



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

“OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA DEL USO DEL AGUA PLUVIAL A NIVEL MACROSCÓPICO”

PRESENTA TESIS:

Andrea Bocanegra Martínez

A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

ASESOR:

Dr. Fabricio Nápoles Rivera

Morelia Michoacán, Agosto de 2016.

OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA DEL USO DEL AGUA PLUVIAL A NIVEL MACROSCÓPICO.

Realizada por: I.Q. Andrea Bocanegra Martínez

Agosto de 2016

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

Asesorada por: Dr. Fabricio Nápoles Rivera y Dr. José María Ponce Ortega

RESUMEN

En este proyecto se propone un enfoque de optimización estocástica basado en el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico. Se propone la formulación de un modelo de optimización para la instalación de dispositivos de captación de aguas pluviales, tuberías y tanques; así como para la ubicación óptima de sistemas de almacenamiento y distribución de agua de lluvia recolectada; los datos que se obtienen son a partir de distribuciones de tipo uniforme mediante el método Montecarlo. El modelo de optimización consiste en la satisfacción de las demandas de agua para uso doméstico considerando procesos de optimización estocástica para minimizar del costo total anual asociado al agua fresca (la que proviene de la red de agua de servicio municipal) como función objetivo, así como la minimización del costo total anual considerando el peor de los escenarios predichos en la distribución. La aplicación de la propuesta de optimización permite determinar en qué periodo se podría invertir en el sistema instalado, considerando como factor importante el cálculo de la probabilidad de lluvia en años posteriores.

Palabras clave: Optimización, métodos estocásticos, Metodología Montecarlo, agua pluvial, programación en GAMS

ABSTRACT

In this project a stochastic optimization approach based on the design of systems for rainwater storage for domestic use is proposed. The formulation of an optimization model for the installation of rainwater harvesting, pipes and tanks is proposed; as well as the optimal location for storage and distribution of collected rain water; data are obtained from uniform rate distributions by Monte Carlo method. The optimization model is meeting the demands for water for domestic use considering processes stochastic optimization to minimize the total annual cost associated with fresh water (which comes from the water network of municipal service) as objective function and minimizing the total annual cost considering the worst case scenarios predicted distribution. The application of optimization proposal can determine which period could invest in the installed system, considered as an important factor when calculating the probability of rain in later years.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
RELACIÓN DE TABLAS	viii
RELACION DE FIGURAS	ix
NOMENCLATURA	x
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades	1
1.1.1.Sistema de captación de agua pluvial	1
1.1.2.Factibilidad	5
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo general	7
1.2.2 Objetivos Específicos	7
1.3 Justificación	8
1.4 Hipótesis	8
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Antecedentes	9
CAPITULO 3. METODOLOGÍA	11
3.1. Modelos estocásticos y métodos de distribución	11
3.2. Aplicación de los métodos y modelo de optimización	12

CAPITULO 4. RESULTADOS	15
4.1 Modelo matemático	15
4.1.1 Balances de materia en las áreas de captación	16
4.1.2. Balances en los divisores de las áreas de captación.	16
4.1.3 Balances de materia en los tanques de almacenamiento.	16
4.1.4 Balance de materia en el tanque elevado	17
4.1.5. Existencia de las unidades.	17
4.1.6. Capacidad máxima para todos los períodos de tiempo.	19
4.1.7. Costos	20
4.1.7.1. Costo de Capital para las áreas de captación.	20
4.1.7.2. Costo de capital para los tanques de almacenamiento.	20
4.1.7.3. Costos de capital asociados al sistema de tubería	21
4.1.7.4. Costos de tratamiento.	22
4.1.7.5. Costo de Bombeo	22
4.1.7.6. Costo de Agua Fresca.	22
4.1.8 Función objetivo asociada al costo total.	23
4.1.9 Función objetivo asociada al consumo de agua fresca	23
4.1.10 Función objetivo.	23
4.2. Definición del problema	24
4.3. Estrategia de solución	25
4.4. Código GAMS	26
4.5. Caso de Estudio.	26
4.6. Requerimiento diario de agua por persona.	27
4.6.1. Precipitación	27
4.6.2 Superficie de captura	30
4.6.3 Agua pluvial obtenida	31

4.7. Resultados del caso de estudio.	32
4.8 Ahorro	35
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES	37
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
APÉNDICE	41
A.1. Optimización de TAC	41
A2. Optimización en el peor de los escenarios	55

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Precipitación promedio en la ciudad de Morelia, México.

Tabla 2. Área disponible para la captación de agua de lluvia en el desarrollo residencial del caso de estudio.

Tabla 3. Demanda de agua para cada sección por día durante todo el año en m³.

Tabla 4. Superficie de captura por construcción y por lote para el Fraccionamiento Fresnos Arboledas

Tabla 5. Agua pluvial recolectada anual por construcción y por lote

Tabla 6. Estructura tarifaria para uso doméstico en zona residencial (OOAPAS, 2010)

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1. Sistema básico de recolección de agua pluvial en techos.

Figura 2. Superestructura del sistema de recolección de agua de lluvia, almacenamiento y distribución en un desarrollo residencial.

Figura 3. Esquema para el caso de estudio.

Figura 4. Representación de la probabilidad en la minimización del TAC y minimización en el peor de los escenarios.

Figura 5. Representación de la probabilidad en la minimización del CONSUMO DE AGUA FRESCA y minimización en el peor de los escenarios.

Figura 6. Representación de la probabilidad en la minimización del TAC y minimización en el peor de los escenarios comparando con un incremento en la Desviación Estándar.

NOMENCLATURA

Superíndices

<i>cap</i>	Referente al área de captación de agua pluvial.
ElevTank	Tanque elevado.
<i>fresh</i>	Agua fresca consumida del servicio municipal.
pipe	Tubo.
pumping	Bombeo.
<i>stg</i>	Almacenamiento.
Treatment	Respecto al tratamiento del agua.

Conjuntos

<i>i</i>	Número de áreas de recolección que están delineadas en el techo de los edificios.
<i>j</i>	Número de unidades de almacenamiento de las aguas pluviales recolectadas donde puede ser tratada y almacenada.
<i>l</i>	Los usuarios del agua.
<i>m</i>	Meses del año.

Parámetros

α, β, δ	Exponentes para las funciones de costo de capital.
A_i^{\max}	Área máxima de recolección disponible.
$CF_i^{\text{captation}}$	Costo fijo del área de recolección de agua de lluvia.

CF^{ElevTank}	Costo fijo del tanque elevado.
CF_{ij}^{pipe}	Costo fijo de tubos que van desde los almacenamientos al tanque elevado.
CF_j^{pipe}	Costo fijo de la tubería.
CF_j^{storage}	Costo fijo de los tanques de almacenamiento.
$Cost_m^{\text{fresh}}$	Costo del agua fresca mensual.
$Cost_j^{\text{pumping}}$	Costo de bombeo de los tanques de almacenamiento al tanque elevado.
$Cost^{\text{Treatment}}$	Costo de tratamiento de agua.
$CV_i^{\text{captation}}$	Costo variable del área de captación de agua pluvial.
CV^{ElevTank}	Costo variable del tanque elevado.
CV_{ij}^{pipe}	Costo variable de la tubería desde el área de recolección hasta el tanque de almacenamiento.
CV_j^{pipe}	Costo variable por de la tubería del tanque de almacenamiento al tanque elevado.
CV_j^{storage}	Costo variable de los tanques de almacenamiento.
$D_{l,m}$	Agua requerida por cada tanque de almacenamiento en cada periodo
F^{max}	Flujo máximo permitido en las tuberías.
G^{max}	Flujo máximo permitido en las tuberías.
K_F	Factor que se utiliza para anualizar el costo de capital.
P_m	Precipitación mensual.
STG_j^{max}	Capacidad máxima de los tanques de almacenamiento.

Variables

<i>FreshTotal</i>	Agua fresca consumida proveniente del servicio municipal.
<i>TAC</i>	Costo total anual

Variables positivas

A_i	Área de recolección de agua utilizada.
<i>CaptationCost</i>	Costo de capital del área de recolección.
$F_{i,m}$	Lluvia recolectada en cada área.
$f_{i,j}^{cap}$	Flujo máximo en las tuberías desde las áreas de recolección hasta el tanque de almacenamiento.
f_m^{fresh}	Agua fresca consumida en cada periodo de tiempo.
F^{max}	Lluvia recolectada durante cada periodo de tiempo.
<i>FreshCost</i>	Costo de agua fresca.
g_j^{cap}	Flujo máximo en las tuberías desde los tanques de almacenamiento al tanque elevado.
G^{max}	Agua distribuida desde los tanques de almacenamiento hasta el tanque elevado.
<i>PipeCost</i>	Costo de capital de la tubería
<i>PumpingCost</i>	Costo de bombeo.
$S_{j,m}$	Acumulación mensual de cada tanque.
S_j^{max}	Capacidad máxima de almacenamiento de cada tanque.
<i>StorageCost</i>	Costo de capital para los tanques de almacenamiento.

$StorageCostT$	Costo de capital para el tanque elevado.
T_m	Acumulación mensual del tanque elevado.
T^{\max}	Capacidad máxima para el tanque elevado.
$TreatmentCost$	Costo de tratamiento de agua recolectada.

Variables binarias

x_j	Variable binaria para la existencia de tubería del tanque de almacenamiento al tanque elevado
y_i^{capt}	Variable binaria para la existencia dl área de recolección de agua de lluvia.
y_j^{stg}	Variable binaria para la existencia de los tanques de almacenamiento.
$z_{i,j}$	Variable binaria para la existencia de la tubería desde las áreas de recolección al tanque de almacenamiento.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

En esta sección se mostrarán las características de un sistema de captación de agua pluvial y su aplicación en los complejos residenciales, así como su importancia en el desarrollo de las sociedades.

1.1 Generalidades

Para el desarrollo de cualquier especie, incluida la humana, el agua es un recurso básico, el cual cobra mayor importancia cuando hablamos de sociedades desarrolladas, ya que se requiere de ella tanto para su uso doméstico como industrial, sobre todo en grandes ciudades como la de México. Por lo tanto, resulta primordial para cualquier cultura tener un manejo adecuado de este recurso, tanto para su abastecimiento, como para evitar desastres.

No es ninguna novedad que debido al crecimiento demográfico, especialmente en muchas ciudades de México y zonas conurbadas, el abasto de agua es insuficiente. Si a esto le añadimos un ordenamiento urbano mal planeado o asentamientos irregulares que conllevan la falta de sistemas de abastecimiento de agua formales, el problema se agrava significativamente. Es importante resaltar que es responsabilidad del Estado garantizar el abastecimiento de este importante recurso para toda la sociedad, lo cual representa un gran reto y es el motivo de esta investigación. De esta manera, técnicas de optimización que permitan minimizar el impacto ambiental y lograr satisfacer las demandas de agua en regiones con escases de la misma son muy atractivas para su implementación.

Por otro lado, el consumo de agua para uso doméstico representa alrededor del 10% de la demanda total de agua dulce en el mundo, y el satisfacer estas demandas internas representa un problema importante en lugares con escasez de agua. Por lo que la instalación de sistemas de captación de aguas pluviales ayudaría en la solución a este problema.

1.1.1 Sistema de captación de agua pluvial

La captación de agua de lluvia en techos es una alternativa factible que puede resolver la carencia de agua para consumo humano en lugares donde no se cuenta con fuentes de abastecimiento garantizado, en calidad o cantidad. La tecnología requiere una superficie de

techos para la captación de las aguas pluviales, ésta puede ser de una vivienda o una cubierta libre de contaminación. El escurrimiento superficial en techos es interceptado, colectado y almacenado en un tanque, el que trabaja además como un regulador de caudales. Para su aprovechamiento posterior del agua almacenada, se puede requerir de un sistema de impulsión de agua como una bomba manual, bomba eléctrica u otros tipos de bombas. Una descripción más detallada sobre el diseño de este sistema se presenta a continuación:

Como muestra la **Figura 1**, el sistema de captación de agua de lluvia en techos está compuesto de los siguientes elementos:

- a) Área de captación (techo);
- b) Recolección y conducción (sistema de tuberías);
- c) Interceptor (sistema de tratamiento);
- d) Almacenamiento o tanque de almacenamiento de agua pluvial.

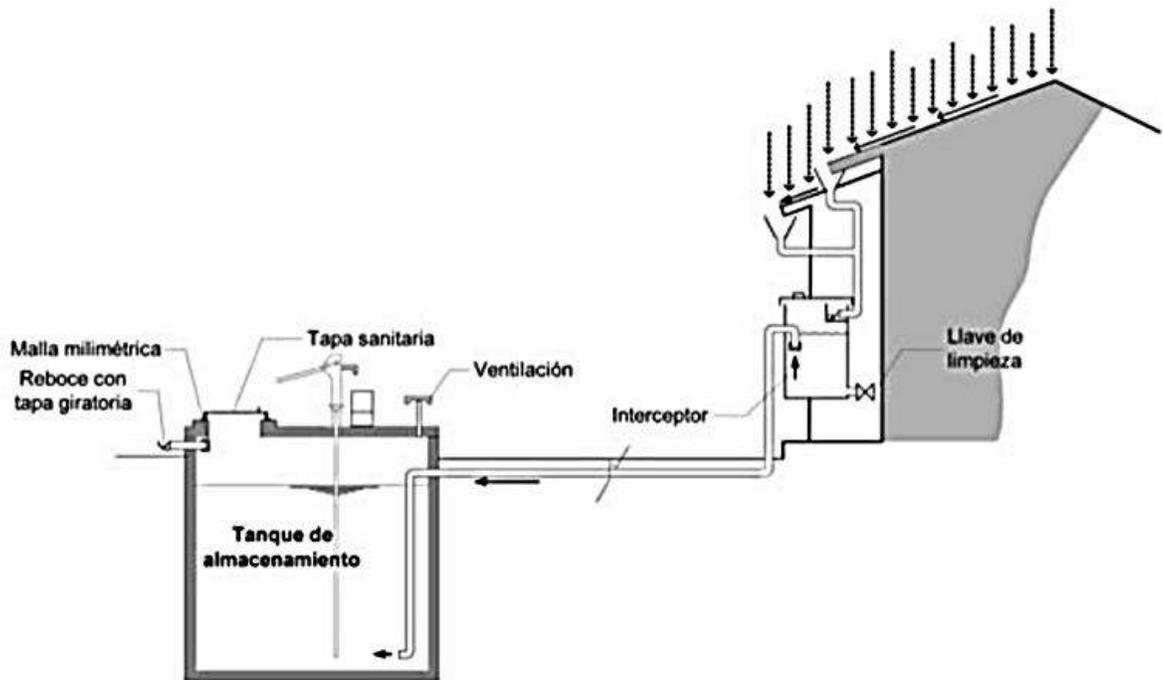


Figura 1. Sistema básico de recolección de agua pluvial en techos.

