_{ij}, \quad \forall j \in J$$

$$C_1 = A_1,$$

$$C_j = C_{j-1} - G_{j-1} + A_j, \quad j = 2, \dots, 12$$

$$G_j \leq C_j, \quad j \in J.$$

2.3 Encontrar más de una solución óptima

Resolver el modelo anual con PuLP, se obtiene una solución en aproximadamente 0,1 segundos. Por ese motivo se decidió correrlo varias veces para encontrar, si existen, varias soluciones óptimas. en esta sección se describen las restricciones que se le agregan al modelo para encontrar otras soluciones. La idea es agregar una restricción que impida que las soluciones óptimas encontradas sean factible.

Para ello se definen los siguientes conjuntos y parámetros.

Dada una solución óptima X_{ij}^* , se define el conjunto

$$X_{ind}^* = \{(i, j); x_{ij} = 1\},$$

formado por los pares (i, j) tales que la solución óptima X^* se decidió usar el agua de lluvia para realizar la actividad i en el mes j . O sea, el conjunto X^* contiene los índices (i, j) tales que $x_{ij} = 1$.

A partir del conjunto X_{ind}^* se define el parámetro

$$N^* = |X_{ind}^*|,$$

que es la cantidad de variables x_{ij} en la solución X^* que toman el valor 1.

Para descartar que la solución X^* sea factible, se agrega una restricción de la forma:

$$\sum_{(i,j) \in X_{ind}^*} x_{ij} \leq N^* - 1,$$

que garantiza que no todas las variables x_{ij} pueden tomar el valor 1 simultáneamente.

De esta forma, cada vez que se encuentre una nueva solución óptima, se puede agregar una restricción de este tipo, y eso permitiría encontrar otras soluciones óptimas para el problema, si existieran.

Para comparar los resultados obtenidos con cada propuesta se implementó un programa en Python [11] para las dos primeras estrategias (priorizar las actividades de mayor y menor demanda, respectivamente), y para resolver los dos modelos de optimización se usó PuLP. En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos en cada caso.

3. Resultados experimentales

Para comparar las cuatro propuestas realizadas se utilizaron cinco posibles actividades en una vivienda: descarga de inodoros (1), riego de jardín (2), lavado de ropa (3), limpieza del hogar (4) y otros usos (5).

Para las demandas de cada actividad se asumió el valor promedio correspondiente a una vivienda de 5 personas, cantidad que se obtiene a partir del Censo de Población y Viviendas efectuado en el 2012 por la Oficina Nacional de Estadísticas de Cuba (ONEI) en el 2012 [7]. Para el agua abastecida cada mes se consideró el promedio de precipitación de cada mes desde 2009 hasta 2020, periodo del que se pudo sustraer la información de los anuarios estadísticos de la ONEI [10]. Se asume que se dispone de un área de captación de 100 m^2 .

Mes	1	2	3	4	5	Total	Disp
Enero	6975	2480	2635	620	310	13020	10000
Febrero	6300	2240	2380	560	280	11760	12050
Marzo	6975	2480	2635	620	310	13020	10520
Abril	6750	2400	2550	600	300	12600	10480
Mayo	6975	2480	2635	620	310	13020	10550
Junio	6750	2400	2550	600	300	12600	9500
Julio	6975	2480	2635	620	310	13020	11300
Agosto	6975	2480	2635	620	310	13020	9400
Septiembre	6750	2400	2550	600	300	12600	8900
Octubre	6975	2480	2635	620	310	13020	11600
Noviembre	6750	2400	2550	600	300	12600	10100
Diciembre	6975	2480	2635	620	310	13020	1070

Tabla 1. Demanda de agua por cada actividad en cada mes y disponibilidad mensual [*Monthly water demand for each activity and available supply*].

Estrategia	Desperdicio	Demanda satisfecha
Estrategia 1	115	81,52 %
Estrategia 2	6225	77,54 %
Mensual	220	81,46 %
Anual	0	81,60 %

Tabla 2. Agua de lluvia no usada en el año (Desperdicio) y porcentaje de la demanda satisfecha (Demanda satisfecha) con cada estrategia [*Unused rainwater in the year and percent of the demand satisfied with each strategy*].

La Tabla 1 muestra las demandas de cada actividad por mes. Las columnas nombradas de 1 a 5 corresponden con las 5 actividades que se consideran en el trabajo. La columna Total indica la demanda total del mes, y la última columna (representada por Disp), se muestra la disponibilidad de agua de lluvia para ese mes.

Los programas se ejecutaron en una computadora personal con un procesador Intel(R) Core(TM) i7-4700MQ CPU a 2.40GHz, con 4 núcleos y 8GB de memoria RAM.

