



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Optimización de las políticas de operación  
de la presa Madín considerando meses de  
lluvia y meses de estiaje**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero civil**

**P R E S E N T A**

Juárez Garrido Juan Antonio

**DIRECTOR(A) DE TESIS**

Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## *Dedicatoria*

*Para las dos personas más importantes en mi vida. . .*

*A ella por su infinito amor, a él por su  
incommensurable enseñanza.*

*Los amo papás.*

## **Agradecimientos**

A mis padres por su infinito amor y apoyo incondicional, por haberme guiado a lo largo de tantos años y enseñarme esos valores que hoy forman parte de mí.

A mis hermanas, por todo el cariño y apoyo que siempre me han brindado, por todas las experiencias vividas.

A la Dra Maritza Liliana Arganis Juárez, al Dr. Ramón Domínguez Mora y al M.I. Andrés Olaf Santana Soto, por sus enseñanzas, apoyo y paciencia, que hicieron posible la realización de esta tesis.

Al M.I. Eliseo Carrizosa Elizondo, por brindarme la oportunidad de ser parte del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Al M.I. Guillermo Mancilla Urrea y al Dr. Luis Antonio García Villanueva por su apoyo y compromiso en la revisión de esta tesis.

A todos mis amigos y compañeros del Instituto de Ingeniería UNAM, que gracias a sus enseñanzas y apoyo pude complementar mi formación académica.

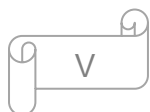
A Joana por ser mi compañera de aventuras en esta etapa de mi vida, por su apoyo, amor y cariño.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM y al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por brindarme la oportunidad de ser parte de ellas y sobre todo por ser el pilar de mi formación profesional.

## Índice

<b>Introducción.....</b>	<b>VIII</b>
Planteamiento del problema .....	IX
Hipótesis .....	IX
Objetivo.....	X
<b>CAPÍTULO I Conceptos básicos de hidrología.....</b>	<b>1</b>
1.1 Cuenca.....	1
1.2 Características fisiográficas de la cuenca .....	1
1.2.1 Parteaguas .....	1
1.2.2 Área de la cuenca .....	1
1.2.3 Corriente principal.....	2
1.2.4 Orden de corrientes .....	2
1.2.5 Pendiente media del cauce.....	2
1.2.6 Tiempo de concentración.....	3
1.3 Precipitación.....	3
1.3.1 Medición de la precipitación.....	5
1.4 Infiltración.....	5
1.5 Escurrimiento .....	6
1.4.1 Hidrograma .....	6
1.6 Relación lluvia-escurrimiento .....	7
1.6.1 Modelos de parámetros concentrados.....	7
1.6.2 Modelos de parámetros distribuidos .....	8
1.6.3 Pérdidas.....	8
1.6.4 Coeficiente de escurrimiento .....	8
1.7 Presas.....	10
1.7.1 Presas reguladoras.....	10
1.7.2 Presas derivadoras .....	10
1.7.3 Funcionamiento de un vaso.....	11
Bibliografía .....	12
<b>CAPÍTULO II Descripción de la zona de estudio .....</b>	<b>13</b>
2.1 Localización .....	13
2.1.1 Corrientes que alimentan a la Presa Madín.....	14
2.1.2 Estaciones de influencia alrededor de la cuenca .....	15

2.2 Tipo de suelo.....	16
2.3 Uso de suelo .....	17
2.4 Infraestructura hidráulica de los Estados aledaños.....	17
2.4.1 Naucalpan de Juárez .....	18
2.4.2 Atizapán de Zaragoza.....	18
2.5 Características del embalse .....	19
2.6 Operación y datos considerados.....	20
Referencias.....	21
<b>CAPÍTULO III Metodología .....</b>	<b>22</b>
3.1 Análisis de la cuenca en estudio .....	22
3.1.1 Evolución del uso de suelo .....	24
3.1.2 Análisis del coeficiente de escurrimiento .....	26
3.2 Análisis de la información disponible .....	27
3.3 políticas de operación .....	33
3.3.1 Políticas de operación uniformes.....	34
3.4 Simulación del comportamiento del embalse .....	35
3.4.1 Funcionamiento del vaso .....	35
3.5 Optimización de las políticas de operación .....	40
3.5.1 Programación lineal .....	41
3.5.2 Programación no lineal .....	43
3.5.3 Uso de hojas de cálculo.....	43
3.5.3 Gradiente Reducido Generalizado No Lineal (GRG Nonlinear).....	44
3.5.4 Función objetivo.....	46
Referencias.....	47
<b>CAPÍTULO IV Aplicación y resultados .....</b>	<b>49</b>
4.1 Análisis de las políticas de operación uniformes.....	49
4.2 Optimización de las políticas de extracción .....	53
Bibliografía .....	60
<b>CAPÍTULO V Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>61</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>63</b>



## Índice de figuras

Figura 1. "Esquema representativo de los tipos de lluvia" (Breña, 2006) .....	4
Figura 2. "Hidrograma de una tormenta" (Aparicio, 1992).....	7
Figura 3. "Regiones para determinar el coeficiente de escurrimiento en áreas no urbanizadas" .....	9
Figura 4. "Componentes de un vaso" (Aparicio,1992).....	12
Figura 5. "Localización de la presa Madín" .....	13
Figura 6. "Estaciones de la presa Madín" .....	15
Figura 7. "Tipo de suelo de la presa Madín".....	16
Figura 8. "obra de toma" (Jiménez, 1985).....	20
Figura 9. "Compuertas radiales de la obra de excedencias" (Jiménez 1985) .....	20
Figura 10. "Densidad poblacional en 2003 (Google Earth)" .....	23
Figura 11. "Densidad de poblacional en 2018" .....	24
Figura 12. "Uso de suelo de la cuenca Madín en el año 2000" .....	25
Figura 13. "Uso de suelo de la cuenca Madín en el año 2020" .....	25
Figura 14. "Curva elevaciones-capacidades de la presa Madín".....	28
Figura 15. "Curva Área – Elevaciones" .....	28
Figura 16. "Escurrecimientos totales anuales" .....	29
Figura 17. "Análisis de registros mensuales para el mes de Noviembre" .....	32
Figura 18. "Análisis de registros mensuales para el mes de Abril" .....	32
Figura 19. "Análisis de registros mensuales del mes con mayor cantidad de escurrimiento".....	33
Figura 20. "Condiciones no deseadas para el embalse" (Arallely, 2010) .....	35
Figura 21. "Óptimos locales y óptimos globales" (Padilla, 2020).....	45
Figura 22. "Déficits y derrames totales para cada escenario (1947-1999)" .....	49
Figura 23. "Déficits y derrames totales para cada escenario (2000-2018)".....	50
Figura 24. "Derrames y déficits por mes, con una extracción continua de 0.5 m <sup>3</sup> /s" .....	53
Figura 25. "Extracciones optimizadas para cada función objetivo".....	55
Figura 26. "Déficits y derrames totales para cada función objetivo (1947-1999)"..	56
Figura 27. "Déficits y derrames totales para cada función objetivo (2000-2018)"..	56

## Índice de tablas

Tabla 1. "Coeficiente de escurrimiento para áreas no urbanizadas" .....	10
Tabla 2. "Área de cada tipo de suelo" .....	17
Tabla 3. "Población municipal, INEGI" .....	22
Tabla 4. "Áreas y porcentajes del uso de suelo para la cuenca de la presa Madín para los años 2000 y 2020".....	26
Tabla 5. "Coeficientes de escurrimiento para los años 2000 y 2020" .....	27
Tabla 6. "Registro histórico de escurrimientos en Hm <sup>3</sup> para la presa Madín" .....	29
Tabla 7. "Extracciones mensuales en m <sup>3</sup> /s, propuestas para distintos escenarios" .....	34

Tabla 8. “Consideración de la elevación del NAMO para los diferentes meses del año” .....	38
Tabla 9. “Información de entrada para la simulación” .....	38
Tabla 10. “simulación del vaso para el primer año de registro” .....	39
Tabla 11. “Límite superior y límite inferior para la optimización” .....	47
Tabla 12. “Derrames y déficits totales por año de 1947 a 1999” .....	51
Tabla 13. “Derrames y déficits totales por año de 2000 a 2018” .....	51
Tabla 14. “Extracción programada y extracción real para el segundo periodo (2000-2018)” .....	52
Tabla 15. “Extracciones mensuales obtenidas a partir de la minimización” .....	54
Tabla 16. “Resultados de la simulación con la FO1” .....	57
Tabla 17. “Resultados de la simulación con la FO2” .....	58
Tabla 18. “Tabla resumen de los volúmenes para cada condición, obtenidos de las extracciones programadas para FO1 y FO2 (Primer periodo)” .....	59
Tabla 19. “Tabla resumen de los volúmenes para cada condición, obtenidos de las extracciones programadas para FO1 y FO2 (Segundo periodo)” .....	59
Tabla 20. “Extracción promedio anual total programada y real estimada para el periodo 2000-2018. ....	60
Tabla 21. “Comparativa de las extracciones uniformes y optimizadas” .....	61



## Introducción

A través de los años, el uso, aprovechamiento y cuidado del agua han sido primordiales para los seres humanos, se ha hecho un gran esfuerzo por resolver los desafíos que este recurso hídrico nos ha puesto a lo largo de la historia, no solo para conseguirlo y aprovecharlo, sino también, para evitar las consecuencias del comportamiento imprevisto de las corrientes.

En la Cuenca del Valle de México (CVM) cuestiones como el abastecimiento, el desalojo de las aguas pluviales y el tratamiento de las aguas residuales forman parte de los grandes retos a enfrentar en el presente. La CVM se localiza en el extremo sur del altiplano mexicano, y está conformada por los estados de Hidalgo (48.46%), Estado de México (39.50%), Tlaxcala (3.00%), y la CDMX (9.04%) (CONAGUA, 2006) En la cuenca se localiza la Zona metropolitana del Valle de México (ZMVM).

La ZMVM continúa su expansión y por lo tanto sigue incrementando su demanda de agua potable, esto ha obligado a la utilización de diversas fuentes de extracción como son las subterráneas y las superficiales. Debido a la sobreexplotación de los acuíferos la extracción del agua subterránea se ve limitada, pues se ha sobrepasado la capacidad de recarga.

Para la ZMVM se dispone, en promedio, de un abastecimiento de agua potable de 61,000 l/s, de los cuales 39,700 l/s provienen del subsuelo del Valle de México, 14,700 l/s del sistema Cutzamala, 5,100 l/s del sistema Lerma y 1,100 l/s de aprovechamientos superficiales, como la presa Madín y los manantiales del propio valle. (CONAGUA 2006).

Es por esta situación que se ha vuelto indispensable el desarrollo de planes y estrategias que procuren una gestión y operación eficiente de este recurso hídrico.

El trabajo que a continuación se presenta se centra en el estudio hidráulico e hidrológico de la cuenca de la presa Madín, pues se mostró la importancia de la optimización de las políticas de operación ante el crecimiento acelerado de la urbanización en esta área de estudio, pues con ello y con el cambio en el uso de suelo, se ha provocado un incremento en los escurrimientos que finalizan su trayecto en el vaso de la presa Madín.

Este trabajo se desarrolló en 6 Capítulos. En el Capítulo 1 se abarcaron temas fundamentales que se utilizaron como antecedentes para llevar a cabo el estudio, como son los antecedentes de hidrología; además se asentó el planteamiento del problema y se desglosaron los objetivos. El Capítulo 2 contiene información sobre la ubicación de la cuenca, así mismo se mencionaron algunas características de las zonas aledañas a la misma. Se abordaron temas característicos del embalse, así como la infraestructura básica de la presa. En el Capítulo 3 de la metodología, se lleva a cabo el análisis de la cuenca, su evolución en el tipo de suelo y se introducen

los temas de políticas de operación, simulación y optimización. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos del análisis llevado a cabo, presentando comparaciones entre ambos análisis. Finalmente, en el Capítulo 5 se destacan las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

## **Planteamiento del problema**

La presa Madín fue construida para regular las avenidas del río Tlalnepantla, así mismo para potabilizar parte de su volumen. En la actualidad es un embalse de gran importancia para el estado de México ya que abastece de agua a los municipios de Naucalpan, Atizapán de Zaragoza, Tlalnepantla y una parte de la ZMVM (CONAGUA, 1999)

Debido al crecimiento descontrolado de la mancha urbana de las áreas aledañas a la presa y de la deforestación dentro de la cuenca que la abastece, se han presentado problemas con el excedente de aguas que llega al embalse durante la época de lluvias. Las políticas de operación que actualmente rigen la presa, demandan un control de los desbordamientos que se puedan volver a presentar, agregando, además, la importancia de evitar posibles situaciones de déficit en tiempos de estiaje.

A partir de los registros de volumen extraído por parte de la planta potabilizadora, actualmente en funcionamiento, y el volumen de desfogue de la presa, se obtuvieron los volúmenes de entrada necesarios para el estudio.

Se cuenta con registros mensuales y anuales, desde enero del año 1947, hasta diciembre del año 2018. Estos registros se dividieron en dos grupos, de 1947 a 1999 y del 2000 a 2018, esto con la finalidad de obtener un comportamiento consistente, pues se observó que, si se realizaba un análisis general de todos los datos, el desfase entre déficit y derrame era muy elevado.

Los datos recabados se utilizaron para analizar políticas de extracción de dos maneras distintas. La primera consistió en un análisis estático donde se propusieron 10 escenarios distintos de posibles extracciones, considerando la muestra histórica de los volúmenes de entrada registrados. La segunda consistió en la optimización de las políticas de operación proponiendo una función objetivo en la que se maximizan las extracciones y se minimizan los posibles escenarios de déficit y de derrames.

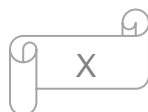
## **Hipótesis**

Al optimizar los volúmenes de extracción de la presa Madín hacia una planta potabilizadora, disminuyendo eventos no deseados de déficit y de derrames,

mejorará en el largo plazo las condiciones de entrega de agua hacia una planta potabilizadora.

## **Objetivo**

El objetivo general de este trabajo es simular y optimizar las políticas de operación de la presa Madín, con ayuda de herramientas de cómputo implementadas en una hoja de cálculo, con la finalidad de minimizar los déficits y los volúmenes derramados.



# **CAPÍTULO I**

## **Conceptos básicos de hidrología**

### **1.1 Cuenca**

La cuenca, como unidad fundamental de la hidrología, se define como la superficie en la cual la precipitación se transfiere a las partes con menor elevación, es decir, es drenada a través de las corrientes hacia un punto común de salida. Existen diferentes clasificaciones para las cuencas, sin embargo, abordaremos aquella que está en función de su punto de salida, por lo que tenemos (Aparicio, 1992)

- Cuenca endorreica: Aquella superficie en donde las gotas de lluvia son conducidas al punto más bajo dentro de los límites de la cuenca.
- Cuenca exorreica: En este tipo de cuencas las descargas se llevan a cabo en los límites que la definen, posteriormente son conducidas hacia alguna otra corriente o terminan su camino en el mar.

### **1.2 Características fisiográficas de la cuenca**

Para poder llevar a cabo el estudio de la cuenca es necesario conocer ciertos parámetros que la caractericen, con los cuales se obtiene información tanto de su forma como de su comportamiento, lo cual nos permitirá conocer su respuesta ante algún evento dado.

#### **1.2.1 Parteaguas**

Se define como la línea imaginaria que delimita una cuenca y la separa de cuencas adyacentes, está formada por los puntos con mayor nivel topográfico y se traza a partir de un punto de interés.

#### **1.2.2 Área de la cuenca**

Es la superficie, en proyección horizontal, que está delimitada por el parteaguas.

### 1.2.3 Corriente principal

Es la corriente de mayor longitud, además, pasa por el punto de salida de la cuenca. El resto de las corrientes reciben el nombre de tributarios. Hay que tomar en cuenta que la definición de corriente principal aplica únicamente para cuencas exorreicas.

### 1.2.4 Orden de corrientes

El orden de una cuenca es el mismo que el de la corriente principal en su salida, éste se determina a partir del grado de bifurcación de las corrientes tributarias. Se asigna el número 1 para las corrientes sin ramificaciones, dos corrientes de orden 1 forman una corriente de orden 2, dos corrientes de orden 2 forman una corriente de grado 3 y así sucesivamente.

### 1.2.5 Pendiente media del cauce

La pendiente es una relación entre la longitud y la elevación del punto final e inicial del cauce. Debido que a lo largo de su trayecto la pendiente varía de tramo en tramo, se define una *pendiente media*, es decir la inclinación promedio del cauce. Existen diferentes métodos para el cálculo de la pendiente media, algunos de los cuales se mencionan a continuación:

- El primer método es el menos aproximado, consiste en trazar el perfil del río y posteriormente dividir la diferencia de elevaciones entre su longitud (Aparicio, 1992).

$$S = \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

Donde:

S: Pendiente media del cauce, [adimensional]

$\Delta h$ : Desnivel entre los extremos del cauce, [L]

L: Longitud total del cauce [L]

- El segundo método consiste en compensar las áreas de la corriente, es decir, se trazan líneas hasta encontrar la que iguale las áreas de la parte superior con la parte inferior, teniendo como punto de partida el punto de descarga.

- El tercer método es el método de Taylor-Schwarz y su fundamento se basa en analizar el cauce por tramos, utilizando los respectivos tiempos de recorrido en función de la pendiente de cada tramo.

$$S_{CP} = \left( \frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right)^2 \quad (2)$$

Donde:

$S_{CP}$ : La pendiente media del cauce principal, [adimensional]

$m$ : número de tramos de igual longitud

$S_i$ : Pendiente de cada tramo  $i$  en que se dividió el cauce, [adimensional]

### 1.2.6 Tiempo de concentración

Es la diferencia de tiempo desde el inicio de la lluvia hasta que se establece un gasto constante, en otras palabras, es el tiempo que tarda en llegar una gota de agua desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de descarga, se calcula con la fórmula de Kirpich:

$$T_c = 0.000325 \frac{(L_{CP})^{0.77}}{(S_{CP})^{0.385}} \quad (3)$$

Donde:

$L_{CP}$ : Es la longitud del cauce principal [en  $km$ ]

$S_{CP}$ : Es la pendiente media del cauce principal [adimensional]

$T_c$ : Es el tiempo de concentración [en horas]

### 1.3 Precipitación

La precipitación, definida como el agua depositada en la superficie terrestre, proveniente de la atmosfera, es la fuente primaria de agua en la superficie terrestre, sus mediciones son el punto de inicio de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua. (Aparicio, 1992)

En general, los factores geográficos y geofísicos determinan las condiciones del clima y de la lluvia en las diversas regiones geográficas que conforman a la república mexicana.

La precipitación se puede clasificar acuerdo al mecanismo por el cual se origina (Figura 1):

- **Precipitación convectiva:** Esta precipitación es debida a un calentamiento mayor de la superficie, producida por la radiación solar, la diferencia de densidades hace ascender una masa de aire más caliente que las circundantes, esta masa se enfría y se condensa, dando origen a lluvias muy intensas, de corta duración y abarcando áreas reducidas.
- **Precipitación ciclónica:** Es originada por el paso de una perturbación ciclónica y esta puede ocurrir en cualquier depresión barométrica, la masa de aire húmedo asciende debido a la convergencia de masas de aire que tienden a rellenar la zona de baja presión.
- **Precipitación orográfica:** Es producida debido a la elevación topográfica, la masa de aire húmedo asciende al encontrarse con una barrera orográfica.