- a) **Área de captación.** El área de captación está conformado por el techo de la edificación, el mismo que debe tener la superficie y pendiente adecuadas para que facilite el escurrimiento del agua de lluvia hacia el sistema de recolección. En el cálculo del modelo se deberá considerar solamente la proyección horizontal del techo.

Los materiales empleados en la construcción de techos para la captación de agua de lluvia son la plancha metálica ondulada, tejas de arcilla, paja, etc.

- b) **Recolección y Conducción.** Este componente es una parte esencial de los sistemas de captación de agua de lluvia por techo, ya que conducirá el agua recolectada por el techo directamente hasta el tanque de almacenamiento. Está conformado por las canaletas que van adosadas en los bordes más bajos del techo, en donde el agua tiende a acumularse antes de caer al suelo (ver **Figura 1**).

El material de las canaletas debe ser liviano, resistente al agua y fácil de unir entre sí, a fin de reducir las fugas de agua. Al efecto se puede emplear materiales, como el bambú, madera, metal o PVC.

- c) **Interceptor.** Retiene todos los materiales que se encuentren en el momento del inicio de la lluvia. Este dispositivo impide que el material indeseable ingrese al tanque de almacenamiento y de este modo minimizar la contaminación del agua almacenada y de la que vaya a almacenarse posteriormente.

En el diseño del dispositivo se debe tener en cuenta el volumen de agua requerido para lavar el techo y que se estima en 1 litro por m^2 de techo. El volumen de agua resultante del lavado del techo debe ser recolectado en un tanque de almacenamiento. Este tanque debe diseñarse en función del área del techo; en el modelo que se presentará en el proyecto, la capacidad de estos tanques será una variable de optimización.

El papel que juega el interceptor en el sistema de recolección es de suma importancia, debido a que es necesario que el agua retirada y destinada al consumo directo de las personas sea tratada antes de su ingesta o para cualquier uso que se prevea dársele. El tratamiento debe estar dirigido a la remoción de las partículas que no fueron retenidas por el dispositivo de intercepción, y en segundo lugar al acondicionamiento bacteriológico. El tratamiento puede efectuarse por medio de un filtro de mesa de arena seguido de la desinfección con cloro.

- **Filtro de arena:** Los filtros de arena pueden remover las partículas de tamaño mayor y menor que el poro del medio filtrante. Las partículas mayores son retenidas por el simple efecto físico de cernido y las pequeñas por adherencia a la superficie de las capas superficiales del elemento filtrante. Esta adherencia forma una película cuya resistencia al esfuerzo cortante por el flujo de agua depende de la magnitud de la fuerza que la mantiene unida. Este último mecanismo disminuye la tasa de filtración y la cantidad de agua filtrada.
- **Desinfección con cloro.** La cloración consiste en la adición de cloro al agua, ya sea cloro puro o alguno de sus compuestos, en las dosis adecuadas para cumplir la normativa vigente respecto a la calidad bacteriológica y a la concentración de desinfectante activo residual que debe estar presente en todo punto de la red de distribución de agua potable.

La razón fundamental de la desinfección del agua es disminuir el riesgo de infección por enfermedades hídricas, mediante la destrucción o inactivación de los diversos organismos patógenos que pueden estar presentes en la fuente de agua cruda.

- d) **Tanque de almacenamiento de agua pluvial.** Es la obra destinada a almacenar el volumen de agua de lluvia necesaria para el consumo diario de las personas beneficiadas con este sistema, en especial durante el período de sequía.

La unidad de almacenamiento debe ser duradera y al efecto debe cumplir con las especificaciones siguientes:

- Impermeable para evitar la pérdida de agua por goteo o transpiración,
- De no más de 2 metros de altura para minimizar las sobre presiones,
- Dotado de tapa para impedir el ingreso de polvo, insectos y de la luz solar, o en su defecto, la construcción de un tanque cerrado,
- Disponer de una escotilla con tapa sanitaria lo suficientemente grande como para que permita el ingreso de una persona para la limpieza y reparaciones necesarias,

- La entrada y el rebose deben contar con mallas para evitar el ingreso de insectos y animales.
- Dotado de dispositivos para el retiro de agua y el drenaje. Esto último para los casos de limpieza o reparación del tanque de almacenamiento. En el caso de tanques enterrados, deberán ser dotados de bombas de mano.

Esta tecnología se aplica en zonas rurales y urbanas, puede resolver la demanda de agua para diferentes usos, entre los que destacan los siguientes: riego de jardines, limpieza de vehículos, descarga de inodoros o agua de bebida (dependiendo de la calidad del agua). No es recomendable su uso como agua para beber cuando se tienen índices elevados de contaminación atmosférica.

Así mismo, esta tecnología es aplicable en zonas o áreas de inundación, donde la captación de agua superficial y/o subterránea no es factible técnicamente o como alternativa de uso en situaciones de desastres naturales.

1.1.2 Factibilidad

En el diseño de un sistema de captación de agua de lluvia es necesario considerar los factores técnicos, económicos y sociales.

•Factor Técnico

Los factores técnicos a tener presente son la producción u oferta y la demanda de agua:

a) Producción u “oferta” de agua; está relacionada directamente con la precipitación durante el año y con las variaciones estacionales de la misma. Por ello, en el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia es altamente recomendable trabajar con datos suministrados por la autoridad competente y normalmente representada por la oficina meteorológica del país o de la región donde se pretende ejecutar el proyecto.

b) Demanda de agua; la demanda depende de las necesidades del interesado y que puede estar representada por solamente el agua para consumo humano, hasta llegar a disponer de agua para todas sus necesidades básicas como son preparación de alimentos, higiene personal, lavado de vajillas y de ropa e inclusive riego de jardines. Dado que el proyecto en cuestión sólo ha considerado la demanda para uso doméstico, no se consideran algunos de los puntos antes mencionados en la creación del modelo.

•Factor Económico

Al existir una relación directa entre la oferta y la demanda de agua, las cuales inciden en el área de captación y el volumen de almacenamiento, se encuentra que ambas consideraciones están íntimamente ligadas con el aspecto económico, lo que habitualmente resulta una restricción para la mayor parte de los interesados, lo que imposibilita acceder a un sistema de abastecimiento de esta naturaleza. En la evaluación económica es necesario tener presente que en ningún caso la dotación de agua debe ser menor a 20 litros de agua por familia y por día, la misma que permite satisfacer sus necesidades básicas elementales, debiendo atenderse los aspectos de higiene personal y lavado de ropa por otras fuentes de agua (considerando el consumo de agua fresca). Así mismo, los costos del sistema propuesto deben ser comparados con los costos de otras alternativas destinadas al mejoramiento del abastecimiento de agua, teniendo presente el impacto que representa la cantidad de agua en la salud de las personas beneficiadas por el servicio de agua.

•Factor Social

En la evaluación de las obras de ingeniería a nivel comunitario, siempre se debe tener presente los factores sociales, representados por los hábitos y costumbres que puedan afectar la sostenibilidad de la intervención. Al efecto, el profesional responsable del estudio debe discutir con la comunidad las ventajas y desventajas de la manera tradicional de abastecimiento de agua y de la tecnología propuesta, buscando que la propia sociedad seleccione lo que más le conviene emplear. Este análisis debe considerar la conveniencia de adoptar soluciones individuales y colectivas, el tipo de material empleado en la fabricación de sus techos, la existencia de materiales alternativos en el lugar o sus alrededores y el grado de participación de la sociedad en la implementación del proyecto.

1.2Objetivos

En esta sección se muestran los objetivos que se cumplirán en el desarrollo del proyecto

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología general que permita el diseño óptimo de sistemas de captación de agua de lluvia para su uso a nivel macroscópico considerando las incertidumbres asociadas a las precipitaciones debido al problema del cambio climático a través de modelos predictivos estocásticos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ❖ Desarrollar un modelo de optimización estocástico considerando la minimización del costo total anual y la minimización del costo en el peor de los escenarios predichos.
- ❖ Aplicación del modelo propuesto a un caso de estudio en la ciudad de Morelia, Michoacán para observar el comportamiento del mismo dirigido a la toma de decisiones.

1.3 Justificación

El agua potable es indispensable para el desarrollo humano, en especial en los desarrollos residenciales, en donde el gran desperdicio del agua potable es más notable, por lo que se requieren tecnologías adecuadas para satisfacer la necesidad de este recurso. Sabemos que el comportamiento de la precipitación durante las estaciones del año fluctúa significativamente en especial en las ciudades donde el cambio climático es más notable debido a la contaminación. Por lo que, aunado a esto, la insuficiencia de recursos económicos para invertir en tecnologías que satisfagan las necesidades de estos recursos, nos llevan a desarrollar estrategias que permitan conocer el comportamiento de las precipitaciones para un futuro en donde sea más conveniente hacer una inversión aplicado al diseño de un sistema de captación de aguas pluviales que permita una distribución óptima del agua de lluvia y que pueda ser utilizado en las diferentes actividades domésticas, permitiendo así, resolver el problema indicado.

1.4 Hipótesis

Incorporar los efectos de incertidumbres asociadas a la precipitación y crecimiento poblacional en el diseño óptimo de un sistema óptimo de recolección, almacenamiento y distribución de agua de lluvia en una unidad habitacional permitirá obtener un diseño más robusto y capaz de reaccionar adecuadamente a dichas fluctuaciones.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se mostrarán los antecedentes en los que se basa el presente proyecto y las aportaciones que da el mismo a la generación de nuevos conocimientos.

2.1 Antecedentes

Recientemente, varias técnicas sistemáticas para satisfacer la demanda de agua doméstica sobre la base de la distribución y almacenamiento óptimo de agua han sido reportadas. En este contexto, Khastagir y Jayasuriya (2010) presentaron un modelo para el dimensionamiento óptimo de los tanques de agua de lluvia con fines domésticos. Imteaz et al. (2011) presentaron una herramienta para el dimensionamiento de los tanques de agua de lluvia asociadas a los grandes techos. Atilhan et al. (2012) presentaron un enfoque de integración de sistemas para optimizar la distribución de agua en Qatar para el agua desalinizada. Recientemente, Nápoles-Rivera et al. (2013) propusieron una herramienta de optimización sistemática para la gestión del agua en las ciudades. Rozos et al. (2010) presentaron diferentes esquemas para el reciclaje del agua que implica el agua de lluvia.

De la misma manera, Bocanegra-Martínez et al. (2014) presentaron un modelo de optimización para la distribución y determinación óptima de tamaño de tanques, áreas de captación y distribución de red de tuberías en la instalación de un sistema de captación de aguas pluviales en un desarrollo residencial. Este modelo ha mostrado su eficiencia en diferentes aplicaciones, sin embargo, este modelo ha sido basado para un enfoque determinístico, y en donde no se consideran las proyecciones para tiempos futuros. Es importante resaltar que estas proyecciones son de primordial importancia, ya que debido a efectos como el cambio climático existe una enorme incertidumbre asociada a la predicción de las lluvias así como a la disposición del agua dulce en diversos lugares. Por lo tanto, es muy importante contar con un modelo que permita modelar la incertidumbre asociada en todo el proceso de captura y distribución de agua a nivel macroscópico.

Sin embargo, no hay un enfoque de optimización para el diseño óptimo de un sistema de recolección de agua de lluvia que permita determinar el mejor periodo de inversión para

la instalación de un sistema de captación de aguas pluviales, utilizando métodos de distribución para predecir el comportamiento pluvial en años posteriores, y así satisfacer las demandas de agua en un complejo residencial mediante un modelo de programación matemática formal para garantizar la solución óptima. Por lo tanto, en este proyecto se propone un enfoque formal de optimización basado en el diseño óptimo de un sistema de recolección de aguas pluviales utilizando métodos de optimización estocásticos para satisfacer las demandas de agua para uso doméstico en un desarrollo residencial.

El sistema propuesto tomará en cuenta la captura óptima del agua de lluvia que se tendría en años posteriores, el acondicionamiento del área de recolección, así como un sistema de múltiples tanques, una red de tuberías y bombas necesarias y distribución de agua de lluvia para satisfacer la demanda de agua con un costo mínimo. El modelo tomará en cuenta la variabilidad de la demanda de agua a través de las distintas épocas del año, así como la variabilidad asociada al agua de lluvia disponible en el lugar considerado, partiendo del desarrollo de diferentes escenarios que predigan este factor en años posteriores. El costo total deberá considerar el asociado al consumo de agua fresca, el costo de capital asociado a los sistemas de recolección, almacenamiento, tuberías y bombas, así como los costos de bombeo asociados con el sistema.

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se mostrarán los pasos que se siguieron en el desarrollo y solución del proyecto.

Para la construcción del modelo, primeramente determinaremos las características del sistema. En este caso, el objeto de estudio es la precipitación anual en la ciudad de Morelia. Observaremos las variables implicadas en el diseño del sistema de aprovechamiento de aguas pluviales y los patrones de precipitación, los cuales principalmente son: la demanda de agua del desarrollo residencial estudiado, las áreas disponibles para la instalación del sistema, los diferentes usos que se le dará al agua recolectada, la distribución de los tanques de almacenamiento y el tamaño máximo de los mismos.