Los primeros resultados se muestran en la Tabla 2, que indica, para cada estrategia, cuánta agua de lluvia se dejó de usar en el año y la demanda satisfecha. Mientras menor sean los números de la segunda columna, mejor es el resultado. De manera similar, mientras más alto sea la demanda satisfecha, mejor es el resultado. En esta tabla se puede apreciar, como era de esperar, que el modelo de optimización anual obtiene el mejor resultado posible, donde se usa toda el agua de lluvia disponible. También se nota que la estrategia 2 es la peor de todas.

De estos resultados llama la atención que la estrategia 1 obtiene mejores resultados que el modelo de optimización mensual. Esto sugiere que si se desea utilizar la mayor cantidad posible de agua a lo largo de todo el año, puede ser una mala idea tener un comportamiento “goloso” en cada mes.

Esta idea se confirma en la Tabla 3 donde se muestra una solución obtenida con el modelo anual. La segunda columna muestra el agua de lluvia usada en cada mes, que coincide con la demanda satisfecha. La tercera columna muestra la demanda del mes; la cuarta, qué porcentaje de la demanda se

Mes	Usada	Demanda	Porcentaje	Desp
Enero	7905	13020	60,7 %	2095
Febrero	9240	11760	78,6 %	4905
Marzo	7905	13020	60,7 %	7520
Abril	12300	12600	97,6 %	5700
Mayo	13020	13020	100,0 %	3230
Junio	3300	12600	26,2 %	9430
Julio	13020	13020	100,0 %	7710
Agosto	13020	13020	100,0 %	4090
Septiembre	9150	12600	72,6 %	3840
Octubre	13020	13020	100,0 %	2420
Noviembre	10200	12600	81,0 %	2320
Diciembre	13020	13020	100,0 %	0

Tabla 3. Solución obtenida por el modelo de optimización anual [*Solution found using the anual optimization model*].

Mes	Usada	Demanda	Porcentaje	Desp
Enero	9920	13020	76,2 %	80
Febrero	11760	11760	100,0 %	370
Marzo	10540	13020	81,0 %	350
Abril	10200	12600	81,0 %	630
Mayo	10540	13020	81,0 %	640
Junio	10050	12600	79,8 %	90
Julio	10540	13020	81,0 %	850
Agosto	10230	13020	78,6 %	20
Septiembre	7650	12600	60,7 %	1270
Octubre	12710	13020	97,6 %	160
Noviembre	10200	12600	81,0 %	60
Diciembre	10540	13020	81,0 %	220

Tabla 4. Solución obtenida por la estrategia basada en el modelo de optimización mensual [*Solution found using strategy based on the monthly optimization model*].

logró satisfacer, y la quinta columna muestra el agua de lluvia que se decidió no usar en cada mes.

Las filas correspondientes a marzo y junio están resaltadas porque en esos meses era posible satisfacer la demanda si se hubiese usado toda el agua disponible. Sin embargo, el algoritmo decidió no hacerlo, con el objetivo de poder usar toda el agua de lluvia al final del año.

En contraposición, se puede observar en la Tabla 4, que la estrategia basada en el modelo mensual satisface más del 60 % de la demanda en todos los meses.

Esto parece confirmar la idea de que resulta poco conveniente tratar de satisfacer las demandas de cada mes sin tomar en cuenta los demás meses, fenómeno que también se puede apreciar en la Tabla 7 del anexo, que muestra la solución obtenida por la segunda estrategia. Esta estrategia, que fue la que más desperdicio de agua de lluvia tuvo al final del año, es la que más meses satisface el 100 % de la demanda del uso de agua, con 7 meses. En la solución mostrada del modelo anual (Tabla 3) solo se logra satisfacer el 100 % de la demanda en 5 meses.

Tomando en cuenta que el tiempo que tomó encontrar

Mes	Inodoro	Jardín	Lavar	Limpieza	Otros
Enero	1,2,3,4	2,3, 5	4,5	1	1, 4
Febrero	1, 3,4,5	2,3,4,5	1, 3,4,5	1,2, 4	3,4,5
Marzo	1,2	2, 5	3, 5	1, 5	1
Abril	1,2,3,4,5	1, 3,4	1,2,3,4,5	1, 3,4,5	3,4,5
Mayo	1,2,3,4,5	1, 4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5
Junio	2,3,4,5	1, 3,4,5	2,3, 5	1, 3,4	1,2,3,4,5
Julio	1,2,3,4,5	1,2,3, 5	1,2, 4,5	1,2,3,4,5	1,2, 4,5
Agosto	1,2,3,4,5	1,2, 4,5	1,2, 4,5	1, 3,4,5	1, 3,4,5
Septiembre	1,2,3	1, 3,4	2, 4,5	2, 4,5	2,3
Octubre	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5
Noviembre	1,2,3,4,5	2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5
Diciembre	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5

Tabla 5. Múltiples soluciones obtenidas con el modelo de optimización anual [*Multiple solutions found using the anual optimization model*].

una solución del modelo de optimización anual fue de aproximadamente 0,11 segundos, se decidió correrlo varias veces para determinar si existen otras soluciones óptimas. Para ello, cada vez que se encuentra una solución óptima, se le agrega al programa una restricción que impida que las soluciones encontradas anteriormente sean factibles, como se indicó en la sección 2.2.