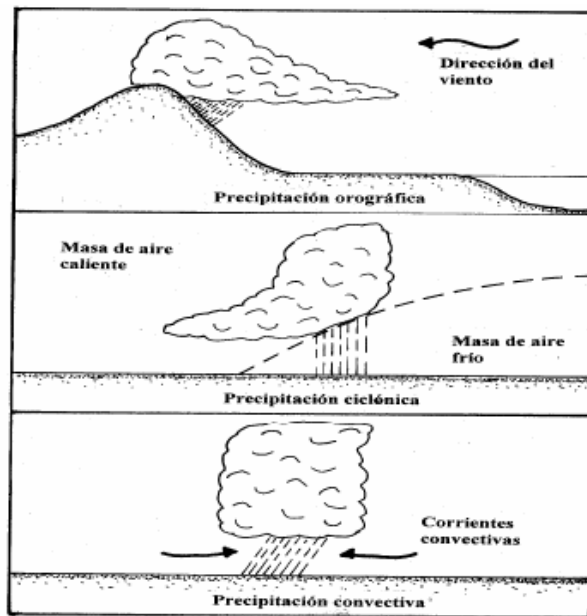


Figura 1. "Esquema representativo de los tipos de lluvia" (Breña, 2006)

Una vez iniciada la precipitación, el agua que no logra infiltrarse se mueve sobre la superficie, hasta llegar al punto de descarga de la cuenca. El agua excedente que no logra penetrar al suelo se denomina **precipitación efectiva**.

### 1.3.1 Medición de la precipitación

Las técnicas empleadas en la medición de la cantidad, intensidad y regularidad de la precipitación del agua llevan el nombre de pluviometría.

Para poder medir y registrar la precipitación se emplean dispositivos muy sencillos, pero de cierta dificultad en cuanto a sus normas de empleo e interpretación de los datos. Existen dos formas de medir la precipitación pluvial: de forma continua y de forma discreta. Para el caso de la medición continua se utilizan los pluviógrafos y para el caso de la medición de forma discreta se utilizan los pluviómetros (Breña, 2006).

Esta medición no se puede realizar sobre toda el área de interés, sino en puntos previamente seleccionados, donde se encuentran instalados dispositivos de medición, por lo cual es importante resaltar el carácter puntual de las mediciones.

Para poder llevar a cabo los cálculos ingenieriles, es necesario obtener un promedio de las precipitaciones dadas en la región a estudiar, tomando en cuenta el área de influencia de cada punto de medición. Este promedio recibe el nombre de precipitación media.

### 1.4 Infiltración

La estratigrafía de los sedimentos sobre los que se desarrolla la cuenca tiene importancia fundamental en el proceso hidrológico, esto se visualiza en dos aspectos del ciclo: la infiltración y el escurrimiento.

Entendemos pues, que la infiltración es el proceso por el cual el agua penetra a través de los estratos de la superficie del suelo y se mueve hacia el manto freático, este movimiento es producido por fuerzas de gravedad y fuerzas capilares. En un principio, el agua satisface la demanda de humedad de la superficie, posteriormente los excedentes forman parte del agua subterránea a profundidad y del escurrimiento en superficie (Zimmermann 2009).

En general la infiltración depende de diferentes factores como la intensidad de la precipitación, densidad, tipo y estado de desarrollo de la vegetación, temperatura, entre otros. Es común que durante una tormenta el volumen de infiltración sea bastante mayor que el de escurrimiento, sin embargo, para zonas con un alto nivel de urbanización esto no ocurre así.



## 1.5 Esgurrimiento

Como ya se mencionó, el esgurrimiento, es la precipitación excedente que circula sobre, o bajo la superficie terrestre, hasta llegar al punto de salida o alimentar algún cuerpo de agua, esto dependerá del tipo de cuenca del que se trate.

A lo largo de su trayectoria, el agua, puede seguir tres caminos distintos: sobre la superficie, debajo pero muy cerca de la superficie y por debajo del nivel freático, y de acuerdo al camino por el que transita recibe el nombre de esgurrimiento superficial, esgurrimiento subsuperficial y esgurrimiento subterráneo, respectivamente.

Considerando la rapidez con la que llega al punto de descarga, el esgurrimiento se puede denominar de dos maneras: esgurrimiento base o esgurrimiento directo. Por un lado, el esgurrimiento directo está formado por el esgurrimiento superficial y en algunas ocasiones por el esgurrimiento subsuperficial (siempre y cuando éste sea tan rápido como el superficial); cuando el esgurrimiento subsuperficial es tan lento como el esgurrimiento subterráneo se considera como esgurrimiento base, el cual también está formado por el esgurrimiento subterráneo.

Es importante mencionar que el esgurrimiento directo llega más rápido a la salida de la cuenca, por lo que es posible relacionarlo a una tormenta en particular, además de que este esgurrimiento es generado por la precipitación efectiva. Por otro lado, es muy complicado poder relacionar al esgurrimiento base con alguna tormenta en específico.

Lo importante en realidad es la rapidez con que una cuenca responde a una tormenta, pues esto es lo que determina la magnitud de las avenidas (Aparicio 1989).

### 1.4.1 Hidrograma

Para poder representar de manera gráfica la variación del gasto que esgurre a través de un cauce, en un periodo de tiempo determinado, se recurre a los hidrogramas (Figura 2) ya que estos relacionan el gasto con el tiempo.

Con los hidrogramas podemos conocer la duración y el esgurrimiento que caracteriza a una determinada tormenta, pues no sólo varían de cuenca en cuenca, sino que también varían de tormenta a tormenta.

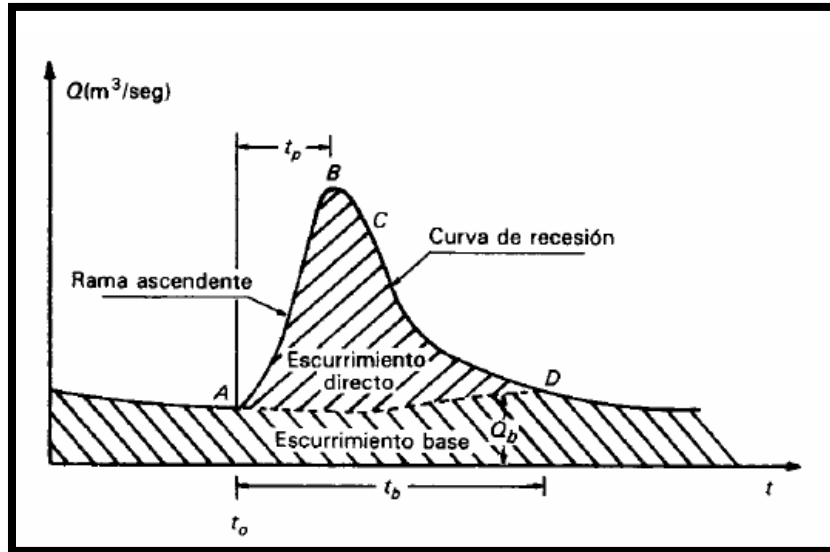


Figura 2. "Hidrograma de una tormenta" (Aparicio, 1992)

## 1.6 Relación lluvia-escorrimento

Para poder determinar el gasto de diseño de las obras hidráulicas, es necesario conocer el volumen que escurre a través de la cuenca, sin embargo, es común que los registros hidrométricos en el sitio de interés sean escasos o en algunas ocasiones sean nulos. Debido a lo anterior, se han desarrollado diferentes modelos para estimar el escorrimento a partir de las características de la cuenca y de los datos de precipitación, que, en comparación con los datos hidrométricos, son abundantes y de mejor calidad, además de que no son afectados por cambios en la cuenca. Un ejemplo de estos cambios es la urbanización.

Los modelos que se han desarrollado para poder relacionar la lluvia con el escorrimento se pueden dividir en dos grupos.

### 1.6.1 Modelos de parámetros concentrados

Son modelos que consideran una homogeneidad en las características de la cuenca, principalmente consideran una distribución espacial uniforme de lluvia.

### **1.6.2 Modelos de parámetros distribuidos**

Los modelos de parámetros distribuidos no consideran una homogeneidad en las características fisiográficas de la cuenca y se basan en el principio físico de la conservación de la materia, manteniendo el balance de agua entre la lluvia, escurrimientos, evaporación e infiltración.

Se encargan de dividir a la cuenca en cuadrados de áreas iguales (celdas) a los cuales se les asignan parámetros o factor uniforme (como el uso de suelo, permeabilidad, pendiente, número de curva, etc...).

Debido al gran número de variables que intervienen en estos modelos se describe de forma más precisa el comportamiento de la cuenca (Martínez, 2013).

### **1.6.3 Pérdidas**

Se denomina como pérdidas, al volumen de agua que no escurre hacia las corrientes próximas para poder ser drenada, en otras palabras, es la diferencia entre el volumen de agua que llueve en la cuenca y el volumen que escurre por su salida.

Las pérdidas ocurren por diferentes factores, como son: el follaje en plantas, retención en depresiones, evaporación e infiltración. Sin embargo, en procesos donde se requiere la utilización de periodos de análisis cortos, las pérdidas están asociadas únicamente a la infiltración (Aparicio, 1992).

### **1.6.4 Coeficiente de escurrimiento**

El coeficiente de escurrimiento nos permite conocer la respuesta de la cuenca ante una tormenta dada, pues nos indica qué porcentaje de lo que llueve, escurre, en otras palabras, es una determinación de las pérdidas de lo que llueve.

Por lo anterior, factores como el tipo y uso de suelo toman gran importancia a la hora de definir el coeficiente de escurrimiento, pues por un lado el tipo de material del que está compuesta la cuenca, definirá cuestiones como la permeabilidad, y la saturación del suelo; por el lado del uso, cuestiones como la urbanización o la deforestación repercuten en la velocidad de escurrimiento y en la cantidad de las pérdidas

Existen diferentes métodos para determinar el coeficiente de escurrimiento, uno de ellos considera que las pérdidas son proporcionales a la intensidad de lluvia, y se obtiene a través del cociente del volumen escurrido entre el volumen llovido.

Otro método para estimar el coeficiente de escurrimiento de las cuencas del valle de México es el procedimiento propuesto en el Manual de Hidráulica Urbana,

desarrollado mediante mediciones experimentales por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Ponce, 2019).

$$C_E = C_{NU} \frac{A_{NU}}{A_T} + 0.45 I_U \frac{A_U}{A_T} \quad (4)$$

Donde:

$C_E$ .- Es el coeficiente de escurrimiento asociado a una cuenca

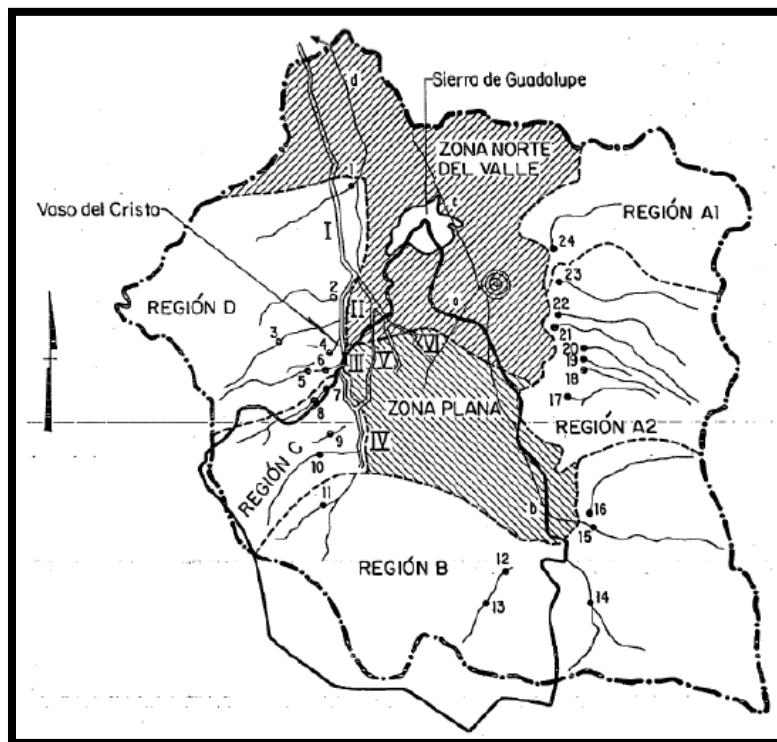
$C_{NU}$ .- Coeficiente de escurrimiento para áreas no urbanizadas, se obtiene de un mapa basado en estudios regionales para el valle de México (Figura 3 y Tabla 1)

$A_{NU}$ .- Área de la cuenca no urbanizada en  $km^2$

$A_T$ .- Área total de la cuenca en  $km^2$

$I_U$ .- Índice de urbanización que varía entre 0.6 y 0.1 según su densidad de urbanización del área urbanizada

$A_U$ .- Área urbanizada en  $km^2$



**Figura 3. "Regiones para determinar el coeficiente de escurrimiento en áreas no urbanizadas"**

**Tabla 1. "Coeficiente de escurrimiento para áreas no urbanizadas"**

Región	C <sub>nu</sub>
A1	0.02
A2	0.06
B	0.02
C	0.06
D	0.10
Zona plana	0.15

## **1.7 Presas**

Para poder captar el agua de un cauce y así mejorar su aprovechamiento, se construyen obras hidráulicas denominadas como presas, que, de acuerdo con su función principal, su diseño o el tipo de material del que se construyen, reciben diferentes clasificaciones.

En general las presas se construyen de forma perpendicular al cauce, por lo que interrumpen su escurrimiento natural, debido a esto se crea un remanse, que de acuerdo con el tipo de presa se determinará que uso tendrá la carga disponible.

La presa Madín está construida principalmente para regular las avenidas del río Tlalnepantla, sin embargo, una parte del agua es utilizada para el abastecimiento de algunas zonas del Estado de México.

### **1.7.1 Presas reguladoras**

Las presas reguladoras, como su nombre lo indica, se encargan de regular la velocidad del gasto de salida de la presa, deteniendo el escurrimiento por un periodo corto de tiempo y posteriormente devolviéndolo al cauce.

En otras palabras, su diseño está basado en detener el escurrimiento y liberarlo a una tasa regulada. El almacenamiento por detención atenúa el pico de los caudales y la alta energía cinética del escurrimiento superficial. (Chow 1994).

### **1.7.2 Presas derivadoras**

Las presas derivadoras tienen diferentes utilidades dentro de las cuales se encuentra la captación, la distribución y la irrigación, sin embargo, también pueden ser utilizadas en la desviación de caudales, cuando se presentan avenidas que no

pueden ser conducidas por sus respectivos cauces hacia un río próximo o un almacenamiento lateral. (Martínez, 2009).

### 1.7.3 Funcionamiento de un vaso

El almacenamiento de un vaso puede tener uno o varios propósitos, como pueden ser: control de avenidas, abastecimiento de agua, generación de energía eléctrica, entre muchos otros; para que lo anterior se pueda llevar a cabo es necesario contar con niveles que permitan su constante aprovechamiento.

A continuación, se describen los niveles de operación de un vaso:

**NAMO.-** Es el Nivel de Aguas Máximas de Operación, y es el máximo nivel con el que puede operar la presa para satisfacer las demandas, además coincide con el punto más alto del vertedor. El volumen de agua que se encuentra entre el NAMO y el NAMINO se denomina *capacidad útil*.

**NAME.-** Es el Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias, es decir es el nivel más alto que debe alcanzar el agua bajo cualquier condición. El volumen comprendido entre este y el NAMO es denominado *superalmacenamiento*.

**NAMINO.-** Es el Nivel de Aguas Mínimo de Operación, es decir el nivel mínimo requerido para llevar a cabo el funcionamiento correcto del vaso. Generalmente este nivel coincide con el nivel de entrada en la obra de toma, sin embargo, para las presas de generación de energía eléctrica este nivel se fija con la carga necesaria para hacer girar las turbinas. El nivel que se encuentra por debajo del NAMINO se denomina *volumen muerto*, por debajo del nivel de entrada de la obra de toma se denomina *volumen de azolves*.

Los principales elementos de un vaso se observan en la Figura 4.

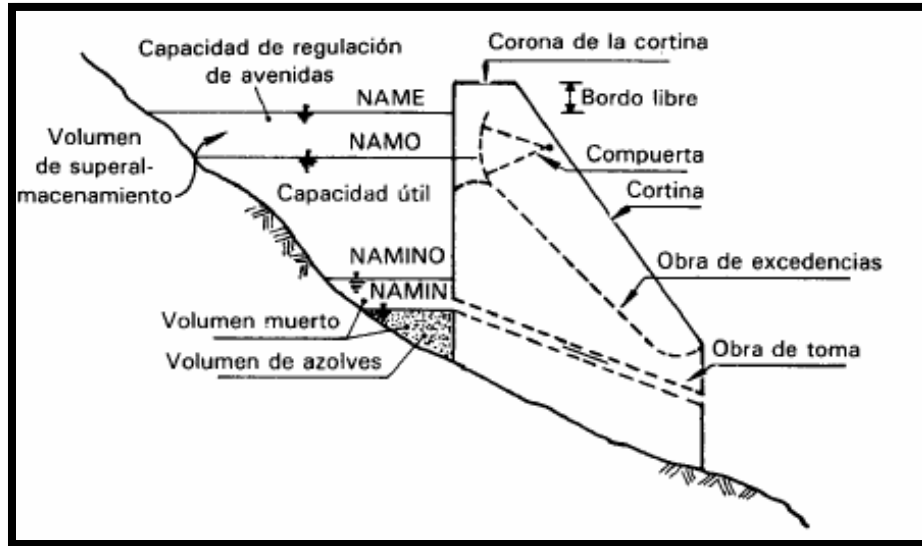


Figura 4. "Componentes de un vaso" (Aparicio, 1992)

## Bibliografía

- Aparicio, F.J. (1992). "Fundamentos de hidrología de superficie", Editorial LIMUSA. México
- Breña, A.F. (2006). "Principios y fundamentos de la hidrología superficial". Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Zimmermann, E.D. (2009) "Hidrología procesos y métodos" UNR Editora. Argentina.
- Mejía, J.A. (2012) "Hidrología aplicada" Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú
- Ponce, S.M. (2019) "Estimación de hidrogramas de descarga de las presas del poniente". Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería. UNAM
- Israel M. A. (2009) "Políticas de operación óptimas para un sistema de presas. Aplicación de algoritmos genéticos" Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería. UNAM.

## CAPÍTULO II

### Descripción de la zona de estudio

#### 2.1 Localización

La subcuenca de la Presa Madín (Figura 5) se localiza en la Sierra Poniente del Valle de México, en la porción centro oriental de la provincia fisiográfica del Eje Neo volcánico, forma parte de la Región Hidrológica número 26 “Panuco”, y a su vez, de la Región Hidrológica Administrativa número XIII (Aguas del Valle de México), abarca principalmente tres municipios del Estado de México: Jilotzingo, Atizapán de Zaragoza y Naucalpan de Juárez; comunica las zonas urbanas de los municipios de Naucalpan y Atizapán a través de la avenida Lomas Verdes y la avenida Doctor Jiménez Cantú, sin embargo para poder acceder a la parte alta de la cuenca se requiere tomar la carretera estatal Naucalpan – Ixtlahuaca.