Para diseñar un sistema de captación de agua pluvial en techos se debe contar con series históricas de las precipitaciones pluviales de al menos diez años. La serie de datos históricos debe corresponder al promedio mensual de precipitaciones. A partir de estos datos de precipitación mensual para diferentes años, se generará una tabla de distribuciones uniformes para 100 escenarios que pudieran ocurrir en algún año posterior a los reportados en la bibliografía y para el cual se desee hacer la inversión para la instalación del sistema. De aquí, los datos generados se utilizarán para la modelación del sistema de captación de agua.

Los consumos de agua de lluvia responden a la demanda del usuario de acuerdo a sus diferentes usos; el agua de lluvia puede destinarse para riego de jardines, descarga de inodoros, lavado de automóviles y otros usos, dependiendo de las condiciones locales y calidad del agua.

3.1. Modelos estocásticos y métodos de distribución

En el problema bajo estudio, un modelo estocástico se puede definir como una representación que genere una serie de datos de precipitación partiendo de datos históricos

reales. Los modelos estocásticos tienen una amplia gama de aplicación, en general se puede realizar un estudio estocástico a cualquier conjunto de sucesos aleatorios referenciados en tiempo.

Uno de los modelos estocásticos más utilizados es el método Montecarlo, el cual es uno de los modelos estadísticos más conocidos y con una gran cantidad de años de desarrollo (ver por ejemplo Chico-Fernández et al., 2012). Para lo cual, se han encontrado un conjunto importante de investigaciones que estudian series temporales de datos que se enfocan a predicciones de tiempo meteorológico con modelos estocásticos, ya que las variables a tratar son claramente aleatorias. Por ejemplo, Espinoza-Rodríguez (2010) establece mediante modelos estocásticos una predicción a corto plazo de demandas de agua en zonas urbanas aplicado a zonas con gran densidad de población.

Sin embargo, en los últimos años no se han reportado modelos para caracterizar la precipitación, especialmente en zonas urbanas como la ciudad de Morelia.

Partiendo del objetivo principal de este proyecto, el cual se enfoca en generar una muestra de datos de precipitación para años posteriores, el proceso comprende los siguientes pasos:

- Obtener una muestra de una distribución uniforme entre cero y uno, que en nuestro caso serían los datos históricos de los últimos diez años de precipitación mensual para la ciudad de Morelia. Generado mediante lenguaje de programación.
- Generar una función de distribución.
- Repetir n veces los pasos anteriores para generar una muestra de n datos, que representarán diferentes escenarios posibles para cada mes en el año posterior que se quiere analizar

3.2. Aplicación de los métodos y modelo de optimización

Teniendo clara las variables del modelo, empezamos a tratar los datos de campo para preparar la información que necesita el modelo, con un pre-proceso transformamos el registro de medidas hechas en campo en escenarios que tienen como característica la precipitación mensual para diferentes años posteriores al que se cuenta de los datos, esta transformación de

datos históricos a escenarios la realizamos con la aplicación la metodología de probabilidad para poder utilizarlos posteriormente en la aplicación del método estocástico correspondiente (metodología de distribución de Montecarlo o Movimiento Browniano).

El resultado del pre-proceso, serán las series de características de cada escenario, en concreto la precipitación mensual para el año posterior de estudio.

El siguiente paso será extraer los parámetros estadísticos que caracterizan el conjunto de datos originales, para genera una serie de patrones que se asemeje lo suficiente a los datos reales. Ya que los datos originales corresponden a datos históricos de precipitación en la ciudad de Morelia, el resultado del modelo corresponde también a los datos de precipitación del año posterior.

Posteriormente, filtraremos los datos clasificados para separar características específicas del conjunto de datos reales, donde el resultado será una matriz que almacenan distintos rasgos de los escenarios reales.

La herramienta estadística que utilizaremos para trabajar con este tipo de conjuntos de variables son las distribuciones de probabilidad, las cuales serán generadas por la metodología de la distribución de Montecarlo o la distribución del Movimiento Browniano, ya que estas pueden reproducir un conjunto de números con una distribución similar un conjunto de variables preestablecidas, esto responde al objetivo principal del modelo estocástico que desarrollaremos. Las distribuciones de probabilidad generarán entonces los distintos patrones de variables que nos permiten crear escenarios ficticios con el cumulo de escenarios reales que obtuvimos con el filtro, para lograr esto es necesario ajustar las distribuciones de probabilidad a la series de datos originales y es esto ajusta el proceso principal del modelo estocástico.

La siguiente etapa del proyecto consiste en asociar los distintos patrones generados con las distribuciones de probabilidad para crear escenarios ficticios con las mismas características que los escenarios reales, a este proceso lo denominamos ensamblaje (ver Mascareña, 2013). Los patrones de la variable de precipitación están en forma de vectores

con los que formamos la matriz que contiene la información de los escenarios ficticios. El último paso del modelo estocástico es la corrección del conjunto ficticio de escenarios.

CAPITULO 4. RESULTADOS

En la validación del modelo explicaremos los resultados comparando la serie de datos reales con la ficticia con distintos criterios, principalmente contrastamos los costos totales anuales de la distribución temporal de los eventos, utilizaremos los valores promedios por intervalos de tiempo a lo largo del mes como método de comparación; además, la comparación de la minimización del costo total anual respecto de la minimización del costo total anual en la predicción del peor de los casos será realizada después. Posteriormente, se creará una curva que constituye un conjunto de soluciones óptimas que compensen la minimización del costo total anual de la distribución de los datos contra la minimización del costo total anual en el peor de los casos. Esta curva Pareto será útil para elegir la solución que mejor satisfaga la necesidad de la toma de decisiones.

4.1 Modelo matemático

Esta sección presenta el modelo de optimización para el diseño de los sistemas de recolección de agua de lluvia, almacenamiento y distribución de tanques en un desarrollo residencial.

En primer lugar, se presentan los índices utilizados en el modelo. i representa el número de las zonas de captación que están delineadas en el techo de los edificios, m indica los períodos de tiempo considerados en el modelo que en este caso corresponden a los meses del año, j es el número de unidades de almacenamiento que se pueden instalar en el desarrollo residencial y cuya existencia, magnitud y funcionalidad se ha optimizado, y l representa a los usuarios del agua en el desarrollo residencial, los cuales tienen demandas específicas en cada uno de los períodos de tiempo. Entonces, el modelo propuesto se presenta de la siguiente forma.

4.1.1 Balances de materia en las áreas de captación

El agua se recoge directamente de la precipitación mensual y se envía a los almacenes; la cantidad de agua recogida depende de la zona de recolección y la precipitación mensual medida en metros de agua por mes. Por lo tanto, el agua de lluvia captada en el área i , en el período de tiempo t ($F_{i,m}$) es igual a la superficie acondicionada (A_i) por la precipitación promedio durante este periodo de tiempo (P_m):

$$F_{i,m} = P_m A_i, \quad \forall i \in I, \forall m \in M \quad (1)$$

Donde la precipitación promedio se puede determinar a partir de informes meteorológicos.

4.1.2 Balances en los divisores de las áreas de captación.

Se requieren balances de materia en los divisores de las áreas de captación, donde el agua que se recolecta ($F_{i,m}$) en cada área de almacenamiento i es igual a la suma del flujo enviado a cada dispositivo de almacenamiento j ($f_{i,j,m}$) para cada mes m :

$$F_{i,m} = \sum_j f_{i,j,m}, \quad \forall i \in I, \forall m \in M \quad (2)$$

4.1.3 Balances de materia en los tanques de almacenamiento.

Se requieren balances de masa en las posibles unidades de almacenamiento para determinar su existencia, tamaño y funcionamiento. Por lo tanto, el agua acumulada en el tanque j al final del periodo de tiempo m ($S_{j,m}$) es igual a la cantidad de agua disponible al final del periodo anterior ($S_{j,m-1}$) y a la suma de las aguas pluviales de las áreas de captación i ($f_{i,j,m}$) menos los flujos de agua que se distribuyen al tanque elevado ($g_{j,m}$) durante el periodo de tiempo m :

$$S_{j,m} = S_{j,m-1} + \sum_i f_{i,j,m} - g_{j,m}, \quad \forall j \in J, \forall m \in M \quad (3)$$

La ecuación (3a) representa el balance del agua en el tanque de almacenamiento j para asegurar que el agua disponible en los tanques de almacenamiento en el inicio del primer período sea igual a la cantidad de agua disponible en el final del último período del año:

$$S_{j,m=0} = S_{j,m=12}, \quad \forall j \in J \quad (3a)$$

4.1.4 Balance de materia en el tanque elevado

El balance de materia en el tanque elevado que lleva el agua disponible al final del periodo de tiempo m (T_m) es igual a la cantidad de agua disponible al final del periodo anterior (T_{m-1}) más la suma del agua de los dispositivos de almacenamiento ($g_{j,m}$) y el agua fresca consumida durante cada mes (f_m^{fresh}) menos el agua distribuida a los usuarios ($D_{l,m}$) durante cada período:

$$T_m = T_{m-1} + \sum_j g_{j,m} + f_m^{fresh} - \sum_l D_{l,m}, \quad \forall m \in M \quad (4)$$

Cabe señalar que la demanda de agua para los usuarios ($D_{l,m}$) es un dato conocido y éste se determina en función del número de personas en cada una de las viviendas, así como la temporada del año.

La ecuación (4a) representa el balance del agua en el tanque elevado a fin de garantizar que el agua disponible en el final del primer período es igual a la del último período del año:

$$T_{m=0} = T_{m=12} \quad (4a)$$

4.1.5 Existencia de las unidades.

Son necesarias disyunciones lógicas para determinar si una posible unidad se utiliza en la solución óptima. Si una unidad dada es utilizada en la solución óptima, el costo de capital debe ser calculado en función del tamaño y la existencia de la unidad. Por lo tanto, son necesarias variables binarias que indican la existencia de estas unidades (es decir, la variable binaria es uno cuando la unidad existe, de lo contrario es cero).

Cuando un área de recolección (A_i) en un determinado edificio i está acondicionado para recoger el agua de lluvia, entonces la variable binaria y_i^{cap} se activa de la siguiente manera:

$$A_i \leq A_i^{\max} y_i^{cap}, \forall i \in I \quad (5)$$

Donde, A_i^{\max} es el área máxima disponible en el edificio i , lo cual debe conocerse antes de la optimización; luego, cuando A_i es mayor que cero la variable binaria y_i^{cap} debe ser uno.

Para determinar la existencia de un tanque de almacenamiento j , la variable binaria y_j^{stg} se utiliza. Por lo tanto, para activar esta variable binaria se utiliza la relación siguiente:

$$S_j^{\max} \leq STG_j^{\max} y_j^{stg}, \forall j \in J \quad (6)$$

Donde, STG_j^{\max} es la capacidad máxima para el tanque de almacenamiento instalada en el lugar j .

Por otra parte, a la existencia de los segmentos del tubo y de esta manera para el cálculo del costo fijo asociado a los costos de capital para los tubos, se utilizan las siguientes relaciones lógicas:

$$f_{i,j}^{cap} \leq F^{\max} z_{i,j}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (7)$$

$$g_j^{cap} \leq G^{\max} x_j, \forall j \in J \quad (8)$$

Donde $z_{i,j}$ y x_j son las variables binarias asociadas a la existencia de los segmentos del tubo para los flujos entre el área de recolección i , el tanque de almacenamiento j y tanque de almacenamiento- tanque elevado, respectivamente. Aquí, F^{\max} y G^{\max} son los flujos máximos permitidos en los correspondientes tubos.

4.1.6 Capacidad máxima para todos los períodos de tiempo.

La capacidad máxima de los tanques de almacenamiento (S_j^{\max}) está dada por la máxima cantidad de agua que se recolecta en cada período de tiempo ($S_{j,m}$) y ésta se determina de la siguiente manera:

$$S_{j,m} \leq S_j^{\max}, \quad \forall j \in J, m \in M \quad (9)$$

Por otra parte, el flujo que sale de los divisores ($f_{i,j,m}$) debe ser menor que la capacidad máxima de almacenamiento (S_j^{\max}), como sigue:

$$\sum_i f_{i,j,m} \leq S_j^{\max}, \quad \forall j \in J, m \in M \quad (9a)$$

También, la capacidad del tanque elevado (T^{\max}) debe ser mayor que la necesaria en cada periodo de tiempo (T_m):

$$T_m \leq T^{\max}, \quad \forall m \in M \quad (10)$$

Además, el agua fresca también se envía al tanque elevado (f_m^{fresh}) y ésta debe ser menor que la capacidad de este tanque de la siguiente manera:

$$f_m^{\text{fresh}} \leq T^{\max}, \quad \forall m \in M \quad (10a)$$

El flujo máximo de alimentación a cualquier tanque de almacenamiento ($f_{i,j,m}$) debe ser menor que la capacidad máxima para el tubo de ese segmento ($f_{i,j}^{\text{cap}}$):

$$f_{i,j,m} \leq f_{i,j}^{\text{cap}}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall m \in M \quad (11)$$

Además, el flujo de salida de cada tanque de almacenamiento (g_j^{cap}) debe ser menor que la capacidad asociada al tanque:

$$g_{j,m} \leq g_j^{cap}, \forall j \in J, \forall m \in M \quad (12)$$

4.1.7 Costos.

Una de las funciones objetivo asociada al modelo de optimización propuesto es la reducción al mínimo de los costos totales, que representa el costo de capital para las áreas de captación, tanques de almacenamiento, bombas y tuberías, así como el costo del agua fresca y los costos de operación para la recolección, tratamiento y almacenamiento. Estos costos se calculan de la siguiente manera.

4.1.7.1 Costo de capital para las áreas de captación.

El costo de capital asociado a las áreas de captación se determina considerando la parte fija ($CF_i^{captation}$) que es independiente del tamaño, el cual se multiplica por la variable binaria y_i^{capt} que sólo se activa cuando el área de captación esta activa, además de la variable que depende del área de captación usada y requerida para ser acondicionado (A_i):

$$CaptationCost = \sum_i \left(CF_i^{captation} y_i^{capt} + CV_i^{captation} (A_i)^\delta \right) \quad (13)$$

Donde $CF_i^{captation}$ y $CV_i^{captation}$ son los gastos fijos y variables de los costos de capital asociados a la ubicación i , y δ es un exponente para tener en cuenta las economías de escala. Los costos por unidad dependen del tipo de área considerada.