En la Tabla 5 se muestran los resultados de hacer este proceso 5 veces. Cada columna representa una de las posibles actividades que se pueden realizar con agua de lluvia, cada fila es un mes, y un número i en una casilla de la tabla, indica que en la solución i se decidió realizar esa actividad en ese mes. Las 5 soluciones mostradas usan toda el agua disponible. El tiempo de ejecución fue inferior a los 1,33 segundos.

En la Tabla 5 se puede apreciar que todas las soluciones óptimas reportadas realizan todas las actividades del último mes con agua de lluvia. Esto tiene sentido, porque en caso de no ocurrir así quedaría agua de lluvia sin utilizar y el valor de la función objetivo sería menor que el obtenido en estas soluciones.

Por todo lo anterior, y tomando en cuenta el tiempo que toma la solución del modelo de optimización anual, y que encuentra varias soluciones óptimas en muy poco tiempo, se recomienda usarlo en situaciones similares a esta: que sea para una vivienda y que se puede modelar con menos de 100 variables binarias.

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se presentaron cuatro estrategias para determinar la forma óptima de utilizar el agua de lluvia recogida para una vivienda.

La estrategia que mejor resultados obtuvo y con la que se logró utilizar toda el agua acumulada fue el modelo de optimización anual, con la que fue posible obtener varias soluciones. El segundo mejor resultado se obtuvo con la primera estrategia heurística, que arrojó mejores resultados que la estrategia basada en el modelo de optimización mensual. Esto parece sugerir que si se desea usar la mayor cantidad de agua de lluvia posible, no se debería tratar de satisfacer toda la

demanda en los primeros meses. De hecho, las soluciones del modelo de optimización anual, usan poca agua de lluvia en varios meses del año, para garantizar poderla usar toda en los últimos.

Una extensión natural del trabajo pudiera ser considerar que el agua potable tiene un costo que puede variar de un mes a otro. Esto pudiera modelar situaciones en las que el agua potable hay que abastecerla con camiones cisternas, y que en algunos meses puede ser más costosos que en otros.

Otra extensión sería considerar que el agua recogida en cada mes es una variable aleatoria y enfocar el problema como un modelo de optimización estocástica.

Se recomienda generalizar los resultados obtenidos usando los modelos en otros escenarios: doméstico o industrial, así como variando la disponibilidad de agua de lluvia.

Suplementos

Los códigos de los programas se pueden obtener a través de la autora para la correspondencia.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a David Guaty Domínguez, por sus contribuciones e ideas, y a la Dra.C. Sira María Allende Alonso, por sus aportes sobre el uso de los *solvers*. También agradecen a los revisores anónimos por sus sugerencias, que permitieron realizar mejoras notables para el trabajo.

Conflictos de interés

Se declara que no existen conflictos de interés.

Contribución de autoría

Conceptualización R.T.H, F.R.R.F, A.P.B.L.

Curación de datos R.T.H, A.P.B.L.

Análisis formal R.T.H, A.P.B.L, F.R.R.F.

Investigación A.P.B.L, R.T.H, F.R.R.F.

Metodología R.T.H, F.R.R.F, A.P.B.L.

Software A.P.B.L., F.R.R.F.

Supervisión F.R.R.F.

Validación R.T.H, F.R.R.F.

Visualización A.P.B.L, R.T.H., F.R.R.F.

Redacción: preparación del borrador original A.P.B.L., R.T.H.

Redacción: revisión y edición F.R.R.F, A.P.B.L, R.T.H.