El área aproximada de la subcuenca es de 99.34 km<sup>2</sup>, su forma es alargada hacia el sur poniente y su cauce principal es el Río Tlalnepantla, con una extensión aproximada de 23.97 km.

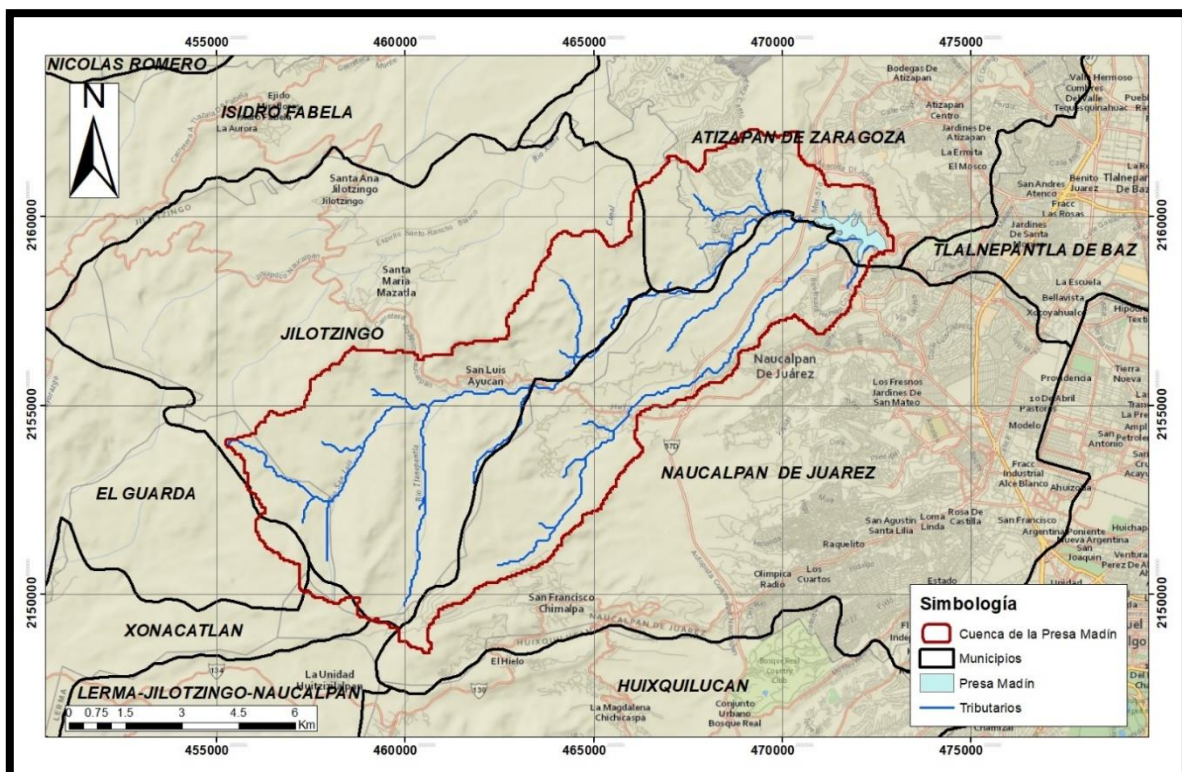


Figura 5. “Localización de la presa Madín”



La presa Madín, se encuentra entre los límites de los municipios de Naucalpan y Atizapán de Zaragoza, a los 19° 31' 37" latitud Norte y 99° 15' 33" longitud Oeste. La presa está inmersa en una zona de alta densidad poblacional ya que cercanas a ella se encuentran las localidades de Nuevo Madín, La Concordia, Fuentes de Satélite, Fraccionamiento Chiluca, Lomas de valle escondido y Zona esmeralda. La cortina de la presa se encuentra 2 km al sur del poblado de Atizapán de Zaragoza.

Para ingresar a la presa se toma la Av. Adolfo Ruiz Cortines o la Carretera Federal No 57, Ciudad de México Toluca, hasta entroncar con Av. Dr. Jorge Jiménez Cantú.

### **2.1.1 Corrientes que alimentan a la Presa Madín**

Las corrientes presentes dentro de la cuenca de la Presa Madín tienen su origen principalmente en las laderas de la Sierra de las Cruces y Monte Alto. Estas corrientes tienen un sistema de drenaje del tipo dendrítico en la zona más alta y semiparalelo en la parte baja. Aunque mucha del agua que escurre por la cuenca proviene de arroyos la mayoría de ellos se pierden por infiltración antes de llegar a la zona baja.

Como ya se ha mencionado el principal aportador de la cuenca es el río San Luis, sin embargo, paralelo a este se encuentra el río San Juan, el cual es otro efluente importante; ambos mantienen su trayecto de oeste a este y descargan directamente a la presa Madín. Algunos de los arroyos que alimentan a la presa son: El Polvorín, El sifón, El Aguaje, La Nopalera, Paso Hondo y El Pozo.

El río San Luis es una de las corrientes principales del Valle de México, esta corriente se origina desde los escurrimientos que descienden de la Sierra Monte Alto. Este río delimita los municipios de Naucalpan de Juárez y Atizapán de Zaragoza, durante todo su trayecto recibe una serie de corrientes entre las que destacan los arroyos Alameda, Madín, Córdoba, Chiluca y el río Tepatlaxco. Además, sus dos fuentes principales de abastecimiento son los manantiales Endeca y las Manzanas.

Por otro lado, el río San Luis no finaliza su trayecto en la presa, sino que continúa por con el entonces llamado río Tlalnepantla. Posteriormente aguas abajo del río Tlalnepantla escurre por dos cauces: uno conduce los excedentes de la presa por el río de los remedios hasta desembocar en el Lago de Texcoco, y otro que sirve de colector de aguas negras a los fraccionamientos aledaños para continuar su trayecto por el emisor poniente.

El río San Juan nace al oeste del poblado de Santiago Tepatlaxco, en donde recibe el nombre de arroyo Los Ajos. Los arroyos que alimentan a la presa generalmente son de poca extensión y se encuentran al sur del poblado de Nuevo Madín.

De toda el agua que llega al vaso de la presa el río San Luis aporta aproximadamente dos tercios (67.2 %), con un gasto promedio de 0.873 m<sup>3</sup>/s, en segundo término y con un gasto promedio de 0.247 m<sup>3</sup>/s, el arroyo La Colmena es decir el 19 % del total, en tercer término, el arroyo San Juan tiene un gasto promedio de 0.148 m<sup>3</sup>/s y contribuye con un 11.4 %. La lluvia que cae directamente al embalse aporta el 1.6 %. Por último, existen dos pequeños tributarios que descargan aguas residuales domésticas en las cercanías del poblado de Nuevo Madín. El arroyo las Palmas con un 0.7 % y un gasto promedio de 0.0096 m<sup>3</sup>/s y la descarga de Nuevo Madín con sólo el 0.1 % y su gasto promedio de 0.0007 m<sup>3</sup>/s (CONAGUA, 1999).

### 2.1.2 Estaciones de influencia alrededor de la cuenca

Según datos de la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) la cuenca de la presa Madín cuenta con 3 estaciones hidrométricas y 2 estaciones climatológicas (Figura 6), sin embargo, algunas de las estaciones no se encuentran en funcionamiento, por lo que se carece de datos recientes de la hidrología de la cuenca del río San Luis (Tlanepantla) y el río San Juan, sus principales afluentes.

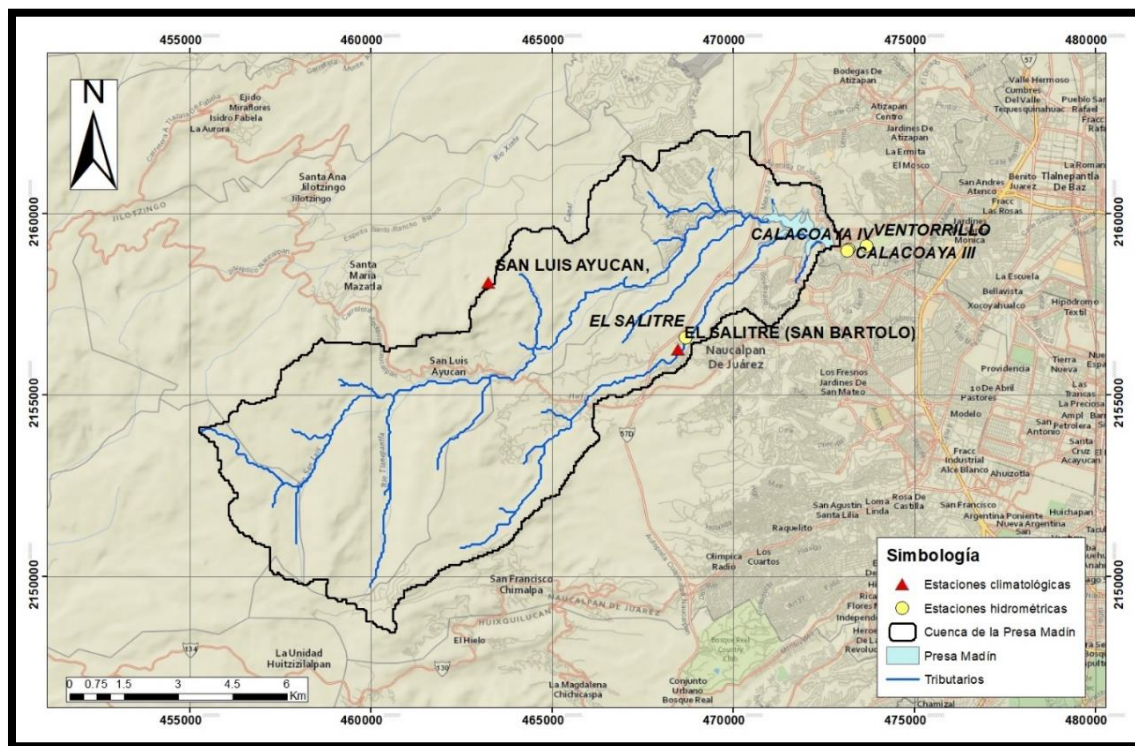
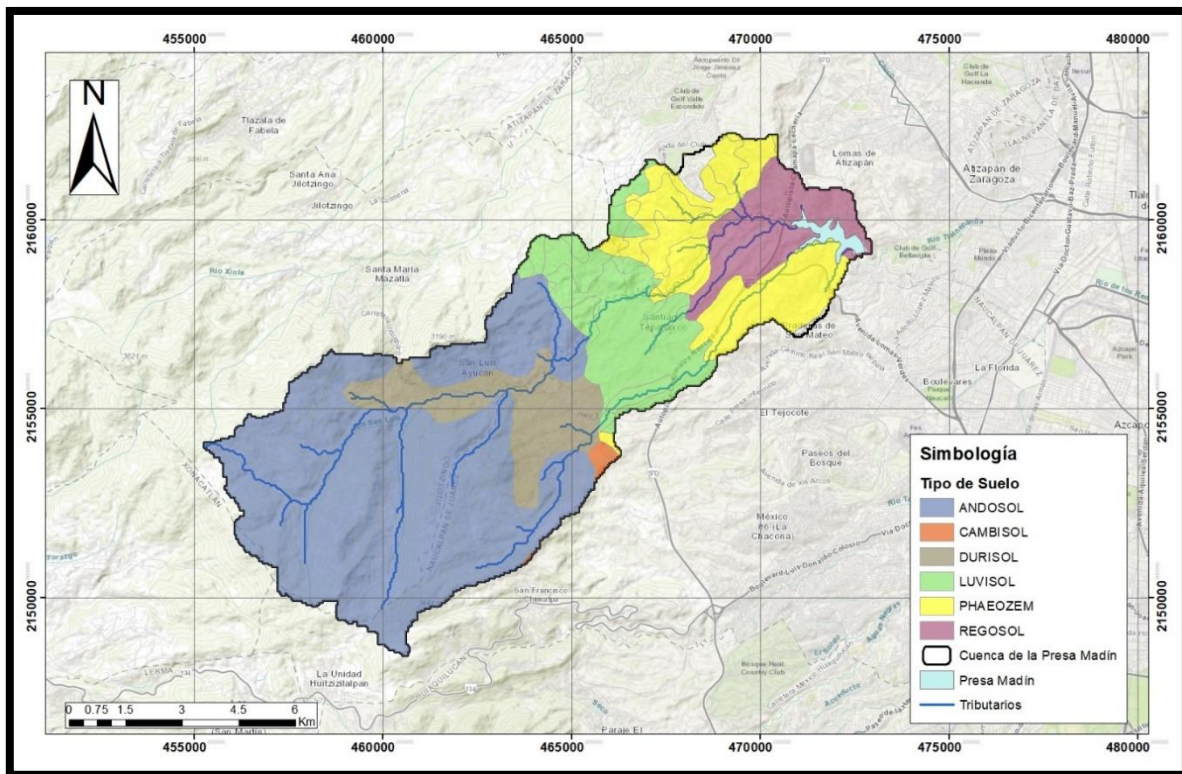


Figura 6. “Estaciones de la presa Madín”

## 2.2 Tipo de suelo

El tipo de suelo presente en la cuenca de la presa Madín se representa en la Figura 7, y fue obtenida de la base de datos de la CONABIO.

Como se observa, en la zona sur poniente predomina el tipo Andosol, para la zona media el Durisol, el Andosol, el Luvisol y en algunas porciones pequeñas el tipo Cambisol y Phaeozem, para la zona noreste predomina el Regosol y el tipo Phaeozem.



**Figura 7. "Tipo de suelo de la presa Madín"**

Para poder observar de manera cuantitativa el área que ocupa cada tipo de suelo, se agregó la Tabla 2. En la segunda columna se muestra el área que ocupa cada tipo de suelo en km<sup>2</sup> y en la última columna el porcentaje que abarca de la misma.

**Tabla 2. "Área de cada tipo de suelo"**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Área en km2</b>	<b>% de área en la cuenca</b>
Andosol	50.45	50.79
Phaeozem	14.93	15.03
Luviosol	14.28	14.37
Durisol	9.66	9.72
Regosol	7.83	7.88
urbanización y cuerpo de agua	1.7	1.71
Cambisol	0.49	0.49
<b>Total</b>	<b>99.34</b>	<b>100.00</b>

### **2.3 Uso de suelo**

El uso de suelo que se presenta en la cuenca de la presa Madín principalmente es ecológico, florístico y fisionómico, el tipo de vegetación es de bosque de encino, oyamel, pino y pastizal inducido.

A pesar de esto, el uso de suelo se ha mantenido en continua transformación, pues la mancha urbana no ha detenido su crecimiento, y al mismo tiempo las zonas que ya se encontraban pobladas se han densificado en los últimos años.

Esta transformación ha modificado la superficie destinada a la agricultura temporal y de reserva ecológica, desde la parte alta hasta donde inicia la zona plana, pues la deforestación no sólo ha traído problemas de erosión en la zona con el consecuente azolvamiento del vaso y disminución de la capacidad almacenada, sino que además, ha modificado la velocidad de respuesta de la presa.

Por otro lado, la parte baja de la subcuenca no permite el desarrollo de la actividad agrícola, esto es debido a las características salitrosas del suelo, por lo que el uso de suelo es fundamentalmente habitacional y en menor medida, comercial e industrial.

### **2.4 Infraestructura hidráulica de los Estados aledaños**

La cuenca del valle de México cuenta con un sistema para la protección de las zonas agrícolas, industriales, urbanas y principalmente de la zona metropolitana. Este sistema está integrado por presas, vasos reguladores, túneles y canales, los cuales tienen como objetivo la prevención de posibles inundaciones. Una de las principales

presas pertenecientes a este sistema, es la presa Madín, la cual debido a su localización es una de las más importantes.

A pesar de esto, la presa no sólo se encarga de la protección de las posibles inundaciones a estas zonas, sino que como ya se ha mencionado, abastece de agua potable a un amplio sector del estado de México.

De los datos recabados de los planes de desarrollo de los municipios de Naucalpan de Juárez y Atizapán de Zaragoza se obtuvo información referente al aporte de la presa a dichos municipios.

#### **2.4.1 Naucalpan de Juárez**

*El suministro total de agua potable al municipio de Naucalpan de Juárez es de 83,071,754 m<sup>3</sup> al año, equivalentes a 2,634.18 litros por segundo (l/s). Y proviene de las siguientes fuentes:*

- *52,690,000 m<sup>3</sup> (1,670.78 l/s) corresponden de Agua en Bloque, es decir, que son suministrados por el Sistema Lerma-Cutzamala. Correspondiendo a un 63%.*
- *23,920,000 m<sup>3</sup> (758.50 l/s) de fuentes subterráneas o propias. Correspondiendo a un 29%.*
- *6,461,754 m<sup>3</sup> (204.90 l/s) de Presa Madín. Correspondiendo a un 8%.*

El servicio de agua cubre el 98% de viviendas en el municipio, es decir, éstas disponen de agua entubada. Se cuenta con líneas de alimentación del OAPAS y con infraestructura de conducción que opera la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM).

Sin embargo y a pesar de que la cobertura del agua es casi completa en el municipio de Naucalpan, la calidad y la dotación no lo son, pues la falta de mantenimiento preventivo y oportuno, así como la falta de un registro real y confiable son, entre otros, los factores que provocan fugas y pérdida del vital líquido (Plan de desarrollo municipal Naucalpan de Juárez, 2019).

#### **2.4.2 Atizapán de Zaragoza**

El municipio de Atizapán cuenta con dos presas: la presa San Juan y la Presa Madín, la primera sólo funciona como reguladora de los escurrimientos de la zona, mientras que la segunda controla las avenidas y abastece una parte del municipio.

Es importante mencionar que Atizapán de Zaragoza cuenta con dos tipos de fuentes de abastecimiento, una local y una externa. Las fuentes locales están

integradas por 35 pozos profundos que abastecen alrededor de 12,000,000 m<sup>3</sup> teniendo como principales fuentes de extracción los pozos: Emiliano Zapata, San Javier y López Mateos.

Las fuentes externas son operadas por la CAEM, se abastecen del sistema Barrientos, sistema Madín y sistema Cutzamala. En el año 2015 se suministró cerca del 75.23% a través de fuentes externas y el resto a través de fuentes locales.

Del porcentaje correspondiente a fuentes externas el 84.90% corresponde al sistema Cutzamala, el 8.76% proviene de la presa Madín y finalmente el 6.34% del sistema Barrientos (Plan de desarrollo municipal Atizapán de Zaragoza, 2016).