4.1.7.2 Costo de capital para los tanques de almacenamiento.

Los costos de capital asociados a los tanques de almacenamiento (*StorageCost*) involucran la parte fija y la variable. La primera parte se activa cuando el almacenamiento existe (es decir y_j^{stg} es igual a uno), mientras que la parte variable considera el tamaño de la unidad:

$$StorageCost = \sum_j [CF_j^{storage} y_j^{stg} + CV_j^{storage} (S_j^{max})^\alpha] \quad (14)$$

Donde $CF_j^{storage}$ y $CV_j^{storage}$ son los costos fijo y variable de los costos de capital de los tanques de almacenamiento y α es un exponente para tener en cuenta las economías de escala. Se debe tener en cuenta que el tamaño de los dispositivos de almacenamiento (S_j^{max}) es el máximo necesario en todos los períodos de tiempo.

El costo de capital para el tanque elevado ($StorageCostT$) se calcula de la siguiente manera:

$$StorageCostT = [CF^{ElevTank} + CV^{ElevTank} (T^{max})^\alpha] \quad (15)$$

Donde $CF^{ElevTank}$ y $CV^{ElevTank}$ son los costos fijo y variable de los costos de capital para el tanque elevado, y α es el exponente para tener en cuenta las economías de escala. Se debe tener en cuenta que el tanque elevado siempre existe y por lo tanto una variable binaria no es necesaria para este depósito.

4.1.7.3 Costos de capital asociados al sistema de tubería.

Hay dos tipos de tuberías asociados al sistema de recolección de agua de lluvia para un desarrollo residencial; uno es la tubería que va desde las áreas de recolección hasta los almacenamientos y el otro es de los almacenamientos al tanque elevado (Se considera que cualquier otra tubería necesaria ya existe para la actual distribución de agua). Para determinar los costos de capital para las nuevas tuberías se deben examinar las partes fijas (CF_{ij}^{pipe} y CF_j^{pipe}) y variables (CV_{ij}^{pipe} y CV_j^{pipe}), así como el exponente de las economías de escala (β) para los diferentes segmentos considerados:

$$PipeCost = \sum_i \sum_j [CF_{ij}^{pipe} z_{i,j} + CV_{ij}^{pipe} (f_{i,j}^{cap})^\beta] + \sum_j [CF_j^{pipe} x_j + CV_j^{pipe} (g_j^{cap})^\beta] \quad (16)$$

Donde $f_{i,j}^{cap}$ y g_j^{cap} son los flujos máximos considerados durante todos los períodos de tiempo para los segmentos involucrados. Además, hay que hacer notar que los costos unitarios consideran la distancia asociada a cada segmento, y los costos fijos se activan a través de las variables binarias correspondientes.

4.1.7.4 Costos de tratamiento.

El agua de lluvia recolectada requiere un tratamiento (por lo general cloración y filtración) para ser utilizado en el desarrollo de viviendas para fines domésticos, y este costo se calcula como sigue:

$$TreatmentCost = \sum_i \sum_j \sum_m Cost^{Treatment} f_{i,j,m} \quad (17)$$

Donde $TreatmentCost$ es el costo anual del tratamiento y $Cost^{Treatment}$ es el costo del tratamiento por unidad.

4.1.7.5 Costo de Bombeo

El costo anual de bombeo ($PumpingCost$) para el agua de lluvia recolectada se calcula como sigue:

$$PumpingCost = \sum_i \sum_j \sum_m Cost_{i,j}^{pumping} f_{i,j,m} + \sum_j \sum_m Cost_j^{pumping} g_{j,m} \quad (18)$$

Donde $Cost_{i,j}^{pumping}$ y $Cost_j^{pumping}$ son los costos unitarios de bombeo asociados a los segmentos del área de recolección a los tanques de almacenamiento y desde los tanques de almacenamiento al tanque elevado, respectivamente.

4.1.7.6 Costo de Agua Fresca.

El costo de agua fresca ($FreshCost$) se calcula teniendo en cuenta el costo del agua fresca por unidad habitacional ($Cost_m^{fresh}$) de la siguiente manera:

$$FreshCost = \sum_m Cost_m^{fresh} f_m^{fresh} \quad (19)$$

Debe tenerse en cuenta que el costo de agua fresca por unidad habitacional depende de la estación del año, ya que depende de la disponibilidad. Esto significa que hay varios meses donde tenemos una gran cantidad de agua de lluvia disponible y en contraparte otros meses en los que no se dispone de agua de lluvia.

4.1.8 Función objetivo asociada al costo total.

Una función objetivo es la minimización del Costo Total Anual para el sistema, que se representa de la siguiente manera:

$$TAC = K_F (PipeCost + StorageCost + StorageCostT + CaptationCost) + (PumpingCost + TreatmentCost + FreshCost) \quad (20)$$

Donde K_F es el factor utilizado para anualizar los costos de capital teniendo en cuenta los años que se utilizará el sistema y el tipo de interés.

4.1.9 Función objetivo asociada al consumo de agua fresca.

La otra función objetivo es reducir al mínimo el consumo de agua fresca ($FreshTotal$) durante todos los períodos de tiempo, que es indicada como sigue:

$$FreshTotal = \sum_m f_m^{fresh} \quad (21)$$

4.1.10 Función objetivo.

La función objetivo se expresa como la minimización simultánea del costo total anual y el consumo de agua fresca así como la minimización en el peor de los escenarios de cada caso:

$$Min\{TAC; WCTAC; FreshTotal; WCFreshTotal\} \quad (22)$$

Debe tenerse en cuenta que el modelo de optimización es un problema de programación no lineal entera mixta multi-objetivo (MINLP).

El modelo propuesto involucra las economías de escala, considerando simultáneamente la distribución de los tanques de almacenamiento y el tamaño de los mismos.

4.2 Definición del problema.

El problema abordado puede enunciarse de la siguiente manera: dado un desarrollo residencial con una ubicación conocida, distribución geográfica, el número de viviendas y las demandas específicas de agua durante todo el año de la misma; se pretende determinar el mejor sistema de recolección de aguas pluviales para satisfacer la demanda interna con el mínimo costo y con el mínimo consumo de agua fresca.

La solución debe determinar la recolección de agua, así como el almacenamiento, tubos y bombas y el óptimo funcionamiento del sistema a través del año. La función objetivo económica incluye el costo de capital para el sistema de recolección, conservación, tuberías y bombas, así como el agua dulce y los costos de bombeo.

Para solucionar este enfoque de optimización multi-objetivo se propone la superestructura que se muestra en la **Figura 2**. Se debe observar en esta figura que hay una gran cantidad de área en los edificios que pueden ser acondicionados para la recolección de agua de lluvia, y el modelo considera la posibilidad de acondicionar toda o parte de esta área para recolectar el agua de lluvia; también el modelo considera la posibilidad para instalar varios depósitos de agua (es decir, tanques, presas, etc.) en lugares específicos en los que es posible hacerlo, el tamaño máximo de estos almacenes se limita a restricciones operativas, técnicas y geográficas, y el modelo debe determinar el número y el tamaño de éstos dispositivos de almacenamiento, también el modelo ha de determinar el número y tamaño de las tuberías en el sistema, incluyendo tubos para el área de recepción a los almacenamientos y de los almacenamientos al tanque elevado, y también se deben determinar el tamaño óptimo para el tanque elevado, los costos asociados al consumo de agua fresca, así como el costo operativo asociado a la operación del sistema colector, tanques, depósitos y bombas. Por

último, el modelo es un enfoque de optimización multi-objetivo que representa al mismo tiempo la minimización del costo total y el consumo de agua fresca. En la siguiente sección se presenta el modelo de programación matemática para optimizar la superestructura presentada en la **Figura 2**.

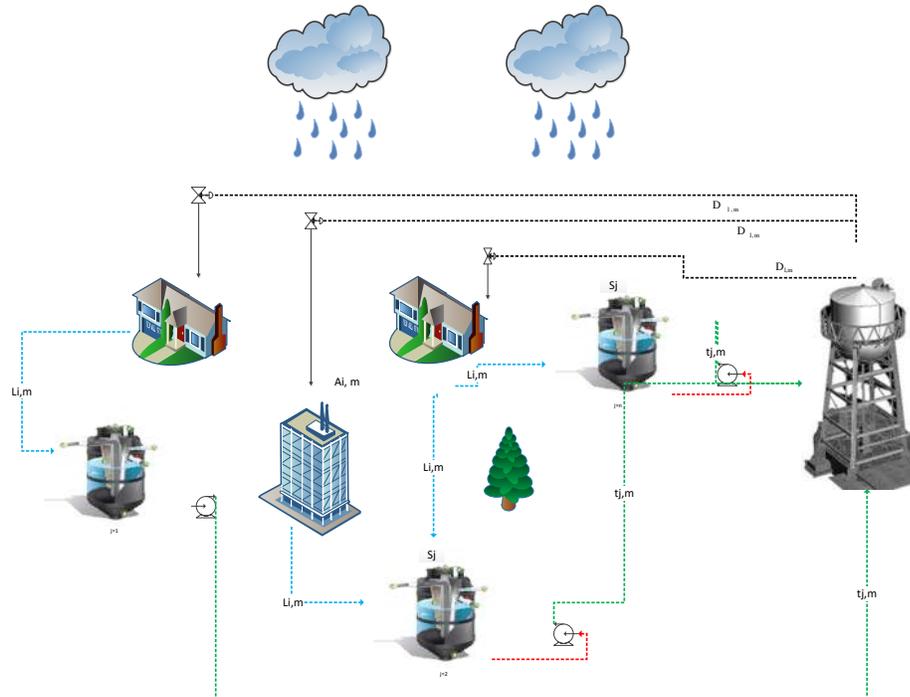


Figura 2. Superestructura del sistema de recolección de agua de lluvia, almacenamiento y distribución en un desarrollo residencial.

4.3 Estrategia de solución

Para resolver cada problema MINLP, el modelo se codificó en el software GAMS Brooke et al. (2013), y los solucionadores DICOPT/CONOPT/CPLEX se utilizan para resolver los problemas MINLP/NLP/LP asociados. Nótese que GAMS es un lenguaje de programación especializado para el desarrollo de modelos de optimización, ya que permite la programación indexada de las ecuaciones involucradas en los modelos de optimización (i.e., permite introducir las ecuaciones en forma matricial). El código generado del modelo en GAMS se muestra en el Apéndice A de la presente Tesis.

Así pues, para identificar la relación entre los objetivos considerados se implementó la siguiente estrategia de solución:

1. Primero se resuelve el problema para el costo mínimo, donde se calcula estocásticamente el dato de la precipitación mediante el uso de la metodología de Montecarlo que ya se describió anteriormente.
2. Después, se resuelve el problema para el peor de los escenarios, donde la cantidad de precipitación es la mínima considerada en el cálculo anterior.
3. Una vez resueltos ambos objetivos se resuelven varios problemas limitados por el costo mínimo y sujetos a límites superiores para el consumo de agua fresca.
4. Finalmente, se construye una curva Pareto que constituye un conjunto de soluciones óptimas que compensan ambos objetivos. Esta curva Pareto puede ser útil para elegir la solución que mejor satisface la necesidad de la toma de decisiones.

4.4 Código GAMS

El problema consta de 1,266 variables continuas, 82 variables binarias y 1,547 restricciones, y la solución para cada uno de los puntos de la curva Pareto fue resuelto en un promedio de 2.23 s de tiempo de CPU en un equipo con un procesador Intel i7 con 8 MB de RAM.

El código expresado en lenguaje de programación GAMS se encuentra en el APÉNDICE A de este trabajo.

4.5. Caso de Estudio.

Para probar la aplicabilidad del enfoque propuesto para optimización del sistema de recolección de aguas de lluvia para uso doméstico en un desarrollo residencial; se eligió un desarrollo residencial en la ciudad de Morelia, México. Este desarrollo residencial corresponde al denominado “*Fraccionamiento Fresnos-Arboledas*”. La ciudad de Morelia

tiene graves problemas para satisfacer la demanda de agua, sobre todo porque esta ciudad tiene una población de 729,279 habitantes (INEGI, 2010), por lo que representan un consumo de 90,168,374 m³/año (CONAGUA, 2011). Para satisfacer estas demandas de agua, Morelia cuenta con una presa y 105 pozos profundos, que se recargan con agua de lluvia.

Se eligió el Fraccionamiento “Fresnos-Arboledas” de la Ciudad de Morelia como zona de estudio por su accesibilidad y porque se considera que tiene casas relativamente homogéneas que facilitarían el estudio. Según el Organismo Operador del Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS), esta colonia se encuentra dentro de una zona residencial, por lo que la tarifa de agua es la más alta (dentro de las zonas de servicio doméstico) (OOAPAS, 2010). Es por lo anterior que surge también el interés de trabajar con esta colonia, ya que al tener la tarifa más alta pudiera representar un primer buen ejemplo de ahorro económico al reducir el consumo de agua de la red.

4.6. Requerimiento diario de agua por persona.

Según la OMS (2010b) cada persona necesita entre 20-50 litros de agua al día, no obstante, expertos regionales indican que el requerimiento diario de agua potable por persona en colonias residenciales es de 115 litros. Los cálculos a continuación se harán tomando el valor máximo recomendado por la OMS (2010b), es decir 50 l/hab/día y se comparará con lo que indican los expertos (115 l/hab/día).

4.6.1. Precipitación

En los últimos años, debido al crecimiento de la población, así como el cambio en los patrones de precipitación, el agua disponible para satisfacer la demanda interna ha disminuido drásticamente, lo que ha representado graves problemas y también ha causado el incremento en el costo de los recursos de agua dulce. Por lo tanto, esto ha provocado un grave problema social que debe ser abordado adecuadamente. Por otra parte, Morelia tiene dos estaciones referidas a la lluvia durante el año, la temporada de lluvias va de Mayo a Octubre, mientras que el resto del año (de Noviembre a Abril) la precipitación disminuye considerablemente (véase la **Tabla 1**). Actualmente, el acuífero con el que cuenta la ciudad tiene un déficit debido a la sobreexplotación, principalmente durante la estación seca.