Referencias

- [1] A.K., Biswas and Tortajada C.: *Water crisis and water wars: myths and realities*. International Journal of Water Resources Development, 35(5):727–731, 2019. <https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1636502>.
- [2] Driggs, R.: *Metodología para la captación de agua de lluvia*. Tesis de Maestría, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana, 2009.
- [3] Evans, Ch.: *Enciclopedia de la Historia. Tomo I El mundo antiguo 40 000-500 AC. Tomo I*. Editorial EVEREST, España, 1992, ISBN 84-241-2155-4.
- [4] Forrest, J. and R. Lougee-Heimer: *CBC coin-or branch and cut solver*, 2005. <https://github.com/coin-or/Cbc>.
- [5] Fresquet, A.: *Sistema de captación de agua de lluvia para abastecer un edificio alto ubicado en 25 y J, Vedado*. Tesis de Doctorado, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, 2018. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382019000200125.
- [6] Gómez, A.: *Propuesta de un sistema de captación de agua de lluvia en la finca Tierra Brava CCS Niceto Pérez*, 2019. Trabajo de Diploma, Universidad Politécnica de La Habana “José Antonio Echevarría”.
- [7] Información (ONEI), Oficina Nacional de Estadística e: *Informe Nacional: Censo de Población y Viviendas 2012*. ONEI, La Habana, 2014. <http://www.onei.gob.cu>.
- [8] INRH: *Plan Hidráulico Nacional 2015-2020*, 2014. <https://www.hidro.gob.cu>.
- [9] Mitchell, S., M. O’Sullivan, and I. Dunning: *PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python*, 2011. <https://github.com/coin-or/pulp>, Version 2.7.0.
- [10] Oficina Nacional de Estadística e Información: *Sitio Oficial de la Oficina Nacional de Estadística e Información de Cuba*, 2025. <http://www.onei.gob.cu>.
- [11] Python Core Team: *Python: A dynamic, open source programming language*. Python Software Foundation, 2024. <https://www.python.org>.
- [12] Ricardo, M.P., A. Gómez, R. Martín, V. Cutie y O. Martínez: *Estudio de las precipitaciones para el diseño de sistema de captación de agua de lluvia*. Revista Ingeniería Agrícola, 10(2):e05, 2020. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586263256005>.
- [13] Ricardo, M.P., M. Méndez, C. Bonet, L.O. Sierra y V. Cutie: *Evaluación de la eficiencia de la captación de agua de lluvia en casas de cultivos*. Revista Ingeniería Agrícola, 5(4):3–9, 2015, ISSN 2306-1545. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586261427001>.
- [14] Torres, R. y A. Fresquet: *Captación de lluvia para descarga de inodoros en edificio alto en el Vedado, La Habana*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 1:122–135,

2019. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:226177637>.

- [15] Torres, R. y A. Fresquet: *Caracterización de la captación de las aguas de lluvia para tipologías de viviendas*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 41:100–114, 2020. <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v42n2/1680-0338-riha-42-02-14.pdf>.
- [16] Torres, R. y A. Fresquet: *Dimensionamiento de depósitos para captación de agua de lluvia en viviendas*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 42:14–28, 2021. https://www.researchgate.net/publication/309560371_Practicas_ancestrales_de_crianza_de_agua_una_guia_de_campo_estrategia_para_adaptarnos_a_la_escasez_de_agua.
- [17] Yapa, K.: *Prácticas ancestrales de crianza de agua*. Edipcentro Cía. de Ecuador, 2013. https://www.biodiversidadla.org/Documentos/Practicas_ancestrales_de_crianza_de_agua_como_una_estrategia_para_adaptarnos_al_cambio_climatico.

Mes	Usada	Demanda	Porcentaje	Desp
Enero	6045	13020	46,43	3955
Febrero	11760	11760	100,00	4245
Marzo	13020	13020	100,00	1745
Abril	5850	12600	46,43	6375
Mayo	13020	13020	100,00	3905
Junio	12600	12600	100,00	805
Julio	6045	13020	46,43	6060
Agosto	13020	13020	100,00	2440
Septiembre	5850	12600	46,43	5490
Octubre	13020	13020	100,00	4070
Noviembre	12600	12600	100,00	1570
Diciembre	6045	13020	46,43	6225

Tabla 7. Solución obtenida usando la segunda estrategia [Solution found using the second strategy].



Anexos

A continuación se muestran las tablas con los resultados obtenidos al usar la primera y la segunda estrategias propuestas en este trabajo.

Mes	Usada	Demanda	Porcentaje	Desp
Enero	9610	13020	73,81	390
Febrero	11760	11760	100,00	680
Marzo	9610	13020	73,81	1590
Abril	11700	12600	92,86	370
Mayo	9610	13020	73,81	1310
Junio	9300	12600	73,81	1510
Julio	12710	13020	97,62	100
Agosto	6975	13020	53,57	2525
Septiembre	9300	12600	73,81	2125
Octubre	13020	13020	100,00	705
Noviembre	9300	12600	73,81	1505
Diciembre	12090	13020	92,86	115

Tabla 6. Solución obtenida usando la primera estrategia [Solution found using the first strategy].