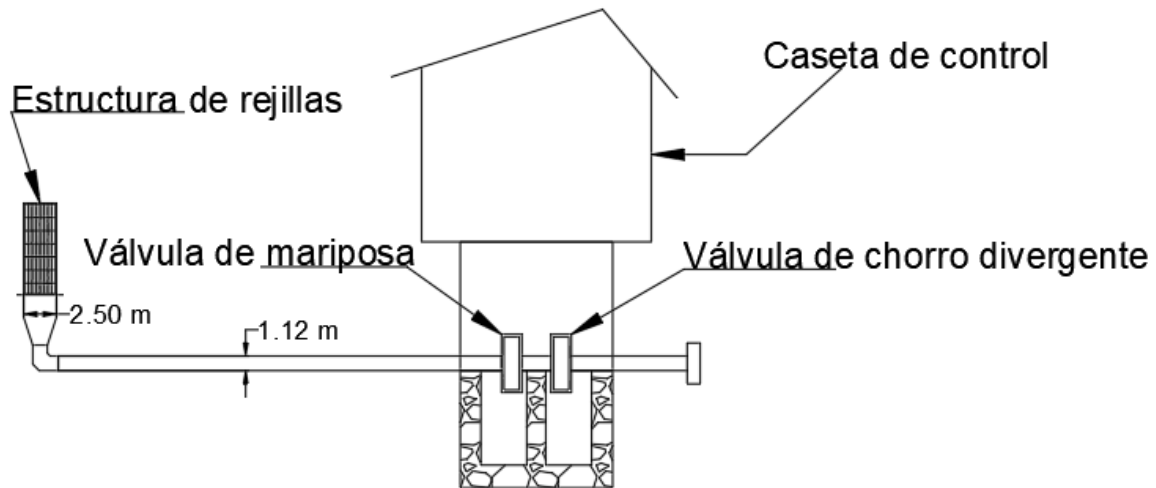
## **2.5 Características del embalse**

La primera presa que se construyó en Fuentes de Salitre recibía el nombre de presa Madín Castro y únicamente regulaba las avenidas del Río San Luis, posteriormente y sobre esta, se levantó la presa Madín, con la finalidad de poder almacenar y abastecer de agua potable al Estado de México. Los trabajos de construcción se concluyeron en los años 80.

La cortina de la presa está constituida por materiales graduados, tiene una altura aproximada de 77 m, cuenta con un corazón impermeable y simétrico de arcilla compactada, cubierto por una transición con producto de formación tarango, además cuenta con respaldo de rezaga y protección de enrocamiento en ambos lados, que es producto de bancos de andesitas.

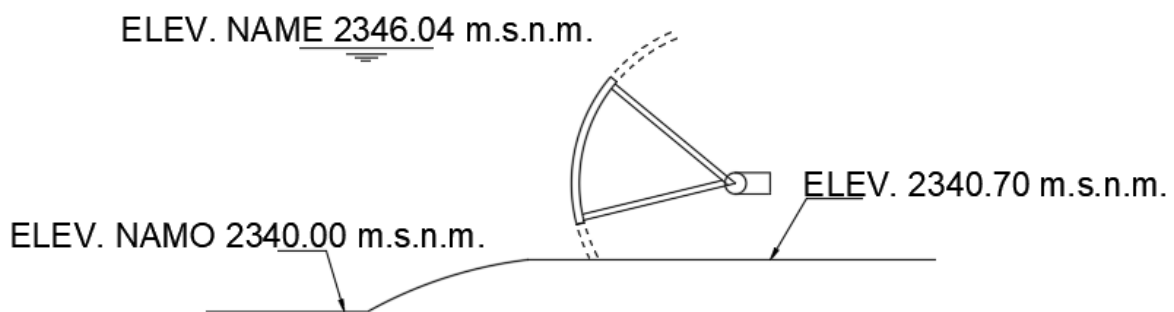
La capacidad de almacenamiento es de 14.5 hm<sup>3</sup> al nivel máximo extraordinario (2,346 m.s.n.m.), tiene una capacidad de 6 hm<sup>3</sup> para azolves, por lo que el nivel de aguas mínimo de operación se encuentra a los 2,312 m.s.n.m.; el nivel de aguas máximas de operación se encuentra a 2,340 m.s.n.m. y su corona a los 2,348 m.s.n.m., esta última cuenta con una longitud de 250 m y un ancho aproximado de 18 m.

La obra de toma se encuentra sobre la margen derecha y comienza con una estructura de rejillas que conduce el agua por una sección circular de 48", hasta llegar a la caseta de operación, donde es controlada por una válvula de emergencia (válvula de mariposa) y posteriormente por una válvula de chorro divergente (Figura 8). Posteriormente llega a la planta potabilizadora donde recibe un tratamiento secundario.



**Figura 8. "obra de toma" (Jiménez, 1985)**

Finalmente, las obras de excedencias cuentan con un canal de acceso a los 2,340 m.s.n.m. (Bravo 1995), la estructura de control aloja 3 compuertas radiales de 2.50 m de ancho y 4.10 m de alto (Figura 9) y son operadas por medio de mecanismos accionados a base de motor eléctrico. Aguas debajo de la estructura de control el canal de descarga conduce el agua hasta un tanque amortiguador de 38 m de longitud por 22 m de ancho y una profundidad de 8 m.



**Figura 9. "Compuertas radiales de la obra de excedencias" (Jiménez 1985)**

## 2.6 Operación y datos considerados

Durante los últimos años el incremento en la demanda de agua ha sido evidente, por lo que muchas regiones han desarrollado planes y estrategias para poder

gestionar el agua de una manera más eficiente, como lo es el caso de la presa Madín.

Actualmente la presa se encuentra extrayendo 0.5 m<sup>3</sup>/s durante todo el año, sin embargo y por razones de seguridad y de revisión del comportamiento de la cortina, la elevación del embalse (NAMO) se ha mantenido a 2,337.48 m.s.n.m. para los meses de estiaje, mientras que para la época de lluvias (de mayo a octubre) se mantiene a un nivel de 3332.56 m.s.n.m.

Es importante mencionar que los datos que se utilizaron para la elaboración de este trabajo fueron proporcionados por OCAVAM (Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México), los registros hidrométricos mensuales se obtuvieron principalmente de las estaciones San Luis y Calacoaya IV. Además de los registros, se proporcionaron las curvas elevación capacidades del embalse y la curva de áreas medias. Estas últimas resultado de estudios batimétricos.

Los registros que se tienen datan desde enero del año 1947, hasta diciembre del año 2018.

## Referencias

- Jiménez R. S. (1985) *“Revisión Hidrológica de la avenida de diseño de la Presa Madín, Edo de México”* Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Aragón. UNAM
- Castro M. I. (2012) *“Diagnostico de la Cuenca de la Presa Madín, Estado de México”* Tesis de maestría. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- H. Ayuntamiento Constitucional Atizapán de Zaragoza (2016) *“Plan de Desarrollo Municipal Atizapán de Zaragoza (2016 – 2018)”* (Gaceta Municipal No.29). [www.edomex.gob.mx](http://www.edomex.gob.mx)
- Ayuntamiento Naucalpan de Juárez (2019) *“Plan de Desarrollo Municipal Naucalpan de Juárez (2019 – 2021)”* (Gaceta especial No 4). [www.edomex.gob.mx](http://www.edomex.gob.mx)
- CONAGUA, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México (1999) *“Estudio Limnológico de la Presa Madín”* Informe final.
- CONAGUA – SEMARNAT (2018) *“Atlas del Agua en México”* [www.gob.mx/conagua](http://www.gob.mx/conagua)
- CONABIO (2002) *“Portal de Geoinformación 2020”* Catalogo de metadatos geográficos. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>



## CAPÍTULO III

### Metodología

En este capítulo se describe el proceso seguido para encontrar las políticas de operación óptimas para la presa Madín; dicho proceso inicia con un análisis de la cuenca, es decir se muestra el incremento de la población y la densificación de las zonas urbanas, posteriormente se mencionan los cambios que se generaron al uso de suelo de la zona y se verifican en el análisis del coeficiente de escurrimiento. Finalmente se mencionan los datos considerados y su análisis, además de los métodos utilizados para la optimización.

#### 3.1 Análisis de la cuenca en estudio

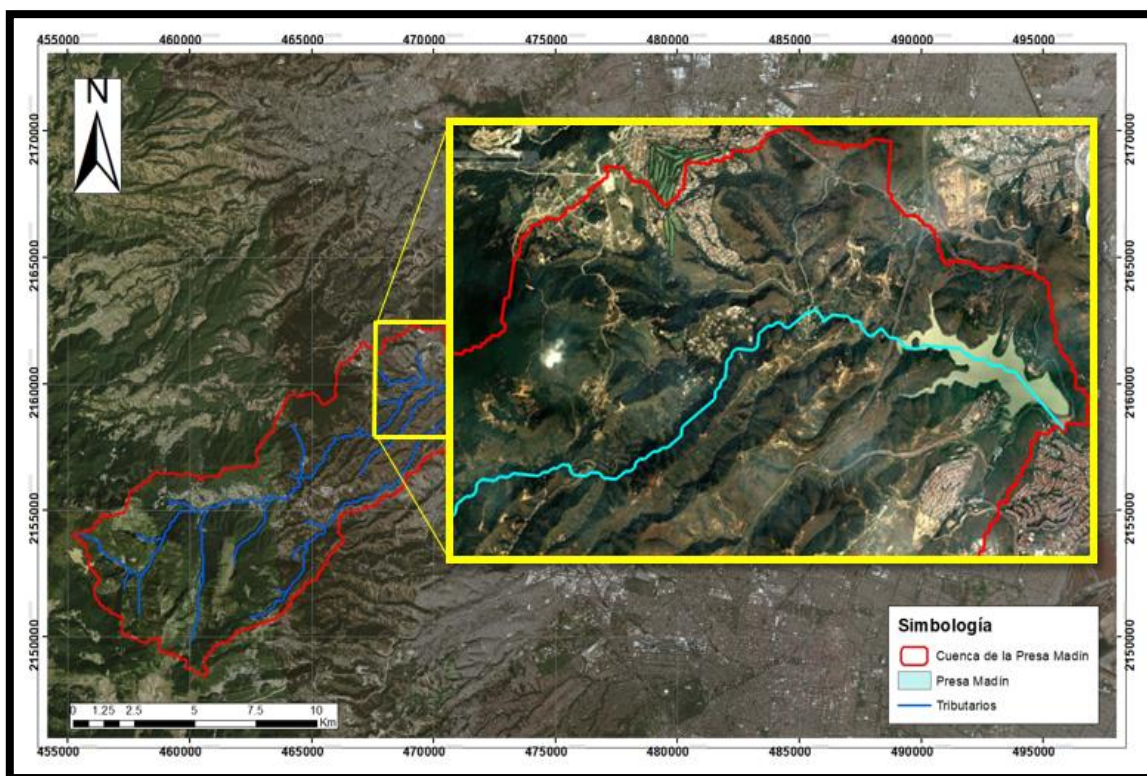
Para poder observar los principales cambios demográficos a través de los años, se llevó a cabo la consulta de información estadista poblacional, primero se analizaron los datos de los censos poblacionales, posteriormente se consultaron imágenes satelitales para el periodo de tiempo comprendido entre el 2000 y 2020, pues factores como el Incremento poblacional, la densificación de zonas ya urbanizadas y algunas acciones humanas como la deforestación, modifican la velocidad de respuesta de la cuenca.

De acuerdo con los datos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) y a través de los censos y conteos poblacionales (Tabla 3) se observó que a partir del año de 1990 el crecimiento poblacional de los municipios pertenecientes a la cuenca ha incrementado con el paso de los años.

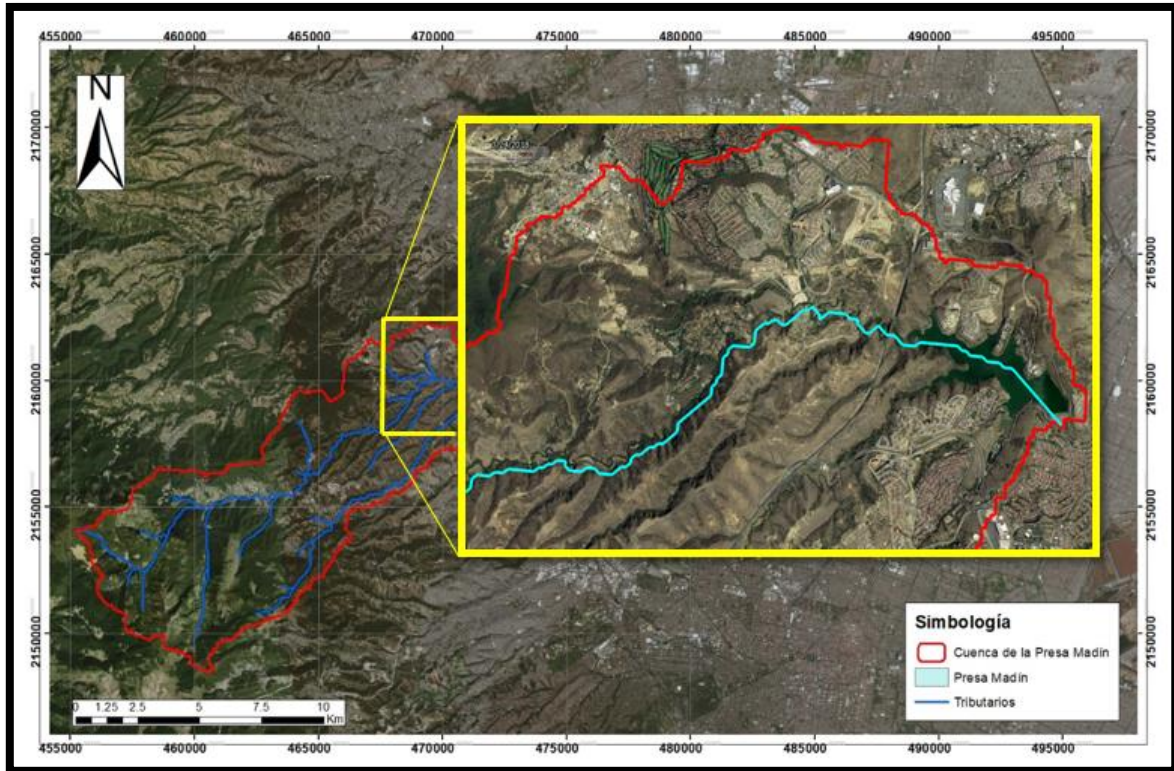
**Tabla 3. "Población municipal, INEGI"**

Municipio	Población				
	1990	1995	2000	2005	2010
Atizapán de Zaragoza	315,192	427,444	467,886	472,526	489,937
Jilotzingo	9,011	12,412	15,086	13,825	17,970
Naucalpan de Juárez	786,551	839,723	858,711	821,442	833,779
<b>Total</b>	<b>1,110,754</b>	<b>1,279,579</b>	<b>1,341,683</b>	<b>1,309,798</b>	<b>1,341,686</b>

A pesar de que este incremento no ha sido significativo, zonas aledañas a la presa han densificado su urbanización desde principios del año 2000 hasta la fecha (Figura 10 y Figura 11), esto implica que dichas zonas han reducido la capacidad de infiltración de la cuenca.



**Figura 10. “Densidad poblacional en 2003 (Google Earth)”**

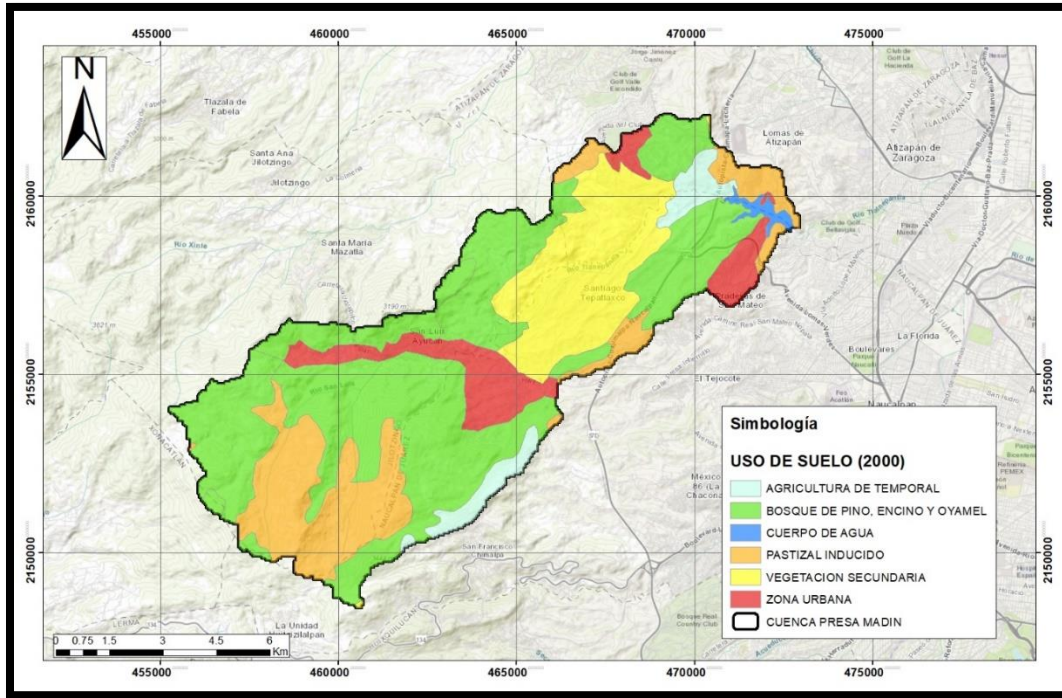


**Figura 11. “Densidad de poblacional en 2018 (Google Earth)”**

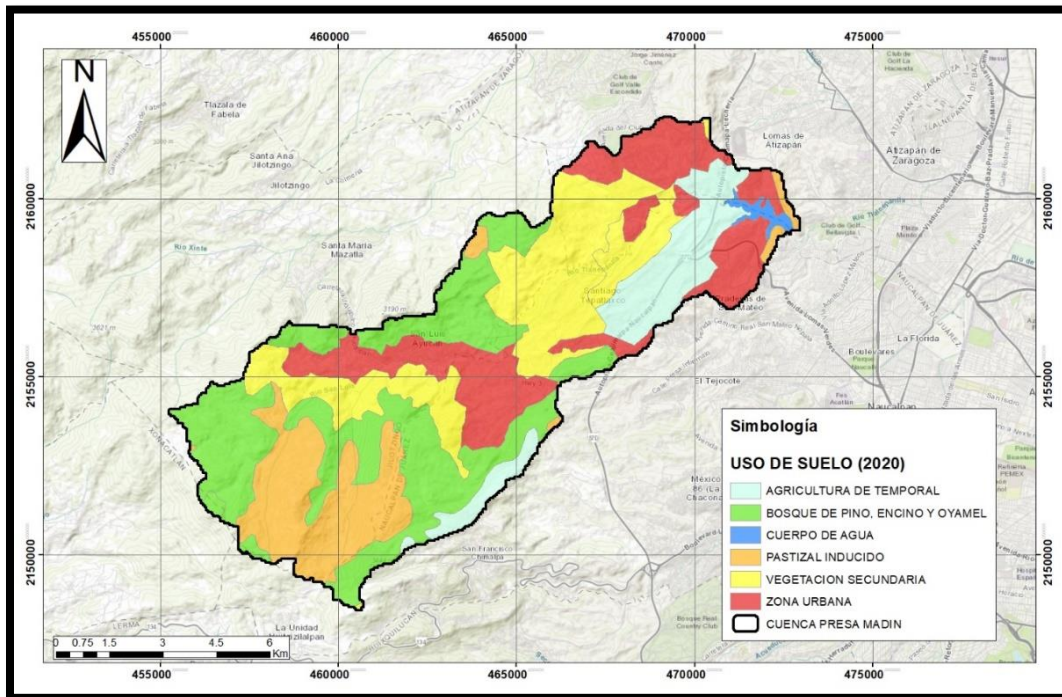
### 3.1.1 Evolución del uso de suelo

Como ya se ha mencionado, el incremento poblacional y la densificación, han generado un cambio importante en la respuesta de la cuenca, en otras palabras, se ha modificado el uso de suelo de la cuenca de la presa Madín, por lo que fue necesario estimar las áreas correspondientes a los distintos usos de suelo para el periodo de análisis comprendido entre el 2000 y el 2020, lo anterior fue posible con ayuda del mapa de uso de suelo con escala 1:250,000 para el año 2000 (Figura 12), que se encuentra disponible en la base de datos del INEGI.