Mientras que durante la temporada de lluvias el exceso de agua (agua que no se pueden utilizar naturalmente para recargar las reservas naturales) no ha sido bien utilizado porque no hay capacidad de almacenamiento suficiente.

Por lo tanto, el aprovechamiento óptimo del agua de lluvia y su distribución dentro un desarrollo residencial de esta ciudad puede contribuir a satisfacer la demanda de agua, aprovechando el exceso de agua en la época de lluvias y atenuar la situación durante los períodos de sequía. Entonces, el problema consiste en determinar el mejor sistema de recolección de agua de lluvia para satisfacer la demanda de agua en el mencionado desarrollo residencial ubicado en la ciudad de Morelia, México.

La **Tabla 2** muestra el área potencial que se puede utilizar para capturar agua de lluvia para cada sección; cabe mencionar que las secciones 6-9 no son capaces de ser acondicionadas para capturar lluvia. Es posible instalar once tanques como se muestra en la **Figura 3**. Además, es necesario instalar un tanque elevado para almacenar el agua que se distribuye en el desarrollo residencial, y cuyo tamaño debe ser optimizado. La demanda de agua para las nueve áreas durante cada mes del año se muestra en la **Tabla 3**. Cabe señalar que el consumo de agua es mayor durante los meses más calurosos.

Tabla 1. Precipitación promedio en la ciudad de Morelia, México.

Mes	Precipitación (mm)	Mes	Precipitación (mm)
Enero	1.8	Julio	175
Febrero	10	Agosto	163
Marzo	10	Septiembre	119
Abril	10	Octubre	53
Mayo	43	Noviembre	15
Junio	137	Diciembre	13

Tabla 2. Área disponible para la captación de agua de lluvia en el desarrollo residencial del caso de estudio.

Sección (Fuentes)	No. Casas	No. Habitantes	Área de Capitación Disponible (m²)
1	93	372	29.760
2	94	376	30.080
3	79	316	25.280
4	84	336	26.880
5	111	444	35.520
6	-	-	-
7	-	-	-
8	-	-	-
9	-	-	-

Tabla 3. Demanda de agua para cada sección por día durante todo el año en m³.

Section-Fuentes	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul.	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
1	17	17	14	14	16	16	18	18	15	15	13	13
2	17	17	14	14	16	16	18	18	15	15	13	13
3	14	14	12	12	14	14	15	15	13	13	11	11
4	15	15	13	13	14	14	16	16	14	14	12	12
5	20	20	17	17	19	19	21	21	18	18	16	16
6	0	0	0.5	0.5	1	1	1	1	0.5	0.5	0	0
7	0	0	0.5	0.5	1	1	1	1	0.5	0.5	0	0
8	0	0	0.5	0.5	1	1	1	1	0.5	0.5	0	0
9	0	0	0.5	0.5	1	1	1	1	0.5	0.5	0	0



Figura 3. Esquema para el caso de estudio.

4.6.2. Superficie de captura

Para obtener la superficie de captura con la que se trabajaría se consiguió un plano de la colonia con la superficie del terreno y de las construcciones (Dirección de Catastro, S/A). Posteriormente se hizo una verificación cuadra por cuadra en la colonia para eliminar:

- Terrenos sin construcción. Eliminados porque este estudio se enfocó en la superficie ya construida para aprovecharla como superficie de captura, de esta manera, los terrenos sin construcción no eran de utilidad.
- Negocios: Se eliminaron todos los negocios porque este estudio va dirigido a la cobertura de demanda de agua de las viviendas; un negocio requiere de más agua a comparación de una familia.

- Edificios: Éstos fueron eliminados porque en ellos vive más de una familia. Esto significa que al comparar entre casas y edificios la relación superficie de captura vs número de personas que habitan cada uno, la diferencia es grande, siendo mayor para los segundos.

Una vez eliminados los terrenos e inmuebles que no se tomarían en cuenta, se obtuvo el número de viviendas totales para el estudio (1190 casas) y utilizando únicamente la superficie construida de cada terreno, se calculó el promedio de las superficies, y de esta manera se obtuvo la superficie de captura promedio para la colonia. De igual forma se obtuvo la superficie de captura promedio del lote utilizando toda la superficie del terreno y no únicamente lo construido, esto con el fin de conocer la cantidad de agua pluvial que puede recolectarse si se quisiera extender el sistema a todo el lote. Lo anterior se muestra en la **Tabla 4**.

Tabla 4: Superficie de captura por construcción y por lote para el Fraccionamiento Fresnos Arboledas

SUPERFICIE DE CAPTURA					
		Superficie de Construcción (m ²)		Superficie de Lote (m ²)	
Número de casas	TOTAL	PROMEDIO	TOTAL	PROMEDIO	
1190	149149	125	221599	186	

4.6.3. Agua pluvial obtenida

Con el promedio de la superficie de construcción, el promedio de precipitación total anual y utilizando la relación 1 mm de lluvia por 1 m² de superficie = 1 l de agua, se obtuvo el agua total anual por casa que se puede colectar (94,363 l/año). De la misma manera se obtuvo el agua total anual por terreno que puede colectarse (140,411 l/año). En la **Tabla 5** se observan los resultados del cálculo anterior.

Tabla 5: Agua pluvial recolectada anual por construcción y por lote

LLUVIA (mm/año)	SUPERFICIE (m ²)		AGUA OBTENIDA POR CASA (l/año)	
	LOTE	CONSTRUCCIÓN.	LOTE	CONSTRUCCIÓN
754.9	186	125	140,411	94,363

4.7.Resultados del caso de estudio.

En esta sección se explicará el uso y aplicación del modelo matemático como herramienta en la simulación de precipitación mensual. Una vez estimados los parámetros del modelo se procedió a la generación de series sintéticas de 100 años de precipitación mensual, poniendo a funcionar el modelo en su globalidad. Se realizaron dos tipos de simulaciones. Todas ellas tienen en común el haber usado la distribución de Gauss (también conocida como distribución normal) para señalar las ocurrencias de eventos y la duración de los episodios.

Una vez realizada la simulación numérica se probó la capacidad del modelo para reproducir la probabilidad de lluvia más baja es decir el peor de los escenarios en donde la cantidad de lluvia es la mínima.

A continuación se muestran las gráficas en las que aparecen los valores de los estadísticos calculados a partir de las series simuladas para diez años posteriores al actual.

En la **Figura 4** se representan los datos obtenidos de la simulación del modelo matemático, de acuerdo a esto, la línea naranja representa los 100 escenarios derivados de la minimización del Costo Total Anual del sistema, en donde para cada escenario tendremos cierta probabilidad de precipitación a la cual le corresponde un costo medio de TAC del sistema.

Simultáneamente, en la minimización de la predicción en el peor de los escenarios, tenemos que los costos asociados a la instalación, distribución y mantenimiento del sistema, incrementan cuando la cantidad de lluvia disminuye, debido a que en este caso el consumo de agua fresca incrementa, esto se representa con la línea azul en la **Figura 4**. Dentro de la misma figura, podemos interpretar que al 35% de probabilidad el costo asociado al TAC del sistema en la minimización del mismo sea aproximadamente 25200 USD, en contraparte, al minimizar el peor de los escenarios, en la misma probabilidad, el costo

asociado al sistema incrementa a 28000 USD esto en porcentaje representa un incremento del 11% en el costo del sistema y la probabilidad de la misma no es muy alta, por lo que en la ayuda de toma de decisiones este sería un buen escenario para hacer la instalación.

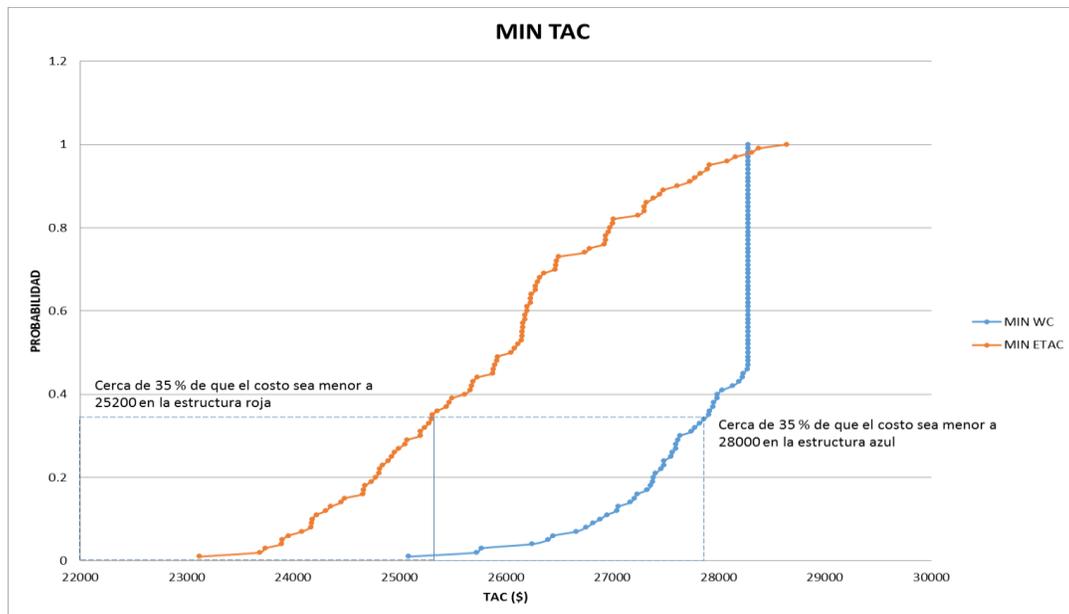


Figura 4. Representación de la probabilidad en la minimización del TAC y minimización en el peor de los escenarios.

De la misma manera, en la minimización del consumo de agua fresca, tenemos que a la probabilidad del 35% el costo asociado al consumo de agua proveniente del servicio municipal, el costo de ésta sería aproximadamente de 15000 USD y en el peor de los escenarios en la misma probabilidad incrementaría en un 26.6% del precio en el consumo de agua. Como se muestra en la **Figura 5**.

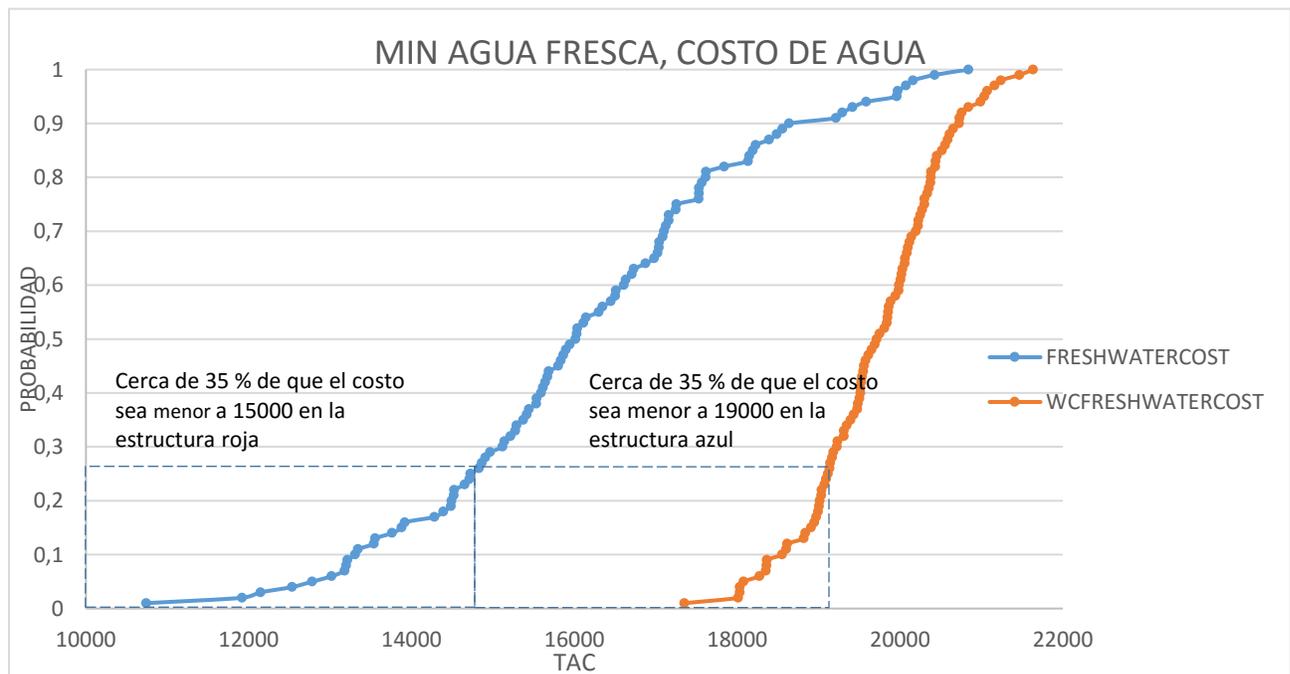


Figura 5. Representación de la probabilidad en la minimización del CONSUMO DE AGUA FRESCA y minimización en el peor de los escenarios.

Para hacer un análisis más detallado de los datos obtenidos, se ha hecho además un análisis de sensibilidad de los datos de precipitación del sistema, por lo que la **Figura 6** representa lo siguiente:

- Al aumentar la desviación estándar de los datos, vemos que el costo del sistema incrementa significativamente tanto para el TAC del sistema como para el TAC en el peor de los escenarios
- Debido a la volatilidad que representa el incrementar la desviación estándar de los datos en el caso de la minimización del TAC en el peor de los escenarios (representada por la línea amarilla) la interpretación de los datos arrojados nos dice que en este caso no instalemos sistema de recolección y nos apeguemos a únicamente consumir agua fresca.



Figura 6. Representación de la probabilidad en la minimización del TAC y minimización en el peor de los escenarios comparando con un incremento en la Desviación Estándar.