Debido a que la información no se encuentra actualizada, se utilizaron imágenes satelitales para poder generar un mapa del uso de suelo para el año 2020, con el cual se obtuvo un aproximado de las áreas de los diferentes usos de suelo para ese año (Figura 13).



**Figura 12. “Uso de suelo de la cuenca Madín en el año 2000”**



**Figura 13. “Uso de suelo de la cuenca Madín en el año 2020”**

Como se logra apreciar en las figuras anteriores, el uso de suelo se ha modificado con paso del tiempo, y para poder representar de forma cuantitativa las áreas de influencia se agregó la Tabla 4 que a continuación se presenta.

**Tabla 4. “Áreas y porcentajes del uso de suelo para la cuenca de la presa Madín para los años 2000 y 2020”**

Uso de suelo	Uso de suelo (año 2000)		Uso de suelo (año 2020)	
	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%
Agricultura temporal	4.2	4%	10.42	10%
<b>Bosque de pino encino y oyamel</b>	<b>46.87</b>	<b>47%</b>	<b>29.67</b>	<b>30%</b>
Pastizal inducido	18.3	18%	14.94	15%
Vegetación secundaria	19.8	20%	23.07	23%
<b>Zona urbana</b>	<b>9.4</b>	<b>9%</b>	<b>20.47</b>	<b>21%</b>
Cuerpo de agua	0.77	1%	0.77	1%
<b>Total</b>	<b>99.34</b>	<b>100%</b>	<b>99.34</b>	<b>100%</b>

Es importante destacar que el crecimiento poblacional ha impactado directamente en el incremento de la zona urbana, pues esta pasó de 9.4 km<sup>2</sup> a 20.47 km<sup>2</sup>, es decir tuvo un incremento del 118% en 20 años. Por otro lado, la deforestación ha reducido el área de bosques presentes en la cuenca, pues pasó de 46.87 km<sup>2</sup> a 29.67 km<sup>2</sup>, esto es una disminución del 37% para el mismo periodo de tiempo.

### 3.1.2 Análisis del coeficiente de escurrimiento

Para poder analizar el cambio en la respuesta de la cuenca, producido por la transformación del uso de suelo, se utilizó el coeficiente de escurrimiento, pues nos permite conocer qué porcentaje de lo que llueve está escurriendo cada año, ya que no resulta el mismo escurrimiento en una zona urbana que en una zona donde no ha habido impacto del hombre.

Para poder asociar el coeficiente de escurrimiento con la cuenca en estudio se utilizó la ecuación 4 que a continuación menciona.

$$C_E = C_{NU} \frac{A_{NU}}{A_T} + 0.45 I_U \frac{A_U}{A_T} \quad (4)$$

Es importante mencionar que para este estudio se tomó un valor de  $C_{NU} = 0.10$  (Tabla 1), pues nuestra región, se encuentra al norponiente del Valle de México, es decir, en una región D, como lo muestra la Figura 3.

Debido a las condiciones de los desarrollos urbanos, se tomó un valor para el  $I_u = 0.8$  para el año 2000, sin embargo, este valor se tomó igual a 1 para el año 2020, pues la mancha urbana además de crecer se densificó.

Con los datos antes propuestos y con los valores de las áreas de los diferentes usos de suelo obtenidos de la Tabla 5, se compararon los coeficientes de escurrimiento de los años analizados, mostrando así, el cambio que este sufrió en un periodo de 20 años.

**Tabla 5. “Coeficientes de escurrimiento para los años 2000 y 2020”**

Coeficiente de escurrimiento						
Año	$I_u$	$C_{nu}$	$A_T$	$A_U$	$A_{Nu}$	Ce
<b>2000</b>	0.8	0.1	99.34	9.4	89.94	<b>0.12</b>
<b>2020</b>	1	0.1	99.34	20.47	78.87	<b>0.17</b>

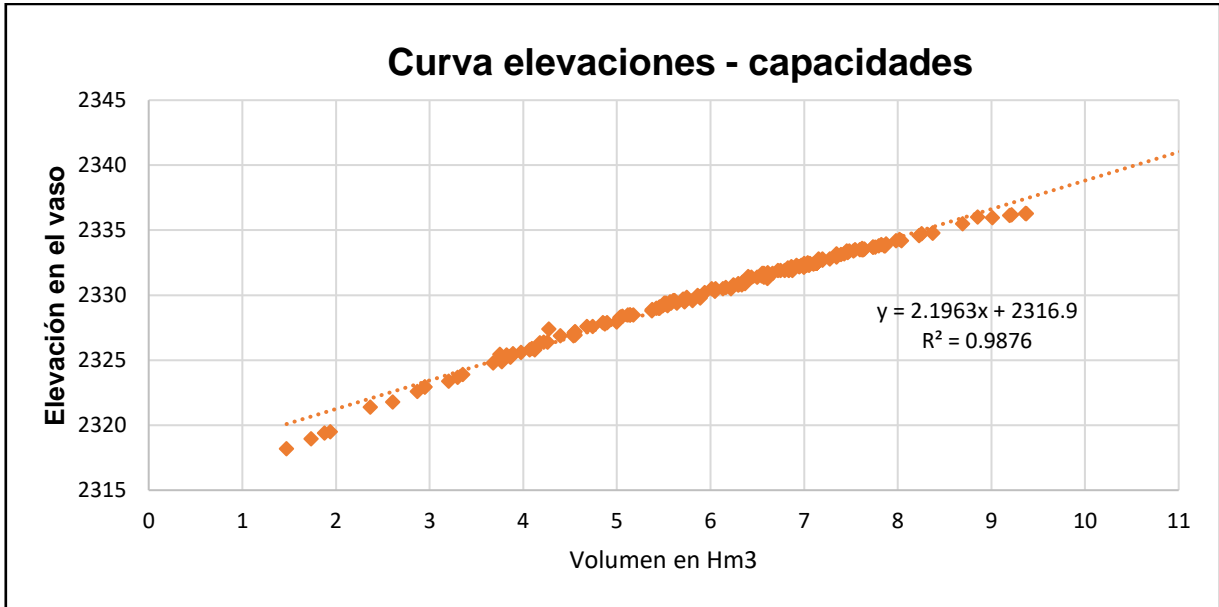
De la Tabla 5 se aprecia el cambio que sufrió el coeficiente de escurrimiento, pues pasó de 0.12 a 0.17, mostrando un incremento del 38%.

Por consecuente, al modificar el coeficiente de escurrimiento, el agua que solía infiltrarse se convierte en escurrimiento superficial, y así, llega cada vez más rápido al vaso de la presa. Lo anterior provoca que disminuya la capacidad de retención de las avenidas de mayor magnitud, pues la presa no tiene tiempo suficiente para almacenar y redistribuir el agua.

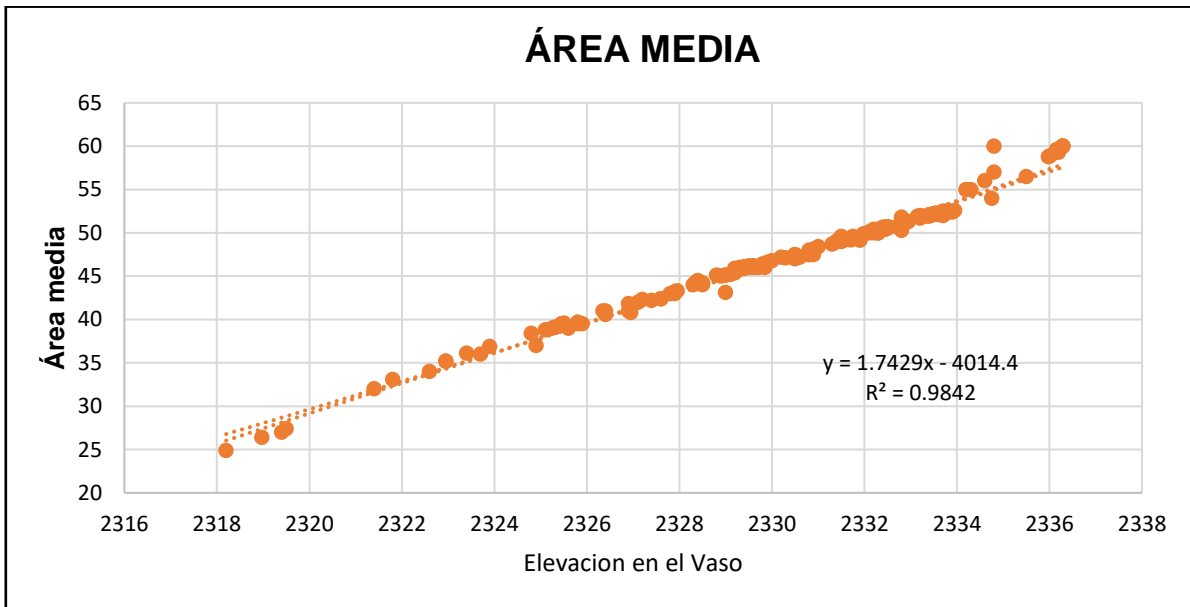
### 3.2 Análisis de la información disponible

Se cuenta con información hidrométrica desde enero de 1947 hasta diciembre de 2018, proporcionada por OCAVAM; esta información consta de los registros de los escurrimientos mensuales de entrada al vaso de la presa (Tabla 6) y de los niveles máximos alcanzados dentro del vaso para cada mes.

Además, se proporcionó la curva de elevaciones – capacidades (Figura 14), y la curva de área – elevaciones (Figura 15). La primera tuvo que ser ajustada debido a que algunos datos mostraban inconsistencia en el registro. Por otro lado, fue necesario obtener la regla de correspondencia de cada curva para poder extrapolar los datos faltantes.



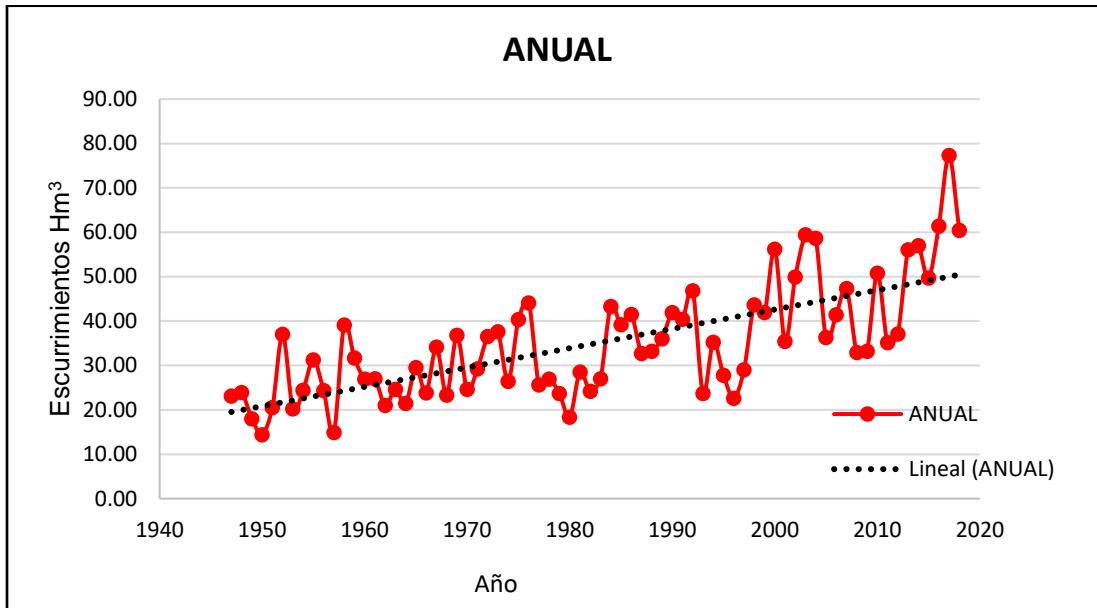
**Figura 14. “Curva elevaciones-capacidades de la presa Madín”**



**Figura 15. “Curva Área – Elevaciones”**

Con la información proporcionada, se observó que al graficar el total de los escurrimientos anuales la tendencia era creciente, es decir, que los escurrimientos han ido aumentando a través de los años, incluso se puede notar que a partir del

año 2000 el total de los escurrimientos es significativamente mayor en comparación con los años anteriores (Figura 16).



**Figura 16. “Escurrimientos totales anuales”**

**Tabla 6. “Registro histórico de escurrimientos en Hm3 para la presa Madín”**

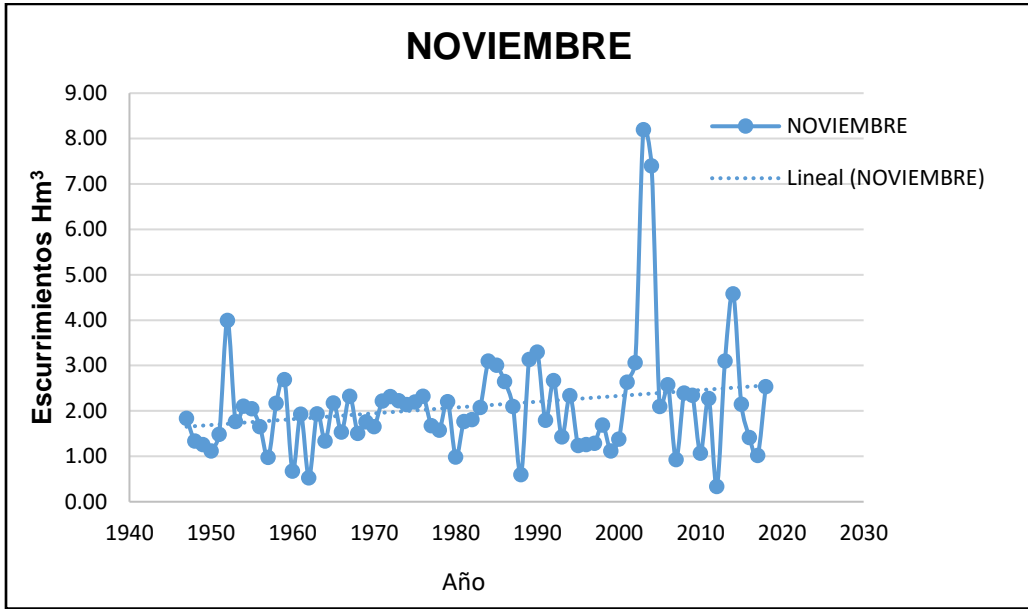
Registro histórico de escurrimientos en hm3 para la presa Madín													
Año	Total, anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1947	23.10	1.39	1.26	1.39	1.38	1.24	1.25	1.34	2.14	5.33	3.31	1.84	1.24
1948	23.90	1.29	1.07	0.97	1.08	2.16	1.69	5.63	3.14	2.73	1.47	1.34	1.33
1949	18.00	0.98	0.98	1.04	0.97	1.22	2.34	1.81	2.53	2.06	1.62	1.26	1.15
1950	14.40	1.08	0.95	0.94	0.93	1.15	1.02	1.81	1.20	1.42	1.72	1.12	1.07
1951	20.50	1.02	0.87	1.03	1.06	1.77	1.63	3.59	2.85	2.20	1.83	1.49	1.20
1952	37.00	1.05	0.90	0.91	0.97	1.28	5.22	4.16	4.00	7.90	4.73	4.00	1.85
1953	20.20	1.67	1.24	1.09	1.09	1.05	1.83	2.17	2.10	2.36	2.59	1.77	1.23
1954	24.40	1.12	0.89	0.88	1.02	1.28	1.98	1.90	2.14	3.66	5.81	2.11	1.57
1955	31.20	1.41	1.18	1.07	0.95	1.09	1.08	3.15	3.72	9.51	4.43	2.05	1.58
1956	24.30	1.32	1.12	1.08	1.08	1.50	1.92	3.96	2.54	4.06	2.47	1.66	1.54
1957	14.90	1.26	1.01	1.11	1.14	1.16	1.35	1.69	1.28	1.45	1.52	0.98	0.90
1958	39.10	1.22	0.94	0.92	0.88	1.86	1.43	6.98	4.60	13.04	3.03	2.17	2.01



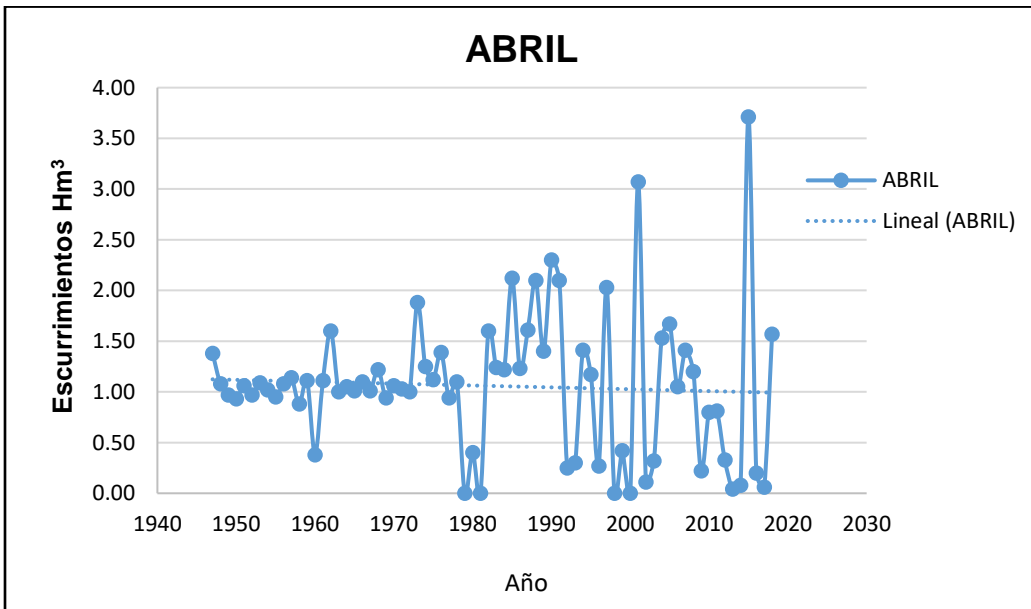
1959	31.70	1.39	1.19	1.14	1.11	1.38	2.25	4.16	3.94	2.61	8.67	2.69	1.16
1960	26.90	0.97	0.57	0.40	0.38	0.80	1.05	3.70	4.49	10.97	2.80	0.68	0.12
1961	27.00	1.39	1.19	1.14	1.11	1.38	3.32	3.25	3.18	4.63	2.90	1.93	1.61
1962	21.00	1.22	1.12	1.23	1.60	1.68	1.85	1.79	2.47	3.98	2.25	0.53	1.32
1963	24.60	1.22	1.06	1.16	1.00	2.05	1.41	3.29	3.92	2.64	3.36	1.94	1.51
1964	21.40	1.51	1.23	1.10	1.05	1.60	1.94	2.27	2.37	3.04	2.48	1.34	1.47
1965	29.50	1.49	0.99	1.00	1.01	1.18	1.76	2.50	6.59	5.82	3.37	2.18	1.61
1966	23.80	1.38	1.10	1.25	1.10	0.95	1.73	3.13	3.80	3.36	3.31	1.54	1.19
1967	34.10	1.35	1.23	1.10	1.01	1.32	1.38	1.53	4.58	10.79	5.48	2.33	1.98
1968	23.30	1.64	1.60	1.36	1.22	1.48	1.99	2.81	2.62	3.12	2.41	1.51	1.49
1969	36.80	1.38	1.15	1.05	0.94	0.95	2.01	1.92	9.91	11.48	2.66	1.76	1.59
1970	24.60	1.42	1.21	1.21	1.06	1.20	1.82	2.05	3.17	5.16	3.14	1.66	1.52
1971	29.20	1.34	1.02	1.05	1.03	1.13	1.99	2.86	5.47	4.29	4.92	2.22	1.87
1972	36.50	1.58	1.31	1.21	1.00	1.44	7.35	5.25	5.77	4.13	3.11	2.32	2.01
1973	37.60	1.68	1.41	1.33	1.88	1.51	1.74	3.84	10.33	6.61	3.14	2.23	1.83
1974	26.40	1.68	1.49	1.35	1.25	1.43	2.62	1.65	2.97	4.67	3.44	2.14	1.74
1975	40.30	1.95	1.56	1.37	1.12	1.64	3.75	5.17	6.36	9.84	3.43	2.20	1.95
1976	44.10	1.58	1.38	1.43	1.39	1.50	1.36	4.10	8.01	8.34	10.59	2.33	2.07
1977	25.60	1.85	2.03	1.49	0.94	1.10	1.61	2.28	2.23	5.59	3.09	1.68	1.73
1978	26.90	1.80	1.53	1.56	1.10	1.48	4.40	3.23	3.42	3.53	1.72	1.58	1.59
1979	23.70	1.77	1.44	1.65	0.00	1.98	1.69	2.08	2.12	3.83	2.77	2.21	2.15
1980	18.30	1.21	1.07	1.07	0.40	1.01	0.93	0.98	3.59	4.27	1.67	0.99	1.15
1981	28.50	0.45	2.07	0.30	0.00	0.12	1.23	7.15	3.52	5.03	5.60	1.77	1.25
1982	24.20	1.94	2.00	1.72	1.60	1.72	2.19	2.11	1.95	1.87	2.14	1.81	3.18
1983	27.00	1.75	1.56	1.49	1.24	1.60	2.08	3.10	3.66	4.11	2.38	2.08	1.94
1984	43.30	1.72	1.60	1.40	1.22	1.17	2.59	4.41	5.38	13.20	5.35	3.10	2.16
1985	39.20	2.25	2.05	2.14	2.12	1.54	4.04	6.37	3.79	4.42	4.96	3.01	2.55
1986	41.50	2.50	2.10	1.10	1.23	2.10	6.89	5.86	5.99	4.74	3.12	2.65	3.21
1987	32.70	2.04	1.86	1.95	1.61	1.20	2.60	3.60	5.00	4.60	3.60	2.10	2.50
1988	33.20	2.50	2.00	2.00	2.10	2.00	1.10	3.00	5.00	8.30	1.70	0.60	2.90
1989	36.00	1.00	2.00	2.20	1.40	1.80	2.40	3.60	7.99	7.19	3.27	3.14	0.00
1990	41.90	0.00	2.30	2.46	2.30	2.53	2.40	6.10	8.10	5.54	3.97	3.30	2.90
1991	40.40	2.50	2.18	2.24	2.10	1.59	1.64	11.76	3.70	3.98	5.76	1.80	1.10
1992	46.80	2.85	1.74	2.50	0.25	0.40	0.45	2.57	8.41	6.19	16.67	2.67	2.13
1993	23.70	1.22	0.53	0.41	0.30	0.11	1.32	4.39	3.59	6.74	2.89	1.43	0.76
1994	35.20	0.54	0.77	1.01	1.41	1.23	3.19	3.82	5.59	9.51	3.19	2.34	2.62
1995	27.80	1.61	1.52	1.92	1.17	1.50	2.19	3.34	5.97	3.84	2.62	1.24	0.84
1996	22.60	0.33	0.40	0.11	0.27	0.52	0.70	2.30	1.70	6.99	7.36	1.26	0.65
1997	29.00	0.37	0.50	0.14	2.03	6.15	1.23	6.51	1.67	6.27	1.99	1.29	0.85
1998	43.60	0.63	0.32	0.24	0.00	0.20	0.89	0.85	4.39	20.61	12.86	1.69	0.90

<b>1999</b>	41.90	0.76	0.47	0.67	0.42	0.22	1.34	3.47	11.36	18.14	3.22	1.12	0.73
<b>2000</b>	56.20	0.82	0.33	0.22	0.00	8.46	14.60	5.49	8.51	10.97	4.25	1.38	1.12
<b>2001</b>	35.40	0.95	0.49	1.45	3.07	0.79	4.15	4.73	4.41	6.79	5.02	2.64	0.91
<b>2002</b>	49.90	0.37	0.10	0.09	0.11	0.34	0.83	8.84	3.42	9.16	22.73	3.07	0.86
<b>2003</b>	59.40	1.97	1.51	0.38	0.32	0.29	5.45	6.80	12.64	12.76	7.69	8.20	1.34
<b>2004</b>	58.60	1.13	0.94	1.13	1.53	3.94	3.38	3.63	11.79	11.18	11.64	7.40	0.90
<b>2005</b>	36.30	0.85	1.48	2.56	1.67	1.42	1.72	4.80	7.40	6.25	4.17	2.10	1.88
<b>2006</b>	41.40	0.71	1.44	1.18	1.05	2.33	1.49	3.69	8.88	10.16	6.34	2.58	1.60
<b>2007</b>	47.30	1.48	0.72	1.19	1.41	2.39	3.27	7.73	7.38	15.12	4.59	0.93	1.04
<b>2008</b>	32.90	1.56	1.08	1.12	1.20	1.31	2.65	4.77	5.57	5.57	3.38	2.40	2.30
<b>2009</b>	33.20	0.84	0.47	0.51	0.22	1.15	1.73	1.36	2.63	15.46	4.11	2.35	2.34
<b>2010</b>	50.80	2.19	1.97	1.17	0.80	0.82	2.06	10.14	14.99	12.28	2.74	1.07	0.62
<b>2011</b>	35.10	1.18	1.47	1.22	0.81	0.23	1.11	4.88	7.05	10.29	4.05	2.28	0.55
<b>2012</b>	37.10	1.25	1.68	0.28	0.33	4.81	1.67	7.56	12.35	4.87	1.90	0.34	0.04
<b>2013</b>	56.00	0.09	0.00	0.08	0.04	0.15	1.38	4.76	6.05	31.49	7.90	3.10	0.95
<b>2014</b>	57.00	0.43	0.12	0.00	0.08	5.50	9.09	9.56	6.41	8.53	8.71	4.58	4.01
<b>2015</b>	49.70	1.11	0.76	0.90	3.71	3.95	2.05	6.89	3.24	18.27	5.39	2.15	1.23
<b>2016</b>	61.40	0.51	0.24	0.31	0.20	3.95	5.49	12.73	20.15	11.21	2.98	1.42	2.22
<b>2017</b>	77.30	3.92	0.79	0.81	0.06	6.44	1.83	6.40	11.31	33.68	10.29	1.02	0.70
<b>2018</b>	60.40	3.32	0.94	0.68	1.57	4.76	6.41	5.44	9.99	15.81	5.89	2.54	3.09

Sin embargo, al analizar los registros históricos de manera mensual, se identificó que para los meses de estiaje (Noviembre – Abril) no existe tendencia a crecer o decrecer, pues a pesar de que se presentan incrementos y disminuciones de los escurrimientos, estos no son significativos (Figura 17 y Figura 18).



**Figura 17. “Análisis de registros mensuales para el mes de Noviembre”**

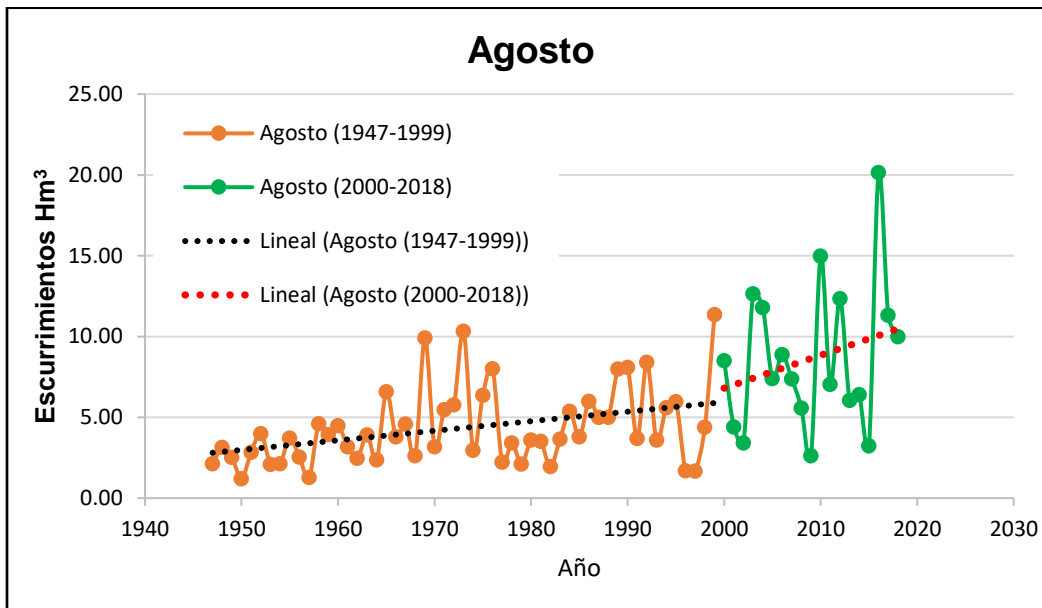


**Figura 18. “Análisis de registros mensuales para el mes de Abril”**

Las figuras anteriores muestran el mes de inicio y el mes de término del periodo considerado como época de estiaje.

Por otro lado, para los meses de lluvia (mayo – octubre) se observó una tendencia importante al aumento en los escurreimientos, ante este hecho se tomó el registro del mes que presentó la cantidad mayor de escurreimientos (Figura 19), donde fue

posible apreciar como la línea de tendencia incrementa significativamente a partir del año 2000.



**Figura 19. “Análisis de registros mensuales del mes con mayor cantidad de escurrimiento”**

Del análisis anterior se corroboró que los escurrimientos aumentan año con año, por lo que en los últimos años se han presentado derrames frecuentes en el vaso de la presa durante la época de lluvias, y es por tal motivo que se plantea la posibilidad de aprovechar los derrames como suministro de agua potable.

### 3.3 políticas de operación

Respecto a un sistema de aprovechamientos y cuya finalidad (para este caso) es proporcionar agua a una planta potabilizadora, es preciso determinar la política de asignación de agua (política de operación). Con el fin de aumentar al máximo los beneficios, es importante tomar en cuenta el carácter estocástico de los escurrimientos que entran al vaso, además de considerar que los escurrimientos varían continuamente en el tiempo, pues para las épocas de estiaje estos se ven reducidos, contrario a las épocas de lluvias, donde el agua fluye de manera abundante.

Por ello, se requiere de una revisión continua y sobre todo de una gestión correcta del recurso hídrico, pues en el análisis de aprovechamientos hidráulicos un problema importante es la determinación de las políticas de operación.

Las políticas de operación se definen como el conjunto de reglas que determinan la cantidad de volumen que es posible extraer en un periodo determinado, sin embargo, la decisión de extracción está influida por la forma en la que se presentan los escurrimientos, es decir, por el hecho de tratarse de una época de estiaje o una época de lluvias (Fuentes, 1987).

Para este trabajo se utilizó la información proporcionada por OCAVAM, que permitió la simulación del funcionamiento de la presa. Es importante recordar que durante el análisis de las políticas de operación se pretende evitar condiciones desfavorables, que afecten directamente el aprovechamiento del recurso, pues, por un lado, se busca aprovechar los derrames provocados en época de lluvias y por el otro, se pretende evitar el desabasto de agua en época de estiaje.

### 3.3.1 Políticas de operación uniformes

Como ya se ha mostrado, los escurrimientos presentan cambios año con año, además, son provocados por distintos factores, por lo que no es posible determinar con certeza su valor para el futuro. Por tal motivo, se realizó una simulación de las extracciones a partir de los escurrimientos históricos proporcionados.

El primer análisis se realizó proponiendo diferentes escenarios, los cuales consisten en fijar las extracciones, es decir, asignar un valor constante para todo el año.

Se propusieron 10 escenarios distintos, tomando como base el escenario propuesto por OCAVAM, el cual asigna una extracción menor para los meses de estiaje (0.5 m<sup>3</sup>/s), en comparación con los meses de lluvia (1 m<sup>3</sup>/s), en otras palabras, pretende extraer el doble de agua para los meses de lluvia (Tabla 7).

**Tabla 7. "Extracciones mensuales en m<sup>3</sup>/s, propuestas para distintos escenarios"**

Escenario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Base</b>	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.50
<b>1</b>	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
<b>2</b>	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
<b>3</b>	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
<b>4</b>	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
<b>5</b>	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
<b>6</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>7</b>	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
<b>8</b>	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
<b>9</b>	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3

### 3.4 Simulación del comportamiento del embalse

Una vez propuestas las extracciones continuas, se requiere conocer el comportamiento de la presa para el periodo de registros proporcionados, con la intención de identificar las condiciones que se presenten en el embalse.

Es importante mencionar que la finalidad del análisis es evitar las dos condiciones no deseadas: déficit y derrame. Por lo que a continuación se definen:

**Déficit:** Se considera un déficit cuando los volúmenes de entrada y el almacenamiento en el vaso del estado final anterior no son suficientes para satisfacer las demandas de agua (extracciones), por lo que el nivel de aguas resultaría menor que el NAMINO (Nivel de Aguas Mínimas de Operación).

**Derrame:** Se presenta cuando el volumen de ingreso es mayor que la capacidad de almacenamiento del vaso, y las extracciones programadas no son suficientes para mantener el nivel por debajo del NAMO (Nivel de Aguas Máximas Ordinarias de Operación). En otras palabras, el derrame se presenta cuando el nivel de aguas sobrepasa el NAMO.

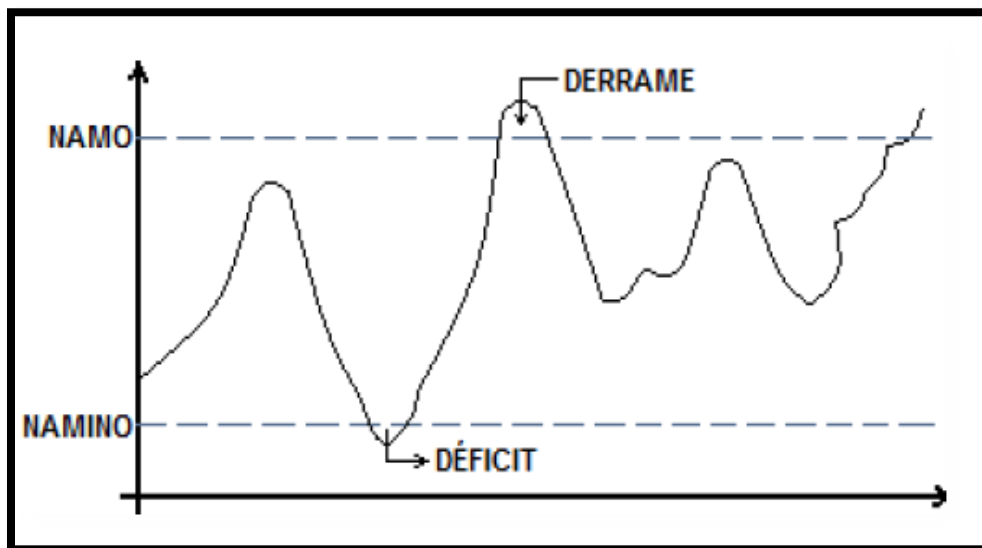


Figura 20. "Condiciones no deseadas para el embalse" (Arallely, 2010)

#### 3.4.1 Funcionamiento del vaso

Para poder llevar a cabo la simulación, es necesario conocer el estado inicial y final del embalse para un periodo de tiempo determinado. La ecuación fundamental para llevar a cabo este proceso es la ecuación de continuidad, la cual se presenta de manera generalizada en la siguiente expresión.

$$E - S = \Delta V \quad (5)$$

Donde:

$E$ .- Volumen de entradas al vaso durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ .

$S$ .- Volumen de salidas del vaso durante el mismo intervalo de tiempo.

$\Delta V$ .- Variación de volumen almacenado para el mismo periodo de tiempo

El intervalo de tiempo  $\Delta t$  está en función del tamaño del vaso que se analiza, para este caso ese intervalo de tiempo será de un mes, sin embargo, para vasos muy grandes incluso pueden ser periodos hasta de un año, sin sobrepasar este valor.