4.8. Ahorro

La instalación de un sistema de recolección de agua pluvial en las casas, busca crear una conciencia en los habitantes referente al consumo de agua. El uso de estos sistemas corresponde a un abastecimiento del recurso in situ que permite la disminución del gasto energético por bombeo del recurso y de los insumos para la potabilización. También se pretendió un ahorro económico para las viviendas que implementaran estos sistemas; sin embargo, esto no pudo ser reflejado ya que según la estructura tarifaria que maneja OOAPAS (2010) es obligatorio pagar la tarifa correspondiente al rango comprendido entre 0-8 m³ de consumo. Esto quiere decir que, aunque sólo se utilicen por ejemplo 1,000 litros al mes (1 m³), el consumidor está obligado a pagar el precio que comprende dicho rango, estos son \$158.21, independientemente de lo consumido. A partir del 9º m³, se pagaría una tarifa por cada m³ de acuerdo al rango de consumo en que se encuentre, precio que no sobrepasa los \$18/m³ como puede observarse en la **Tabla 6**.

Tabla 6: Estructura tarifaria para uso doméstico en zona residencial (OOAPAS, 2010)

Rango de consumo en m ³		Tarifa por m ³ en zona residencial (\$)
Desde	Hasta	
0	8	158.21 ⁶
9	30	16.36
31	45	16.52
46	60	16.69
61	75	17.35
76	90	17.35
91	En adelante	17.35

Teniendo en cuenta que el campo de la predicción cuantitativa de la precipitación en escalas de interés está prácticamente en sus inicios, la información que ofrece este programa

cobra gran importancia y presenta grandes perspectivas para su uso en esta clase de aplicaciones como lo es el ahorro de agua en un desarrollo residencial.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

En este proyecto se ha presentado un modelo de programación mixto entero no lineal para el diseño óptimo de un sistema de recolección de aguas de pluvial para satisfacer las demandas de agua en un desarrollo residencial. El modelo presentado propone el acondicionamiento de áreas disponibles para la recolección de agua de lluvia y la instalación de dispositivos de almacenamiento para el uso de esta agua cuando sea necesario en el desarrollo residencial. El modelo propuesto considera el costo de capital asociado al área de recolección, almacenamiento, líneas de tubería y bombas, y también considera los costos asociados a los recursos de agua fresca y los costos de operación para el tratamiento y bombeo. La optimización multi-objetivo del modelo es simultánea; y está formulada para minimizar el costo total anual y el costo total anual en el peor de los escenarios, el cual se da cuando se prevé la menos cantidad de precipitación.

Se presenta la metodología de Montecarlo para el cálculo de la precipitación, utilizando así distribuciones estocásticas para la predicción de la precipitación en los futuros años.

Un caso de estudio de un desarrollo residencial de la ciudad de Morelia en México fue resuelto. En este caso, los incentivos posibles de la aplicación de la estrategia propuesta se han demostrado, con soluciones atractivas tanto en el ámbito de lo económico como de lo ambiental. Con la cantidad de agua por habitante al día que se recolecta mediante un sistema de recolección de agua, es decir los 65 l/hab/día que se tienen, se cubre el 130% del requerimiento máximo recomendado por la OMS; y el 57% del requerimiento señalado por los expertos. Si se aprovechara toda la superficie del lote, se podrían obtener 96 l/hab/día, cubriendo así el 192% del requerimiento señalado por la OMS y 83% del señalado por los expertos. Diferentes configuraciones de alternativas fueron obtenidas, mostrando la flexibilidad del modelo para tener en cuenta las limitaciones que recompensan la cantidad de agua fresca disponible o el presupuesto máximo de inversión, de esta manera el proceso de planificación puede realizarse de manera informada.

Por último, el enfoque propuesto es de carácter general y esto se puede aplicar a diferentes casos de estudio y en diferentes lugares.

Como recomendación general para la aplicación del modelo en otra zona geográfica se debe tener en cuenta que los datos necesarios fueron recabados de fuentes especializadas

como lo fueron los datos de precipitación anual en la región; por otra parte, los datos que dependen del caso de estudio como la demanda de agua también fueron provistos por la Comisión Nacional del Agua y corroborados mediante encuesta a varios vecinos de la residencia.

De la misma manera, en la incorporación de la incertidumbre en los datos del modelo para obtener soluciones del problema de manera estocástica nos permitió predecir de mejor manera lo que puede suceder en un futuro. Así también el haber probado con varias metodologías de distribución como fueron Montecarlo y Movimiento Browniano, pudimos darnos cuenta de que los datos de precipitación no se acoplan a la metodología del segundo debido a que había demasiadas fluctuaciones en la obtención de datos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atilhan S, Bin-Mahfouz AS, Batchelor B, Linke P, Abdel-Wahab A, Nápoles-Rivera F, Jiménez-Gutierrez A, El-Halwagi, MM. A systems-integration approach to the optimization of macroscopic water desalination and distribution networks: a general framework applied to Qatar's water resources. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2012;14:161-71.
- Bocanegra-Martínez A., Ponce-Ortega J.M., Nápoles-Rivera F., Serna-González M., Castro-Montoya A.J., El-Halwagi M.M. Optimal design of rainwater collecting systems for domestic use into a residential development. *Resources, Conservation and Recycling*. 2014; Pp. 3,4
- Chico-Fernández J, Arregui-De-la-Cruz F., Cobacho-Jordán R. Modelo estocástico del consumo de agua caliente y fría de un hotel. Universidad de Valencia, [Tesis doctoral]. Septiembre 2012.
- CONAGUA, 2011. National Council of Water, Statistic of the Water in México, Chapter 3 Appendix. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/Capitulo3Usosdelagua.zip>. Acceso en Agosto de 2013.
- Espinoza-Rodríguez C.A., Predicción a corto plazo de la demanda de agua urbana en áreas densamente pobladas [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València.2010.
- Imteaz MA, Shanableh A, Rahman A, Ahsan A. Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne, Australia. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011;55:1022-9.
- INEGI (2010). National Census of Population and Housing. National Institute of Statistics and Geography. Basic questionnaire. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e/416>. Acceso en Agosto de 2012.
- Khastagir A, Jayasuriya N. Optimal sizing of rain water tanks for domestic water conservation. *Journal of Hydrology*. 2010;381:181-8.

Mascareñas J., Procesos estocásticos: el proceso de Wiener, 2013. Pp. 1-2.

Nápoles-Rivera F, Serna-González M, El-Halwagi MM, Ponce-Ortega JM. Sustainable water management for macroscopic systems. *Journal of Cleaner Production*. 2013;47:102-17.

Rozos E, Makropoulos C, Butler D. Design robustness of local water-recycling schemes. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2010;136:531-8.

Sixto-Rios, Modelos y método Montecarlo en la investigación operativa industrial y militar, *Trabajos de Estadística y de Investigación Operativa*, Volumen 8. Pp 79-90.

Toral R. Últimos Avances en el Movimiento Browniano: Orden A Partir Del Desorden. Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA). CSIC-Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca, Spain. 2012.

APÉNDICE

A.1. Optimización de TAC

Código en el lenguaje GAMS del modelo para el diseño óptimo de sistemas de recolección de aguas pluviales para uso doméstico en un desarrollo residencial.

\$TITLE RAIN WATER STORAGE

OPTION OPTCR=0.01;

OPTION OPTCA=0.001;

OPTION ITERLIM=1000000;

OPTION RESLIM= 100000;

\$ONEMPTY;

SETS

I FUENTE DE CAPTACION DE AGUA /1*5/

J ALMACENES /1*11/

L USO DEL AGUA /1*9/

M FRONTERAS DE MESES /1*13/

MM(M) MESES /2*13/

ESC ESCENARIOS /1*100/

;

*DATOS

DEL

MODELO*****

PARAMETERS

ALPHA EXPONENTE DE ECONOMIA DE ESCALA /1/

BETHA EXPONENTE DE ECONOMIA DE ESCALA /1/

DELTA EXPONENTE DE ECONOMIA DE ESCALA /1/

CFET COSTO FIJO DE TANQUE ELEVADO /100/

COSTTR COSTO DE TRATAMIENTO /0.1/

CVET COSTO VARIABLE DE TANQUE ELEVADO /5/

KF VARIABLE PARA INTRODUCIR COSTO ANUAL (DE MESES A AÑOS) /0.1/

*

AMX(I) AREA MAXIMA DE CAPTACION I M**2

/
1 29760
2 30080
3 25280
4 26880
5 35520/,
*

CFCAPT (I) COSTO FIJO DE CAPTACION PARA CADA I

/
1 100
2 100
3 100
4 100
5 100/,
*

CFPIPO(J) COSTO FIJO DE TUBERIA DE SALIDA AL ALMACEN PARA CADA J

/
1 10
2 15
3 17
4 18
5 16
6 19
7 21
8 20
9 23
10 18
11 19/,
*

CFSTG(J) COSTO FIJO DE ALMACENAMIENTO PARA CADA J

/
1 200
2 200
3 100
4 200

5 200
6 100
7 200
8 100
9 150
10 200
11 200/

*

COSTFRESH(M) COSTO DE AGUA DE SERVICIO MUNICIPAL POR CADA PERIODO M
POR M**3

/

2 1.6
3 1.75
4 1.8
5 2.0
6 1.0
7 1.0
8 0.7
9 0.6
10 0.8
11 1.0
12 1.2
13 1.3/

*

COSTPUMPO(J) COSTO DE BOMBEO DESDE EL ALMACEN AL TANQUE ELEVADO
PARA CADA J

/

1 0.01
2 0.015
3 0.03
4 0.035
5 0.04
6 0.055
7 0.06
8 0.05

9 0.075
10 0.08
11 0.09/,
*

CVCAPT(I) COSTO VARIABLE DE CAPTACION PARA CADA I

/

1 0.8
2 0.85
3 0.91
4 0.91
5 0.9/,
*

CVPIPO(J) COSTO VARIABLE DE TUBIERIA DE SALIDA AL ALMACEN PARA CADA

J

/

1 0.26
2 0.39
3 0.44
4 0.47
5 0.42
6 0.50
7 0.55
8 0.52
9 0.6
10 0.47
11 0.5/,
*

CVSTG(J) COSTO VARIABLE DE ALMACENAMIENTO PARA CADA J

/

1 0.22
2 0.33
3 0.37
4 0.39
5 0.35
6 0.41

7 0.46
8 0.43
9 0.50
10 0.39
11 0.41/
*

P(M) PRECIPITACION MENSUAL EN M

/
2 0.0022
3 0.0668
4 0.0086
5 0.0009
6 0.017
7 0.1426
8 0.186
9 0.1925
10 0.081
11 0.0254
12 0.0284
13 0.0058/

dp(m) desviacion estandar de precipitacion mensual

*NOTA: $\times 10^{-2}$ (16/mayo/2015)

/
2 0.0017
3 0.0050
4 0.0007
5 0.0014
6 0.0037
7 0.0060
8 0.0125
9 0.0045
10 0.0041
11 0.0047
12 0.0014

13 0.0002

/

*P_S(ESC,M)

*/

*/

;

*P_S(ESC,m)=P(M);

%%%%%%%%%%%%%%PRECIPITACION

MENSUAL POR ESCENARIOS%%%%%%%%%

*\$ontext

TABLE P_S(ESC,M) PRECIPITACION MENSUAL EN M

\$call=xls2gms

I=C:\Users\officedepot\Desktop\distributionuniforme.xls

O=C:\Users\officedepot\Desktop\distributionuniforme.INC R=Hoja4!B24:N124

\$include C:\Users\officedepot\Desktop\distributionuniforme.INC

;

*P_S(ESC,M)=P_S(ESC,M)/1000;

*\$offtext

*parameter

*P_S(esc,m);

%%%%%%%%
 %%%%%%%%%

;

PARAMETERS

FMX FLUJO MAXIMO POSIBLE EN TUBERIAS,

GMX FLUJO MAXIMO POSIBLE EN TUBERIAS,

STGMX(J) MAXIMA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO PARA ALMACENES PARA
 CADA J

/

1 1000

2 700

3 1000

4 900

5 1100

6 1000

7 900

8 800

9 850

10 950

11 1500/

;

*P(M)=P(M)*10;

*COSTFRESH(M)=1.0;

*

TABLE CFPIPI(I,J) COSTO FIJO DE TUBERIA DE ENTRADA AL ALMACEN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	6.5	7	8	8.5	3	4	4.5	3	6.0	5.5	7
2	7.7	7.5	8	8.5	3.9	5.2	5.8	3.9	7.7	5.0	6.7
3	6.0	5.9	6.3	6.7	5.0	6.7	7.4	7.9	6.7	5.5	5.2
4	4.5	4.0	5.0	5.5	6.0	6.7	7.3	8.0	8.9	8.5	7.9
5	5.8	5.5	4.3	4.0	7.5	8.0	8.8	7.7	7.8	7.0	6.7;

TABLE COSTPUMPI(I,J) COSTO DE BOMBEO A CADA ALMACEN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.07	0.08	0.09	0.10	0.03	0.04	0.05	0.03	0.07	0.06	0.08
2	0.09	0.08	0.09	0.10	0.04	0.06	0.07	0.04	0.09	0.06	0.08
3	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08	0.06	0.06
4	0.05	0.04	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.09
5	0.07	0.06	0.05	0.04	0.08	0.09	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08

;

TABLE CVPIPI(I,J) COSTO VARIABLE DE TUBIERIA DE ENTRADA AL ALMACEN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.51	0.55	0.63	0.67	0.24	0.31	0.35	0.24	0.47	0.43	0.55
2	0.61	0.59	0.63	0.67	0.30	0.41	0.46	0.30	0.61	0.39	0.53
3	0.47	0.46	0.50	0.53	0.39	0.52	0.58	0.62	0.53	0.43	0.41
4	0.35	0.31	0.39	0.43	0.47	0.53	0.57	0.63	0.70	0.67	0.62
5	0.46	0.43	0.34	0.31	0.59	0.63	0.69	0.61	0.61	0.55	0.53

;

TABLE D(L,M) M3 REQUIERED WATER FOR EACH SINK IN EACH PERIOD

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	300	300	300	300	300	200	200	200	200	200	400	400
3	600	500	600	600	500	500	600	400	400	400	200	200
4	150	200	250	200	150	150	200	200	250	300	350	200
5	200	200	350	400	250	250	250	200	200	200	200	250
6	300	300	400	350	350	350	350	400	250	280	300	290
7	600	500	600	600	500	500	600	400	400	400	200	200
8	150	200	250	200	150	150	200	200	250	300	350	200
9	200	200	350	400	250	250	250	200	200	200	200	250;