Las entradas al vaso se desglosan a continuación:

$$E = E_{cp} + E_t + E_{ll} \quad (6)$$

Donde:

$E_{cp}$ .- Entradas por cuenta propia

$E_t$ .- Entradas por transferencia de otras cuencas

$E_{ll}$ .- Entradas por lluvia directa al vaso

a) *Entradas por cuenta propia ( $E_{cp}$ )*

Son volúmenes de escurrimiento superficial de los que no se tiene control y que se producen dentro de la cuenca, además descargan directo a la presa. Estos volúmenes se pueden cuantificar por medio de las estaciones hidrométricas de la zona.

b) *Entradas por transferencia de otras cuencas ( $E_t$ )*

Estos volúmenes provienen de las presas situadas aguas arriba de la presa en cuestión.

c) *Entradas por lluvia directa sobre el vaso ( $E_{ll}$ )*

Es el volumen de lluvia que cae directamente sobre el vaso. Los aparatos de medición registran esta lluvia en volumen por unidad de área, es decir altura de precipitación ( $hp$ ), por lo que para poder cuantificar este volumen es necesario

multiplicar la altura de precipitación por el área de la superficie libre del vaso, en promedio, para el intervalo de tiempo  $\Delta t$ :

$$E_{ll} = h_p \bar{A} \quad (7)$$

Donde:

$h_p$ .- Es la altura de precipitación

$\bar{A}$ .- Es el área media del vaso en el periodo  $\Delta t$

Las salidas del vaso se desglosan a continuación:

$$S = S_d + S_e + S_i + S_{de} \quad (8)$$

Donde:

$S_d$ .- Volumen extraído

$S_e$ .- Volumen Evaporado

$S_i$ .- Volumen infiltrado en el vaso

$S_{de}$ .- Volumen derramado

a) *Volumen extraído ( $S_d$ )*

Para este caso es el volumen de extracción propuesto para cada mes del año.

b) *Volumen evaporado del vaso ( $S_e$ )*

Es el volumen que se evapora para el mismo periodo de tiempo, se calcula de manera similar al de la lluvia directa sobre el vaso:

$$S_e = h_{ev} \bar{A} \quad (9)$$

Donde:

$h_{ev}$ .- Es la lámina de evaporación

$\bar{A}$ .- Es el área media del vaso en el periodo  $\Delta t$

c) *Volumen infiltrado en el vaso ( $S_i$ )*

Es el volumen que se infiltra en el vaso, en general es un valor muy pequeño, aunque si se estima lo contrario es necesario realizar un estudio geológico



detallado. Para este estudio su valor se desprecia, ya que su valor es mínimo (Aparicio, 1992).

*d) Volumen derramado ( $S_{de}$ )*

Es el volumen que sale por la obra de excedencias como resultado de la simulación.

Para poder iniciar la simulación fue necesario fijar los datos de entrada al vaso, los cuales fueron determinados a partir de la información proporcionados por OCAVAM, y se muestran a continuación (Tabla 8):

**Tabla 8. “Consideración de la elevación del NAMO para los diferentes meses del año”**

Mes	NAMO (msnm)	NAMO en hm <sup>3</sup>
Enero	2337.48	9.37
Febrero	2337.48	9.37
Marzo	2337.48	9.37
Abril	2337.48	9.37
Mayo	2332.56	7.13
Junio	2332.56	7.13
Julio	2332.56	7.13
Agosto	2332.56	7.13
Septiembre	2332.56	7.13
Octubre	2332.56	7.13
Noviembre	2337.48	9.37
Diciembre	2337.48	9.37

**Tabla 9. “Información de entrada para la simulación”**

Capacidad Muerta	0.42 hm <sup>3</sup>
Elevación inicial	2336.29 msnm
Almacenamiento inicial	9.37 hm <sup>3</sup>
Área inicial	70 ha
NAMINO	2312.2 m

Como se logra observar en la tabla 8, se consideran dos elevaciones del NAMO para las diferentes épocas del año.

Además de la información anterior se necesitaron los datos de la Tabla 6 y de la Tabla 7, la primera nos proporciona los registros históricos de los volúmenes de entrada al vaso y la segunda la información de las extracciones mensuales para cada uno de los escenarios, por lo que el análisis que se presenta se llevó a cabo tantas veces como número de escenarios propuestos.

Una vez proporcionados los datos de entrada se continuó con el proceso, el cual se resume en la Tabla 10, donde se muestra la simulación para el año 1952 de registro y para el primer escenario (propuesto por OCAVAM), únicamente tomado para ejemplificar el proceso.

**Tabla 10. “simulación del vaso para el primer año de registro”**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Año	Mes	Vol. entrada	Elev. en el vaso	Extra.	Balan. hidro.	Alm. en el vaso	Área media	Precip. en el vaso	Evap.	Derrame o déficit	Extra. Edo. Mex 0.5 m3/s
1952	En	1.05	2317.21	1.3392	0.14	0.42	25.47	0.002	0.028	-0.28	1.34
	Feb	0.9	2317.08	1.2096	0.08	0.42	24.27	0.002	0.032	-0.34	1.21
	Mar	0.91	2316.79	1.3392	-0.05	0.42	24.03	0.003	0.046	-0.47	1.34
	Abr	0.97	2314.18	2.592	-1.24	0.42	23.53	0.007	0.045	-1.66	1.30
	Ma	1.28	2314.70	2.6784	-1.00	0.42	18.98	0.012	0.035	-1.42	1.34
	Jun	5.22	2323.59	2.592	3.05	3.05	19.89	0.030	0.031	0.00	1.30
	Jul	4.16	2326.87	2.6784	4.54	4.54	35.39	0.061	0.048	0.00	1.34
	Ago	4	2329.80	2.6784	5.87	5.87	41.11	0.066	0.055	0.00	1.34
	Sep	7.9	2341.48	2.592	11.19	7.13	46.21	0.074	0.061	4.06	1.30
	Oct	4.73	2336.99	2.6784	9.15	7.13	66.57	0.043	0.077	2.02	1.34
	Nov	4	2338.45	1.296	9.81	9.37	58.74	0.038	0.059	0.44	1.30
	Dic	1.85	2338.55	1.3392	9.86	9.37	61.29	0.040	0.061	0.49	1.34

En la columna 1 y 2 se muestra el *año* y *mes* de análisis.

En la columna 3 “*Volumen de entrada*” se muestra el escurrimiento registrado para ese mes en hm<sup>3</sup>.

En la columna 4 “*Elevación en el vaso*” se tiene la elevación del vaso en función de la columna 7, tomando como punto de partida la elevación inicial mostrada en la tabla 9. Esta columna está asociada con la curva elevaciones capacidades.

La columna 5 “*Extracción*” muestra la extracción para cada escenario en  $\text{hm}^3$ . En este caso se muestran los datos para el escenario base propuesto por OCAVAM.

En la columna 6 “*Balance hidrológico*” se recurre a la ecuación de continuidad, se lleva a cabo la adición y la extracción de entradas y salidas, respectivamente. Se comienza el cálculo con el *almacenamiento en el vaso* (columna 7) del mes anterior, con la finalidad de conocer la situación “actual” del vaso. Posteriormente acciones como la evaporación y la extracción le restan volumen al embalse y eventos como la lluvia directa, y el escurrimiento que llega al vaso, incrementan su volumen.

En la columna 7 “*Almacenamiento en el vaso*” se condiciona el estado del vaso para los distintos niveles, es decir se identifica a que elevación puede o no estar el nivel del vaso, en otras palabras, el nivel no puede estar por debajo del NAMINO y por arriba del NAMO, en esta columna es donde se restringen valores menores o mayores a los mencionados.

La columna 8, muestra el área media para cada mes de análisis, obtenida a partir de la regla de correspondencia de la curva áreas–elevaciones proporcionadas.

La columna 9 “*precipitación en el vaso*” presenta la precipitación directa en el vaso para el mismo intervalo de tiempo, obtenida en función del área media.

Para la columna 10 “*Evaporación*” se tiene la evaporación que se presentada para el mes correspondiente, y al igual que la precipitación está en función del área media.

En la columna 11 “*Derrame o déficit*” se revisó la condición final del vaso, en donde se identifican los derrames y déficits para cada intervalo de tiempo (mensual) en  $\text{hm}^3$ . Se obtuvo de la diferencia entre el balance hidrológico y el almacenamiento en el vaso. Los déficits se representan con números negativos y en color rojo, mientras que los derrames son positivos y de color verde.

La columna 12 “*Extracción para el Estado de México*”, muestra la extracción constante de 0.5 m/s para cada mes del año, es decir es la multiplicación de la extracción por el número de segundos que tiene el día y por los días que tiene cada mes.

### **3.5 Optimización de las políticas de operación**

A lo largo de la historia y desde el comienzo de la revolución industrial, el mundo se ha visto impulsado por un crecimiento importante en el tamaño y complejidad de las organizaciones, por lo que se volvió más complicado asignar los recursos disponibles a las diferentes actividades de una manera más eficaz.

Esta situación propició el surgimiento de la investigación de operaciones, la cual comenzó intentando emplear el método científico a la administración de recursos en

una empresa. Sin embargo, los inicios de esta actividad son atribuidos a ciertos servicios militares al inicio de la Segunda Guerra Mundial (S. Hillier, 2010).

La característica principal de la investigación de operaciones es que intenta encontrar la solución óptima que resuelva el problema en cuestión, por lo que ha sido aplicada en áreas muy diversas como la manufactura, transporte, recursos hídricos, telecomunicaciones y servicios públicos, entre otros, dado que su aplicación es sumamente amplia.

En general el proceso comienza con la observación y formulación del problema, esto implica la recolección de datos pertinentes. El siguiente paso es la construcción de un modelo matemático, con el cual se intenta abstraer la esencia del problema real. En esta etapa es necesario hacer la hipótesis de que el modelo es una representación precisa de las características principales de la situación. Finalmente se verifica la hipótesis y de ser necesario se modifica, paso que se conoce como validación del modelo.

Los problemas de optimización, buscan maximizar o minimizar los valores resultantes de funciones reales que retratan ciertos sistemas o procesos, para conseguirlo se han creado y aplicado diferentes métodos y técnicas, que aportan rapidez y eficacia (Padilla, 2017).

Actualmente existe una gran diversidad de métodos de optimización para la resolución de problemas ingenieriles, los cuales pueden ser aplicados respetando la metodología y condiciones que cada uno establece. Herramientas como la programación lineal, la programación dinámica, la programación no lineal (por mencionar algunas), permiten la resolución de ciertos problemas característicos, por lo que es importante considerar el tipo de objetivo que se busca optimizar, pues algunos métodos pueden ser aplicados a sistemas de generación de energía eléctrica pero no a aquellos destinados al control de avenidas y viceversa.

### **3.5.1 Programación lineal**

La programación lineal es un procedimiento basado en algoritmos matemáticos, formulado por ecuaciones lineales. Su objetivo principal es optimizar una función también lineal, llamada función objetivo.

La optimización se lleva a cabo minimizando o maximizando la función objetivo y considerando las variables involucradas en la representación del problema, pues estarán sujetas a una serie de restricciones que serán expresadas mediante un sistema de inecuaciones o desigualdades lineales.

Para poder solucionar un problema mediante programación lineal, primero se debe obtener toda la información posible acerca de las características de dicho problema. (Martínez, 2009)

El modelo consiste en determinar los valores de  $x_1, x_2, \dots, x_n$  para:

$$\text{Maximizar / minimizar } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Sujeta a las restricciones:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq, \geq \text{ ó } = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq, \geq \text{ ó } = b_2$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq, \geq \text{ ó } = b_m$$

Donde:

Z.- Valor de la medida global de desempeño (función objetivo)

$x_j$ .- Actividad o proceso (para  $j=1, 2, \dots, n$ ).

$c_j$ .- Valores conocidos (precio neto, costo unitario, según sea el caso).

$b_i$ .- Cantidad de recurso disponible para asignarse a las actividades (Para  $i=1, 2, \dots, m$ )

$a_{ij}$ .- Cantidad de recurso consumido por cada proceso o actividad  $j$ .

Para cada tipo de problema es importante mencionar todas las condiciones implícitamente establecidas por la naturaleza de las variables, es decir que estas no puedan ser negativas o que deban ser enteras según sea el caso.

$$x_1, \dots, x_n \geq 0$$

$$x_1, \dots, x_n \in \text{Enteros}$$

Como el modelo se plantea para tomar decisiones sobre las actividades, las variables que los representan ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) reciben el nombre de variables de decisión.

Debido a que muchos problemas prácticos pueden representarse como problemas donde sus variables se relacionen de manera lineal, es muy demandada en el campo de la ingeniería, ya sea para aumentar al máximo los ingresos o reducir al mínimo los costos de un proyecto dado.

### 3.5.2 Programación no lineal

Como ya se mencionó, un supuesto importante de la programación lineal es que todas sus funciones son lineales, sin embargo, muchas veces este supuesto no se cumple, por lo que es necesario manejar problemas de programación no lineal.

De manera similar a la programación lineal la programación no lineal consiste en encontrar los valores de  $x_1, x_2, \dots, x_n$  para:

$$\text{Maximizar / minimizar } f(x),$$

Sujeta a:

$$g_i(x) \leq, \geq \text{ ó } = b_i \quad \text{Para } i = 1, 2, \dots, n$$

y

$$x \geq 0$$

Donde  $f(x)$  y  $g_i(x)$  son funciones dadas de  $n$  variables de decisión.

Existen muchos tipos de problemas de programación no lineal, los cuales dependen de las características de las funciones  $f(x)$  y  $g_i(x)$ , por lo tanto, no se dispone de un algoritmo general que resuelva los diferentes tipos de funciones, es por ello que se han desarrollado algunos algoritmos para ciertos tipos de problemas de programación no lineal (S. Hillier, 2008). Algunos de los cuales se mencionan a continuación.

- Optimización no restringida
- Programación cuadrática
- Programación convexa
- Programación separable
- Programación no convexa

En algunos casos la función objetivo que se obtiene es lineal, sin embargo ciertos factores introducen una no linealidad en el problema, un ejemplo de esto es el comportamiento de algunas curvas en donde factores como la demanda, la experiencia o el precio varían de forma no proporcional a la función.

### 3.5.3 Uso de hojas de cálculo

La importancia de resolver problemas de optimización ha generado la introducción de herramientas de optimización más sofisticadas como son las hojas de cálculo y

sus complementos. Un ejemplo de estas herramientas es Microsoft Excel® que cuenta con un complemento denominado *Solver*.

Esta herramienta es capaz de determinar el valor óptimo (máximo, mínimo o exacto) para una función objetivo, ubicada en una celda denominada celda objetivo, la cual está sujeta a distintas restricciones ubicadas en otras celdas de la hoja de cálculo, donde además existen celdas denominadas celdas de variables de decisión (incógnitas), las cuales van cambiando hasta encontrar la solución óptima.

Generalmente formular y resolver modelos de programación no lineal es más complejo que para los modelos lineales, sin embargo, algunas ocasiones se pueden representar de manera más simple. Por otro lado, es muy importante tener en cuenta que la resolución de un problema lineal y uno no lineal difiere bastante. (Padilla, 2020)

Cuando se formula un problema lineal en una hoja de cálculo (por ejemplo, Excel), significa que las funciones que se están usando para expresar las fórmulas en las celdas de salida, solo incluyen sumas o productos de un número y una celda cambiante. Si cualquier celda de salida implica la multiplicación o división de celdas cambiantes o usa una función distinta a SUM o SUMPRODUCT (como ROUND, ABS, IF, MAX, MIN, SQRT etc.) entonces el modelo obtenido en general no será lineal (Lieberman, 2010).

### 3.5.3 Gradiente Reducido Generalizado No Lineal (GRG Nonlinear)

Solver de Microsoft Excel® permite elegir el método de solución y aunque de manera predeterminada selecciona “*GRG Nonlinear*” para los modelos no lineales, cuenta, además, con el método “*Simplex LP*” utilizado en problemas lineales y con el método “*Evolutionary*” para resolver problemas lineales con enteros.

El algoritmo de optimización no lineal (*GRG Nonlinear*) es un proceso de resolución de igualdades y/o desigualdades sujetas a un conjunto de restricciones con una función objetivo a optimizar. Se puede describir como un movimiento o salto hacia una dirección de la región factible, de tal forma que el valor de la función objetivo mejore; el proceso es iterativo hasta que no exista una región factible para mejorar la función o si el potencial para tal mejora es arbitrariamente pequeño (Padilla, 2020).

El procedimiento se describe de manera detallada a continuación:

- *El algoritmo comienza analizando un punto factible, para el cual se calcula el gradiente reducido; se designan las variables independientes seleccionando valores controlables, cuyas componentes de dirección de búsqueda se establecen a partir del gradiente reducido.*

- Posteriormente se calculan las variables dependientes y los componentes de dirección de búsqueda de dichas variables.
- Los componentes de dirección forman una región dentro de la cual se escogen algunos valores, las nuevas variables dependientes e independientes se calculan como la suma de los valores originales más un gradiente de avance en la dirección de búsqueda.
- Luego se evalúan todos los nuevos valores utilizando la función objetivo; si se cumple el número de generaciones fijada, se selecciona el valor óptimo y el algoritmo finaliza, de lo contrario dado que no todos los nuevos valores satisfacen la función objetivo se utiliza el método de Newton para volver a la región factible.
- Si los nuevos valores son factibles, pero no mejoran la función objetivo, se calculan nuevas variables dependientes e independientes; si los valores son factibles y también mejoran la función objetivo, esos valores se convierten en el nuevo punto de partida; por el contrario, si los valores no son factibles, se realiza un cambio de base para iniciar el proceso desde un punto de partida completamente nuevo.

Es importante no perder de vista que las soluciones encontradas por el algoritmo pueden tratarse de óptimos locales que no necesariamente pueden ser el óptimo global (Figura 21), además los valores de los óptimos locales dependerán del punto de partida, esto significa que las soluciones pueden cambiar según varíen los valores iniciales (Padilla, 2020).

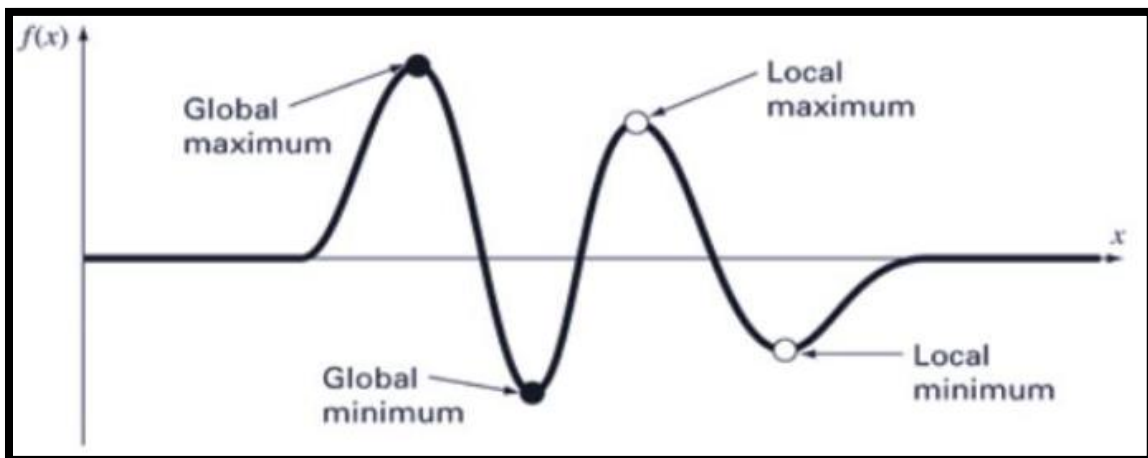


Figura 21. "Óptimos locales y óptimos globales" (Padilla, 2020)



### 3.5.4 Función objetivo

La optimización del funcionamiento del vaso, tiene como principal objetivo, reducir tanto los déficits como los derrames que se pudieran presentar en la simulación llevada a cabo con los registros históricos, por lo que para poder optimizar las políticas de extracción fue necesario definir una función objetivo (FO), que a continuación se presenta:

$$FO_1 = k * |Def_T| + Der_T \quad (10)$$

Donde:

$k$ .- Es el coeficiente de penalización al déficit, para este caso se consideró  $k = 5$ .

$|Def_T|$ .- Es el valor absoluto del volumen del déficit total para cada periodo.