*D(L,M) $\text{ord}(l) \text{ eq } 1=100*4*200/1000;$

*display D;

*

FMX=SMAX((L,M),D(L,M))*100;

GMX=SMAX((M,ESC),P_S(ESC,M))*SMAX(I,AMX(I));

VARIABLES

TAC(ESC) TOTAL ANNUAL COST
FRESHTOTAL AGUA FRESCA TOTAL CONSUMIDA

ETAC EXPECTED TOTAL ANNUAL COST

WORSTCASE WORST CASE;

POSITIVE VARIABLES

A(I) AREA DE CAPTACION USADA DE LA INSTACION I

F(I,J,M,ESC) FLUJO DE ALIMENTACION A CADA ALMACEN

FCAP(I,J) FLUJO MAXIMO EN LA TUBERIA PARA DETERMINAR LOS COSTOS DE CAPITAL

FFRESH(M,ESC) AGUA DEL SERVICIO MUNICIPAL PARA CADA PERIODO M

FMAY(I,M,ESC) FLUJO AGUA FRESCA RECUPERADA DE I EN EL PERIODO M

G(J,M,ESC) AGUA DISTRIBUIDA DESDE EL ALMACEN J PARA CADA PERIODO M

GCAP(J) FLUJO MAXIMO EN LA TUBERIA PARA DETERMINAR LOS COSTOS DE CAPITAL

PUMPCOST COSTO DE BOMBEO

S(J,M,ESC) TAMAÑO DEL TANQUE J EN M

SMX(J) CAPACIDAD MAXIMA DE ALMACENAMIENTO EN LOS ALMACENES

T(M,ESC) TAMAÑO DEL TANQUE ELEVADO QUE DEPENDE DEL AGUA CAPTADA EN EL PERIODO M

TMX TAMANO MAXIMO DEL TANQUE ELEVADO PARA ALACENAR AGUA

TRCOST(ESC) COSTO DE TRATAMIENTO DEL AGUA COLECTADA

STGCOSTT COSTO DE TANQUE ELEVADO

PIPCOST COSTO DE TUBERIA

STGCOST COSTO DE ALMACENAMIENTO

CAPTCOST COSTO DE CAPTACION

FRESHCOST COSTO DE ALGUA PROVENIENTE DE SERVICIO MUNICIPAL

;

BINARY VARIABLES

X(J) VARIABLE BINARIA PARA LA EXISTENCIA DE TUBERIA A LA SALIDA DEL ALMACEN
YCAPT(I) VARIABLE BINARIA PARA LA EXISTENCIA DEL AREA DE CAPTACION I
YSTG(J) VARIABLE BINARIA PARA LA EXISTENCIA DEL ALMACEN
Z(I,J) VARIABLE BINARIA PARA LA EXISTENCIA DE TUBERIA A LA ENTRADA DEL ALMACEN

;

EQUATIONS

EC1(I,M,ESC) ECUACION PARA LA PRECIPITACION
EC2(I,M,ESC) DISTRIBUCION DEL AGUA RECOLECTADA
EC3(J,MM,ESC) BALANCE EN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO
EC3A(J,ESC) RESTRICCION TIEMPO CERO IGUAL AL DOCE
EC4(MM,ESC) BALANCE EN TANQUE ELEVADO
EC4A(ESC) RESTRICCION TIEMPO CERO IGUAL AL DOCE
EC5(I) AREA MÁXIMA DE CAPTACION
EC5A(I) AREA MÁXIMA DE CAPTACION
EC6(J) INSTALACIÓN DE TANQUE DE ALMACENAMIENTO
EC7(I,J) SEGMENTO DE TUBERÍA A LA ENTRADA DEL T. DE ALM.
EC8(J) SEGMENTO DE TUBERIA A LA SALIDA DEL T. DE ALM.
EC9(J,M,ESC) CAPACIDAD DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO
EC9A(J,M,ESC) CAPACIDAD DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO EN FUNCION DE LA ALIMENTACION
EC10(M,ESC) CAPACIDAD DEL TANQUE ELEVADO
EC10A(M,ESC) CAPACIDAD DEL TANQUE ELEVADO EN FUNCION DE LA ALIMENTACION
EC11(I,J,M,ESC) MAXIMO NUMERO DE CORRIENTES DE ALIMENTACION A UN ALMACENADOR
EC12(J,M,ESC) MAXIMO NUM. DE CORRIENTES DE SALIDA DEL ALMACENADOR
EC13 COSTO DE SISTEMA DE CAPTACION
EC14 COSTO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO
EC15 COSTO DE TANQUE ELEVADO
EC16 COSTO DE TUBERIA
EC17(ESC) COSTO DE TRATAMIENTO DE AGUA
EC18(ESC) COSTO DE BOMBEO

EC19(ESC) COSTO DE AGUA PROVENIENTE DE SERVICIO PUBLICO
 EC19A(ESC) AGUA FRESCA TOTAL USADA
 EC20(ESC) FUNCION OBJETIVO

E21 DEFINICION DE EL TAC EXPECTED
 E22(ESC) WORST CASE FOR THE TAC
 E23

;

 *****MODEL*****
 **

EC1(I,M,ESC).. FMAY(I,M,ESC)=E= P_S(ESC,M)*A(I);
 EC2(I,M,ESC).. FMAY(I,M,ESC)=E= SUM((J),F(I,J,M,ESC));
 EC3(J,MM,ESC).. S(J,MM,ESC)=E= S(J,MM-1,ESC)+ SUM((I),F(I,J,MM,ESC))-
 G(J,MM,ESC);

%%%%%%%%%

EC3A(J,ESC).. S(J,'1',ESC)=E=S(J,'13',ESC);
 EC4(MM,ESC).. T(MM,ESC)=E=T(MM-
 1,ESC)+SUM((J),G(J,MM,ESC))+FFRESH(MM,ESC)-SUM((L),D(L,MM));
 EC4A(ESC).. T('1',ESC)=E=T('13',ESC);
 EC5(I).. A(I)=L=AMX(I)*YCAPT(I);
 EC5A(I).. A(I)=G=0.0005*AMX(I)*YCAPT(I);
 EC6(J).. SMX(J)=L=STGMX(J)*YSTG(J);
 EC7(I,J).. FCAP(I,J)=L=FMX*Z(I,J);
 EC8(J).. GCAP(J)=L=GMX*X(J);
 EC9(J,M,ESC).. S(J,M,ESC)=L=SMX(J);
 EC9A(J,M,ESC).. sum(I,F(I,J,M,ESC))=L=SMX(J);
 EC10(M,ESC).. T(M,ESC)=L=TMX;
 EC10A(M,ESC).. FFRESH(M,ESC)=L=TMX;
 EC11(I,J,M,ESC).. F(I,J,M,ESC)=L=FCAP(I,J);

EC12(J,M,ESC).. $G(J,M,ESC)=L=GCAP(J);$
 EC13.. $CAPTCOST=E=SUM((I),CFCAPT(I)*YCAPT(I)+CVCAPT(I)*(A(I)));$
 EC14.. $STGCOST=E=SUM((J),CFSTG(J)*YSTG(J)+CVSTG(J)*(SMX(J)));$
 EC15.. $STGCOSTT=E=CFET+CVET*(TMX);$
 EC16..
 $PIPCOST=E=SUM((I,J),CFPIPI(I,J)*Z(I,J)+CVPIPI(I,J)*(FCAP(I,J)))+SUM((J),CFPIPO(J)*X(J)+CVPIPO(J)*(GCAP(J)));$
 EC17(ESC).. $TRCOST(ESC)=E=SUM((I,J,M),COSTTR*F(I,J,M,ESC));$
 EC18(ESC)..
 $PUMPCOST(ESC)=E=SUM((I,J,M),COSTPUMPI(I,J)*F(I,J,M,ESC))+SUM((J,M),COSTPUMPO(J)*G(J,M,ESC));$
 EC19(ESC).. $FRESHCOST(ESC)=E=SUM((M),COSTFRESH(M)*FFRESH(M,ESC));$
 EC19A(ESC).. $FRESHTOTAL(ESC)=E=SUM(M,FFRESH(M,ESC));$
 EC20(ESC)..
 $TAC(ESC)=E=KF*(PIPCOST+STGCOST+CAPTCOST+STGCOSTT)+(PUMPCOST(ESC)+TRCOST(ESC)+FRESHCOST(ESC));$

%%%%%%%%%%%%%%%
 %%%%%%%%%%%%%%%
 %%%%%%%%%%%%%%%
 %%%%%%%%%%%%%%%

E21.. $ETAC=E=SUM((ESC),TAC(ESC)*(1/CARD(ESC)));$
 E22(ESC).. $WORSTCASE=G=TAC(ESC);$
 E23.. $SUM(I,YCAPT(I))=G=1;$

*

OPTION MIP = CPLEX;
 OPTION LP = CPLEX;
 OPTION NLP = CONOPT;
 OPTION MINLP =DICOPT;
 OPTION SYSOUT=ON;
 OPTION LIMROW=100;

OPTION LIMCOL=100;

*PRUEBAS*****

**

*FMAY.FX(I,M)=AMX(I)*P(M)*0.5;

*****PARA

EL

PARETO*****

*FRESHTOTAL.UP=6000;

*P_S(ESC,m)=P(M);

MODEL WATER /ALL/;

*A.LO(I)=0.0001;

*P_S(ESC,m)=P(M);

*****curva de tacs
modificado

FRESHTOTAL.UP(M) = 100000;

SOLVE WATER USING MIP MINIMIZING etac;

*SOLVE WATER USING MIP MINIMIZING etac;

PARAMETERS

ANPIPCOST COSTO CAPITAL ANUALIZADO PIPES

ANSTGCOST COSTO CAPITAL ANUALIZADO STORAGE

ANCAPTCOST COSTO CAPITAL ANUALIZADO CAPTACION

ANSTGCOSTT COSTO CAPITAL ANUALIZADO TANQUE AGUA FRESCA

ANPUMPCOST(ESC) COSTO ANUALIZADO DE BOMBEO

ANTRCOST(ESC) COSTO ANUALIZADO DE TRATAMIENTO

ANFRESHCOST(ESC) COSTO ANUALIZADO DE AGUA FRESCA

HARVESTINTOTAL(ESC) FLUJO TOTAL DE AGUA COLECTADA,

WRECICLED(ESC) FLUJO DE AGUA RECIRCULADA;

ANPIPCOST=KF*(PIPCOST.L);

ANSTGCOST=KF*(STGCOST.L);

ANCAPTCOST=KF*(CAPTCOST.L);

ANSTGCOSTT=KF*STGCOSTT.L;

ANPUMPCOST(ESC)=PUMPCOST.L(ESC);

ANTRCOST(ESC)=TRCOST.L(ESC);

ANFRESHCOST(ESC)=FRESHCOST.L(ESC);

HARVESTINTOTAL(ESC)=SUM((I,M),FMAY.L(I,M,ESC));

WRECICLED(ESC)=SUM((J,M),G.L(J,M,ESC));

DISPLAY

ANPIPCOST,ANSTGCOST,ANCAPTCOST,ANPUMPCOST,ANSTGCOSTT,ANTRCOST,ANFRESHCOST,TAC.L,HARVESTINTOTAL,WRECICLED,P_S;

EXECUTE_UNLOAD 'precnorm11', TAC, G, F, FMAY, FFRESH, A;

execute '=gdx2xls precnorm11.gdx';

A2. Optimización en el peor de los escenarios

\$TITLE RAIN WATER STORAGE

OPTION OPTCR=0.01;

OPTION OPTCA=0.001;

OPTION ITERLIM=1000000;

OPTION RESLIM= 100000;

\$ONEMPTY;

SETS

I FUENTE DE CAPTACION DE AGUA /1*5/
J ALMACENES /1*11/
L USO DEL AGUA /1*9/
M FRONTERAS DE MESES /1*13/
MM(M) MESES /2*13/
ESC ESCENARIOS /1*100/

;

*DATOS DEL

MODELO*****

PARAMETERS

ALPHA EXPONENTE DE ECONOMIA DE ESCALA /1/
BETHA EXPONENTE DE ECONOMIA DE ESCALA /1/
DELTA EXPONENTE DE ECONOMIA DE ESCALA /1/
CFET COSTO FIJO DE TANQUE ELEVADO /100/
COSTTR COSTO DE TRATAMIENTO /0.1/
CVET COSTO VARIABLE DE TANQUE ELEVADO /5/
KF VARIABLE PARA INTRODUCIR COSTO ANUAL (DE MESES A AÑOS)
/0.1/

*

AMX(I) AREA MAXIMA DE CAPTACION I M**2

/
1 29760
2 30080
3 25280
4 26880
5 35520/,
*

CFCAPT (I) COSTO FIJO DE CAPTACION PARA CADA I

/
1 100
2 100
3 100
4 100
5 100/,
*

CFPIPO(J) COSTO FIJO DE TUBERIA DE SALIDA AL ALMACEN PARA CADA J

/
1 10
2 15
3 17
4 18
5 16
6 19
7 21
8 20
9 23
10 18
11 19/,
*

CFSTG(J) COSTO FIJO DE ALMACENAMIENTO PARA CADA J

/
1 200

2	200
3	100
4	200
5	200
6	100
7	200
8	100
9	150
10	200
11	200/,

*

COSTFRESH(M) COSTO DE AGUA DE SERVICIO MUNICIPAL POR CADA PERIODO M POR M**3

/

2	1.6
3	1.75
4	1.8
5	2.0
6	1.0
7	1.0
8	0.7
9	0.6
10	0.8
11	1.0
12	1.2
13	1.3/,

*

COSTPUMPO(J) COSTO DE BOMBEO DESDE EL ALMACEN AL TANQUE ELEVADO PARA CADA J

/

1	0.01
2	0.015

3	0.03
4	0.035
5	0.04
6	0.055
7	0.06
8	0.05
9	0.075
10	0.08
11	0.09/

*

CVCAPT(I) COSTO VARIABLE DE CAPTACION PARA CADA I

/

1	0.8
2	0.85
3	0.91
4	0.91
5	0.9/

*

CVPIPO(J) COSTO VARIABLE DE TUBIERIA DE SALIDA AL ALMACEN PARA CADA J

/

1	0.26
2	0.39
3	0.44
4	0.47
5	0.42
6	0.50
7	0.55
8	0.52
9	0.6
10	0.47
11	0.5/

*

CVSTG(J) COSTO VARIABLE DE ALMACENAMIENTO PARA CADA J

/

1	0.22
2	0.33
3	0.37
4	0.39
5	0.35
6	0.41
7	0.46
8	0.43
9	0.50
10	0.39
11	0.41/

*

P(M) PRECIPITACION MENSUAL EN M

/

2	0.0022
3	0.0668
4	0.0086
5	0.0009
6	0.017
7	0.1426
8	0.186
9	0.1925
10	0.081
11	0.0254
12	0.0284
13	0.0058/

dp(m) desviacion estandar de precipitacion mensual

*NOTA: $X1 \times 10^{-2}$ (16/mayo/2015)

/

2	0.0017
3	0.0050
4	0.0007
5	0.0014
6	0.0037
7	0.0060
8	0.0125
9	0.0045
10	0.0041
11	0.0047
12	0.0014
13	0.0002

/

*P_S(ESC,M)

*/

*/

;

*P_S(ESC,m)=P(M);

%%%%%%%%%%%%%%PRECIPITACION
MENSUAL POR ESCENARIOS%%%%%%%%%

*\$ontext

TABLE P_S(ESC,M) PRECIPITACION MENSUAL EN M

\$call=xls2gms I=C:\Users\officedepot\Desktop\distributionuniforme.xls
O=C:\Users\officedepot\Desktop\distributionuniforme.INC R=Hoja4!B24:N124
\$include C:\Users\officedepot\Desktop\distributionuniforme.INC

;
*P_S(ESC,M)=P_S(ESC,M)/1000;

*\$offtext

*parameter

*P_S(esc,m);

%%
%%

;
PARAMETERS

FMX FLUJO MAXIMO POSIBLE EN TUBERIAS,
GMX FLUJO MAXIMO POSIBLE EN TUBERIAS,
STGMX(J) MAXIMA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO PARA ALMACENES
PARA CADA J

- /
- | | |
|---|------|
| 1 | 1000 |
| 2 | 700 |
| 3 | 1000 |
| 4 | 900 |
| 5 | 1100 |

6 1000
 7 900
 8 800
 9 850
 10 950
 11 1500/

;

*P(M)=P(M)*10;

*COSTFRESH(M)=1.0;

*

TABLE CFPIPI(I,J) COSTO FIJO DE TUBERIA DE ENTRADA AL ALMACEN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	6.5	7	8	8.5	3	4	4.5	3	6.0	5.5	7
2	7.7	7.5	8	8.5	3.9	5.2	5.8	3.9	7.7	5.0	6.7
3	6.0	5.9	6.3	6.7	5.0	6.7	7.4	7.9	6.7	5.5	5.2
4	4.5	4.0	5.0	5.5	6.0	6.7	7.3	8.0	8.9	8.5	7.9
5	5.8	5.5	4.3	4.0	7.5	8.0	8.8	7.7	7.8	7.0	6.7;

TABLE COSTPUMPI(I,J) COSTO DE BOMBEO A CADA ALMACEN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.07	0.08	0.09	0.10	0.03	0.04	0.05	0.03	0.07	0.06	0.08
2	0.09	0.08	0.09	0.10	0.04	0.06	0.07	0.04	0.09	0.06	0.08
3	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08	0.06	0.06
4	0.05	0.04	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.09
5	0.07	0.06	0.05	0.04	0.08	0.09	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08

;

TABLE CVPIPI(I,J) COSTO VARIABLE DE TUBERIA DE ENTRADA AL ALMACEN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.51	0.55	0.63	0.67	0.24	0.31	0.35	0.24	0.47	0.43	0.55
2	0.61	0.59	0.63	0.67	0.30	0.41	0.46	0.30	0.61	0.39	0.53

3 0.47 0.46 0.50 0.53 0.39 0.52 0.58 0.62 0.53 0.43 0.41
 4 0.35 0.31 0.39 0.43 0.47 0.53 0.57 0.63 0.70 0.67 0.62
 5 0.46 0.43 0.34 0.31 0.59 0.63 0.69 0.61 0.61 0.55 0.53
 ;

TABLE D(L,M) M3 REQUIERED WATER FOR EACH SINK IN EACH PERIOD

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
2	300	300	300	300	300	300	200	200	200	200	200	400	400
3	600	500	600	600	600	500	500	600	400	400	400	200	200
4	150	200	250	200	150	150	200	200	250	300	350	200	
5	200	200	350	400	250	250	250	200	200	200	200	250	
6	300	300	400	350	350	350	350	400	250	280	300	290	
7	600	500	600	600	500	500	600	400	400	400	200	200	
8	150	200	250	200	150	150	200	200	250	300	350	200	
9	200	200	350	400	250	250	250	200	200	200	200	250;	

*D(L,M) $\text{ord}(l) \text{ eq } 1 = 100 * 4 * 200 / 1000$;

*display D;

*

FMX=SMAX((L,M),D(L,M))*100;

GMX=SMAX((M,ESC),P_S(ESC,M))*SMAX(I,AMX(I));

VARIABLES

TAC(ESC) TOTAL ANNUAL COST

FRESHTOTAL AGUA FRESCA TOTAL CONSUMIDA

ETAC EXPECTED TOTAL ANNUAL COST

WORSTCASE WORST CASE;

POSITIVE VARIABLES

A(I) AREA DE CAPTACION USADA DE LA INSTACION I

F(I,J,M,ESC) FLUJO DE ALIMENTACION A CADA ALMACEN

FCAP(I,J) FLUJO MAXIMO EN LA TUBERIA PARA DETERMINAR LOS
COSTOS DE CAPITAL

FFRESH(M,ESC) AGUA DEL SERVICIO MUNICIPAL PARA CADA PERIODO M

FMAY(I,M,ESC) FLUJO AGUA FRESCA RECUPERADA DE I EN EL PERIODO M

G(J,M,ESC) AGUA DISTRIBUIDA DESDE EL ALMACEN J PARA CADA
PERIODO M

GCAP(J) FLUJO MAXIMO EN LA TUBERIA PARA DETERMINAR LOS
COSTOS DE CAPITAL

PUMPCOST COSTO DE BOMBEO

S(J,M,ESC) TAMAÑO DEL TANQUE J EN M

SMX(J) CAPACIDAD MAXIMA DE ALMACENAMIENTO EN LOS ALMACENES

T(M,ESC) TAMAÑO DEL TANQUE ELEVADO QUE DEPENDE DEL AGUA
CAPTADA EN EL PERIODO M

TMX TAMANO MAXIMO DEL TANQUE ELEVADO PARA ALACENAR
AGUA

TRCOST(ESC) COSTO DE TRATAMIENTO DEL AGUA COLECTADA

STGCOSTT COSTO DE TANQUE ELEVADO

PIPCOST COSTO DE TUBERIA

STGCOST COSTO DE ALMACENAMIENTO

CAPTCOST COSTO DE CAPTACION

FRESHCOST COSTO DE ALGUA PROVENIENTE DE SERVICIO MUNICIPAL

;

BINARY VARIABLES

X(J) VARIABLE BINARIA PARA LA EXISTENCIA DE TUBERIA A LA SALIDA
DEL ALMACEN

YCAPT(I) VARIABLE BINARIA PARA LA EXISTENCIA DEL AREA DE
CAPTACION I

YSTG(J) VARIABLE BINARIA PARA LA EXISTENCIA DEL ALMACEN
Z(I,J) VARIABLE BINARIA PARA LA EXISTENCIA DE TUBERIA A LA
ENTRADA DEL ALMACEN

;

EQUATIONS

EC1(I,M,ESC) ECUACION PARA LA PRECIPITACION
EC2(I,M,ESC) DISTRIBUCION DEL AGUA RECOLECTADA
EC3(J,MM,ESC) BALANCE EN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO
EC3A(J,ESC) RESTRICCIÓN TIEMPO CERO IGUAL AL DOCE
EC4(MM,ESC) BALANCE EN TANQUE ELEVADO
EC4A(ESC) RESTRICCIÓN TIEMPO CERO IGUAL AL DOCE
EC5(I) AREA MÁXIMA DE CAPTACION
EC5A(I) AREA MÁXIMA DE CAPTACION
EC6(J) INSTALACIÓN DE TANQUE DE ALMACENAMIENTO
EC7(I,J) SEGMENTO DE TUBERÍA A LA ENTRADA DEL T. DE ALM.
EC8(J) SEGMENTO DE TUBERIA A LA SALIDA DEL T. DE ALM.
EC9(J,M,ESC) CAPACIDAD DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO
EC9A(J,M,ESC) CAPACIDAD DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO EN
FUNCION DE LA ALIMENTACION
EC10(M,ESC) CAPACIDAD DEL TANQUE ELEVADO
EC10A(M,ESC) CAPACIDAD DEL TANQUE ELEVADO EN FUNCION DE LA
ALIMENTACION
EC11(I,J,M,ESC) MAXIMO NUMERO DE CORRIENTES DE ALIMENTACION A UN
ALMACENADOR
EC12(J,M,ESC) MAXIMO NUM. DE CORRIENTES DE SALIDA DEL
ALMACENADOR
EC13 COSTO DE SISTEMA DE CAPTACION
EC14 COSTO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO
EC15 COSTO DE TANQUE ELEVADO
EC16 COSTO DE TUBERIA
EC17(ESC) COSTO DE TRATAMIENTO DE AGUA

EC18(ESC) COSTO DE BOMBEO
 EC19(ESC) COSTO DE AGUA PROVENIENTE DE SERVICIO PUBLICO
 EC19A(ESC) AGUA FRESCA TOTAL USADA
 EC20(ESC) FUNCION OBJETIVO

E21 DEFINICION DE EL TAC EXPECTED
 E22(ESC) WORST CASE FOR THE TAC
 E23

;

 *****MODEL*****

EC1(I,M,ESC).. FMAY(I,M,ESC)=E= P_S(ESC,M)*A(I);
 EC2(I,M,ESC).. FMAY(I,M,ESC)=E= SUM((J),F(I,J,M,ESC));
 EC3(J,MM,ESC).. S(J,MM,ESC)=E= S(J,MM-1,ESC)+ SUM((I),F(I,J,MM,ESC))-
 G(J,MM,ESC);

%%%%%%%%
 %%

EC3A(J,ESC).. S(J,'1',ESC)=E=S(J,'13',ESC);
 EC4(MM,ESC).. T(MM,ESC)=E=T(MM-
 1,ESC)+SUM((J),G(J,MM,ESC))+FFRESH(MM,ESC)-SUM((L),D(L,MM));
 EC4A(ESC).. T('1',ESC)=E=T('13',ESC);
 EC5(I).. A(I)=L=AMX(I)*YCAPT(I);
 EC5A(I).. A(I)=G=0.0005*AMX(I)*YCAPT(I);
 EC6(J).. SMX(J)=L=STGMX(J)*YSTG(J);

E22(ESC).. WORSTCASE=G=TAC(ESC);

E23.. SUM(I,YCAPT(I))=G=1;

*

OPTION MIP = CPLEX;

OPTION LP = CPLEX;

OPTION NLP = CONOPT;

OPTION MINLP =DICOPT;

OPTION SYSOUT=ON;

OPTION LIMROW=100;

OPTION LIMCOL=100;

*PRUEBAS*****

*F MAY.FX(I,M)=AMX(I)*P(M)*0.5;

*****PARA

EL

PARETO*****

*FRESHTOTAL.UP=6000;

*P_S(ESC,m)=P(M);

MODEL WATER /ALL/;

*A.LO(I)=0.0001;

*P_S(ESC,m)=P(M);

*****curva de tacs
modificado

FRESHTOTAL.UP(M) = 50000;

SOLVE WATER USING MIP MINIMIZING worstcase;

*SOLVE WATER USING MIP MINIMIZING worstcase;

PARAMETERS

ANPIPCOST COSTO CAPITAL ANUALIZADO PIPES
ANSTGCOST COSTO CAPITAL ANUALIZADO STORAGE
ANCAPTCOST COSTO CAPITAL ANUALIZADO CAPTACION
ANSTGCOSTT COSTO CAPITAL ANUALIZADO TANQUE AGUA FRESCA
ANPUMPCOST(ESC) COSTO ANUALIZADO DE BOMBEO
ANTRCOST(ESC) COSTO ANUALIZADO DE TRATAMIENTO
ANFRESHCOST(ESC) COSTO ANUALIZADO DE AGUA FRESCA
HARVESTINTOTAL(ESC) FLUJO TOTAL DE AGUA COLECTADA,
WREICLED(ESC) FLUJO DE AGUA RECIRCULADA;
ANPIPCOST=KF*(PIPCOST.L);
ANSTGCOST=KF*(STGCOST.L);
ANCAPTCOST=KF*(CAPTCOST.L);
ANSTGCOSTT=KF*STGCOSTT.L;
ANPUMPCOST(ESC)=PUMPCOST.L(ESC);
ANTRCOST(ESC)=TRCOST.L(ESC);
ANFRESHCOST(ESC)=FRESHCOST.L(ESC);
HARVESTINTOTAL(ESC)=SUM((I,M),FMAY.L(I,M,ESC));

```
WREICLED(ESC)=SUM((J,M),G.L(J,M,ESC));
```

```
DISPLAY
```

```
ANPIPCOST,ANSTGCOST,ANCAPTCOST,ANPUMPCOST,ANSTGCOSTT,ANTRCO  
ST,ANFRESHCOST,TAC.L,HARVESTINTOTAL,WREICLED,P_S;
```

```
EXECUTE_UNLOAD 'precnorm1', TAC, G, F, FMAY, FFRESH, A;
```

```
execute '=gdx2xls precnorm1.gdx';
```