$Der_T$ .- Es el volumen del derrame total obtenido en el año.

Sin embargo, para poder asegurar la extracción continua del estado de México, se definió otra función objetivo, donde se agregó y penalizó el término del déficit total en el estado de México.

$$FO_2 = (k * |Def_{TEdoMex}|) * |Def_T| + Der_T \quad (11)$$

Donde:

$k$ .- Es el coeficiente de penalización al déficit, para este caso se consideró  $k = 10$ .

$|Def_{TEdoMex}|$ .- Es el valor absoluto del volumen del déficit únicamente para suministro de agua del estado de México.

$|Def_T|$  Es el valor absoluto del volumen total del déficit.

$Der_T$  Es el volumen del derrame total obtenido.

Ambas funciones penalizan el déficit, pues es importante tener en cuenta que la presa ya suministra una determinada cantidad de agua al Estado de México, por lo que es necesario asegurar el este abastecimiento ( $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Para optimizar las extracciones se utilizó la herramienta de *Solver* donde se minimizaron ambas FO propuestas definiendo límites de extracción mensuales como se muestra en la tabla 3.5.

Como ya se mencionó, la optimización de la función objetivo busca obtener extracciones de modo tal que los déficits y derrames sean los mínimos posibles, por

otro lado, es importante considerar la extracción continua que suministra al estado de México, por ello, fue necesario definir los límites mínimos de extracción para cada mes, por lo que se definió un límite inferior igual a 0.5 m<sup>3</sup>/s. Para mostrar los límites superiores se presenta la siguiente tabla.

**Tabla 11. “Límite superior y límite inferior para la optimización”**

<b>Mes</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>
<b>Enero</b>	0.5	0.8
<b>Febrero</b>	0.5	0.8
<b>Marzo</b>	0.5	0.8
<b>Abril</b>	0.5	0.8
<b>Mayo</b>	0.5	1
<b>Junio</b>	0.5	1.2
<b>Julio</b>	0.5	1.2
<b>Agosto</b>	0.5	1.4
<b>Septiembre</b>	0.5	1.4
<b>Octubre</b>	0.5	1.4
<b>Noviembre</b>	0.5	0.8
<b>Diciembre</b>	0.5	0.8

## Referencias

- Fuentes M.S. (1987). *“Políticas de operación de presas”* División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Omar de la Cruz-Courtois, Delva Guichard, Maritza L. Arganis Juárez. (2019). *“Políticas de operación óptima de presas para generación hidroeléctrica con modelos markovianos y variable continua”* Revista Pakbal. No. 44.
- Aparicio, F.J. (1992). *“Fundamentos de hidrología de superficie”*, Editorial LIMUSA. México.
- S. Hillier F., J. Lieberman G. (2010). *“Introducción a la investigación de operaciones”* Editorial Mc Graw Gill. Novena edición. México.
- S. Hillier F., S. Hillier M. (2008). *“Métodos cuantitativos para la administración”* Editorial Mc Graw Gill. Tercera edición. México.

- Padilla M.L.D. (2017). “*Actualización de las políticas de operación del sistema de presas del río Gijalva.*” Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Padilla M.L.D. (2020). “*Optimización de las políticas de extracción para riego y suministro de agua potable, utilizando computo evolutivo, utilizando computo evolutivo para el embalse de la presa Cointzio, Michoacán México*” Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Martínez A.I. (2009). “*Políticas de operación óptimas para un sistema de presas. Aplicación de algoritmos genéticos*” Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería. UNAM.
- Alegría D.A. (2010). “*Política de operación óptima del sistema de presas del río Grijalva. Efectos de la curva guía*” Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería. UNAM.
- CONAGUA, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México (1999) “*Estudio Limnológico de la Presa Madín*” Informe final.
- INEGI. “Base de datos, censos y conteos” <https://www.inegi.org.mx/>

## CAPÍTULO IV

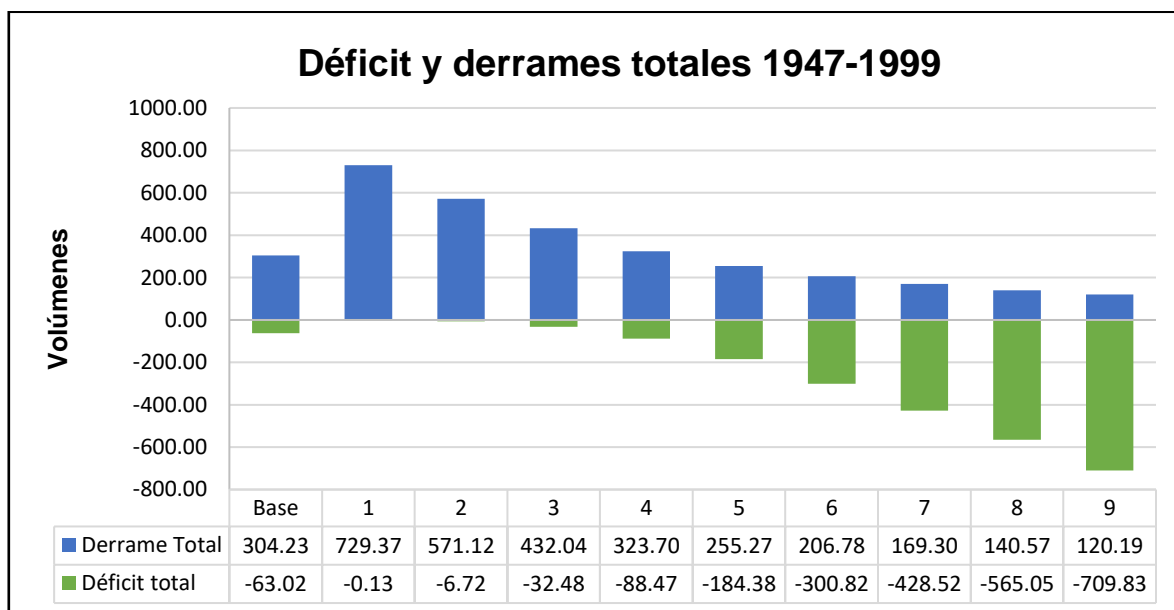
### Aplicación y resultados

En este capítulo se desglosan los resultados de la optimización de las políticas de extracción realizada con ayuda del funcionamiento de vaso de la presa Madín.

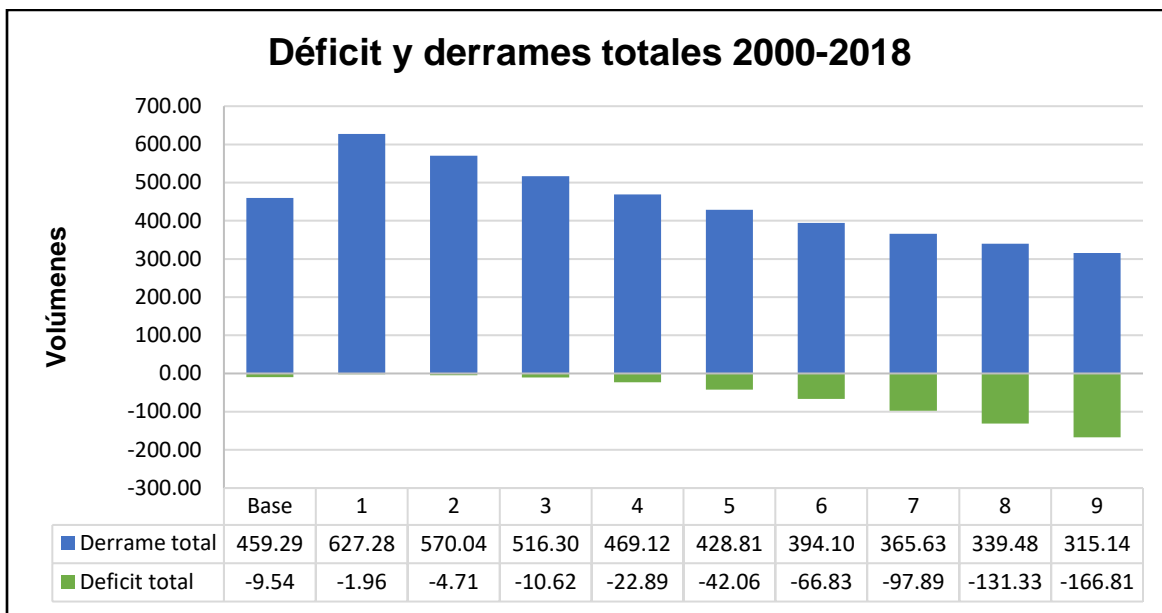
#### 4.1 Análisis de las políticas de operación uniformes

Una vez propuestos los 10 escenarios mencionados, el análisis comenzó dividiendo los registros en dos periodos, pues como ya se dijo, se observa que la tendencia de los datos para los años posteriores al año 2000 aumentan considerablemente en comparación con los registros anteriores a este año (Figura 19).

El primer periodo de análisis está comprendido entre los años 1957 a 1999 (Figura 22), por lo que para el segundo periodo se consideraron los registros del año 2000 al año 2018 (Figura 23).



**Figura 22. "Déficits y derrames totales para cada escenario (1947-1999)"**



**Figura 23. “Déficits y derrames totales para cada escenario (2000-2018)”**

Las figuras anteriores muestran los derrames y los déficits acumulados para cada periodo de análisis, considerando las extracciones propuestas por los 10 escenarios distintos.

Es claro que para cada escenario se cuenta con distintos volúmenes de derrames y de déficits, sin embargo, para el primer periodo los derrames son mucho menores y los déficits aumentan respecto del segundo periodo, donde los derrames son mayores y los déficits disminuyen.

Con la finalidad de ejemplificar esta discrepancia entre los periodos antes mencionados, se agregó la Tabla 12 y la Tabla 13 donde además de mostrar el déficit y el derrame total por año asociado a cada propuesta y para cada periodo, se muestra el número total de meses con déficits y el número de meses con déficits únicamente para el Estado de México.

**Tabla 12. “Derrames y déficits totales por año de 1947 a 1999”**

De 1947 a 1999 (53 años, 636 meses)							
Esce nario	Déficit Total por año (hm <sup>3</sup> )	Derrame total por año (hm <sup>3</sup> )	Meses con déficit	% de meses con déficit	En el Estado de México		
					Déficit Total por año (hm <sup>3</sup> )	meses con déficit	% de meses con déficit
Base	-1.19	5.74	75	11.8%	-0.28	40	6.3%
1	0.00	13.76	1	0.2%	0.00	1	0.2%
2	-0.13	10.78	11	1.7%	-0.08	9	1.4%
3	-0.61	8.15	41	6.4%	-0.26	31	4.9%
4	-1.67	6.11	103	16.2%	-0.45	59	9.3%
5	-3.48	4.82	176	27.7%	-0.74	94	14.8%
6	-5.68	3.90	248	39.0%	-0.91	120	18.9%
7	-8.09	3.19	300	47.2%	-1.03	141	22.2%
8	-10.66	2.65	347	54.6%	-1.11	158	24.8%
9	-13.39	2.27	390	61.3%	-1.22	166	26.1%

**Tabla 13. “Derrames y déficits totales por año de 2000 a 2018”**

De 2000 a 2018 (19 años, 228 meses)							
Esce nario	Déficit Total por año (hm <sup>3</sup> )	Derrame total por año (hm <sup>3</sup> )	Meses con déficit	% de meses con déficit	En el Estado de México		
					Déficit Total por año (hm <sup>3</sup> )	meses con déficit	% de meses con déficit
Base	-0.50	24.17	7	3.1%	-0.17	4	1.8%
1	-0.10	33.01	2	0.9%	-0.10	2	0.9%
2	-0.25	30.00	6	2.6%	-0.18	4	1.8%
3	-0.56	27.17	10	4.4%	-0.32	6	2.6%
4	-1.20	24.69	17	7.5%	-0.56	12	5.3%
5	-2.21	22.57	29	12.7%	-0.79	19	8.3%
6	-3.52	20.74	44	19.3%	-1.09	25	11.0%
7	-5.15	19.24	57	25.0%	-1.36	32	14.0%
8	-6.91	17.87	67	29.4%	-1.62	38	16.7%
9	-8.78	16.59	77	33.8%	-1.84	45	19.7%

De las tablas anteriores se aprecia que una extracción muy alta y constante para todo el año, produce que el aumento de los déficits sea muy grande, tal es el caso del escenario 9, con una extracción constante de 1.3 m<sup>3</sup>/s, donde se identifica que

para el primer periodo habría 390 meses con déficit, de los 636 meses que componen dicho periodo, es decir un 61% de los meses totales tendrían déficits; para el segundo periodo se tendrían 77 meses con déficits, correspondientes al 33.8%. De los 77 meses con déficit antes mencionados, se observó que estos eran principalmente meses de época de estiaje, entre diciembre y mayo. Sin embargo, a pesar de los déficits, se tendrían derrames importantes en el vaso, en promedio más de 0.5 m<sup>3</sup>/s.

Como se pretende proponer una política que resulte satisfactoria para el futuro, se analizó a detalle el comportamiento del vaso para el segundo periodo, donde se identifican las extracciones programadas y a las extracciones que en realidad se pudieron obtener (Tabla 14), es decir se muestra el volumen total de extracción que se tenía programado para cada escenario (Columna 2), al cual posteriormente se le resta el déficit para así obtener la extracción anual en hm<sup>3</sup> como volumen (Columna 3) o como gasto (Columna 4).

**Tabla 14. “Extracción programada y extracción real para el segundo periodo (2000-2018)”**

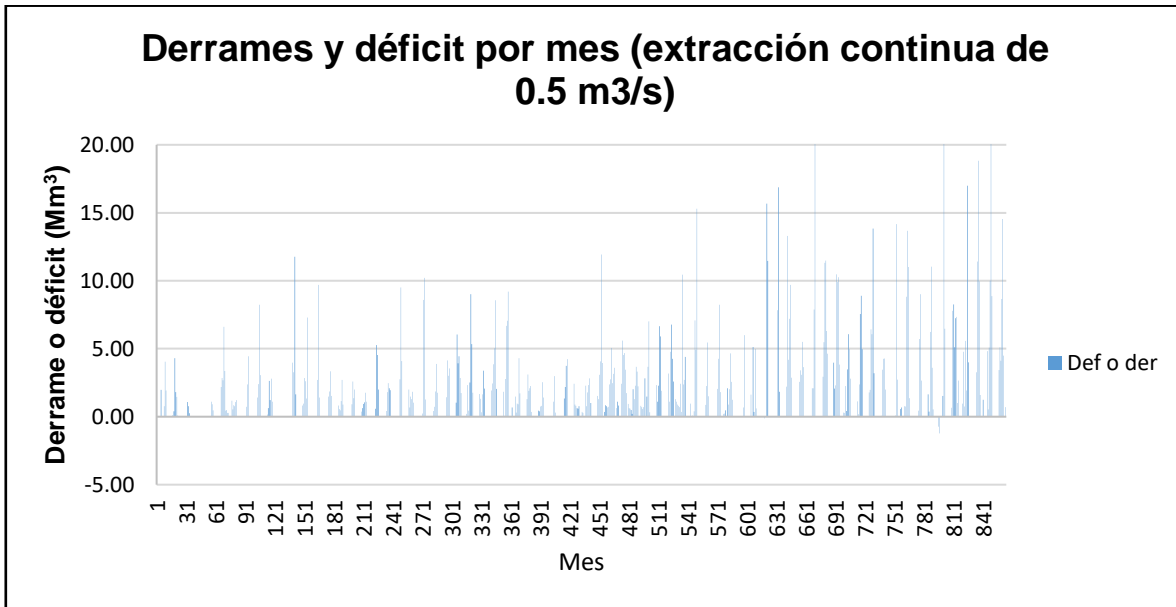
1	2	3	4
Escenario	Extracción programada por año (hm <sup>3</sup> )	Extracción real por año (hm <sup>3</sup> )	Extracción real por año (m <sup>3</sup> /s)
Base	25.01	24.51	0.78
1	15.77	15.66	0.5
2	18.92	18.67	0.59
3	22.08	21.52	0.68
4	25.23	24.02	0.76
5	28.38	26.17	0.83
6	31.54	28.02	0.89
7	34.69	29.54	0.94
8	37.84	30.93	0.98
9	41	32.22	1.02

Se observa que, para el escenario 5, que corresponde a una extracción programada constante de 0.9 m<sup>3</sup>/s, se logra un aprovechamiento de 0.83 m<sup>3</sup>/s, ya mayor que el del escenario base (0.78 m<sup>3</sup>/s).

Las extracciones propuestas en el análisis contemplan la extracción total de la presa Madín, por lo que dentro de esta extracción debe considerarse que la presa suministra al Estado de México 0.5 m<sup>3</sup>/s continuos durante todos los meses del año.

El suministro para el Estado de México debe respetarse y cuidar que no se afecte, pues un déficit implicaría un desabasto de agua en las zonas que dependen de este suministro. A continuación, se muestra un análisis con una extracción continua de 0.5 m<sup>3</sup>/s donde todo lo que se extraería sería únicamente para la planta potabilizadora.

La Figura 24 presenta los derrames y déficit obtenidos mes a mes con la extracción de 0.5 m<sup>3</sup>/s considerada en la simulación.



**Figura 24. “Derrames y déficits por mes, con una extracción continua de 0.5 m<sup>3</sup>/s”**

Como se muestra apenas tres meses tendrían déficits, el primer mes es parte del primer periodo, se presenta en julio de 1998. Para el segundo periodo se tiene déficit en los meses de abril y mayo del 2013. Se aprecia de la figura anterior, que se presentan derrames considerables, por lo que es posible incrementar la extracción para poder aprovechar el recurso de manera eficiente.

## 4.2 Optimización de las políticas de extracción

Del análisis anterior, con los distintos escenarios para las extracciones continuas durante todo el año, y principalmente con el propuesto por OCAVM de extraer más agua en época de lluvias, se observó que vale la pena definir una política de extracción óptima para cada mes, de modo tal que se extraiga una mayor cantidad



de agua en temporada de lluvias y una menor cantidad en época de estiaje para poder evitar en la medida de lo posible los déficits.

La optimización de la función objetivo busca obtener extracciones de modo tal que los déficits y derrames sean lo menor posible respetando la extracción continua que suministra de agua potable al estado de México (0.5 m<sup>3</sup>/s).

Para poder optimizar las políticas de extracción se recurrió a las ecuaciones 10 y 11. Es importante mencionar que para la ecuación 10 se asignó un coeficiente de penalización igual a 5, como ya se explicó se pretende reducir los déficits.

$$FO_1 = k * |Def_T| + Der_T \quad (10)$$

Para la ecuación 11, se agregó el déficit que tuvo el Estado de México como un factor adicional a la penalización, es decir, además de multiplicar al déficit total por un factor k=10, este se multiplicó por el déficit que se tuvo para el Estado de México.

$$FO_2 = (k * |Def_{T\text{EdoMex}}|) * |Def_T| + Der_T \quad (11)$$

Una vez definidas ambas funciones objetivo y considerando los límites propuestos de la Tabla 11, se prosiguió con la minimización de cada una de ellas y como resultado se obtuvieron las extracciones de la tabla siguiente.

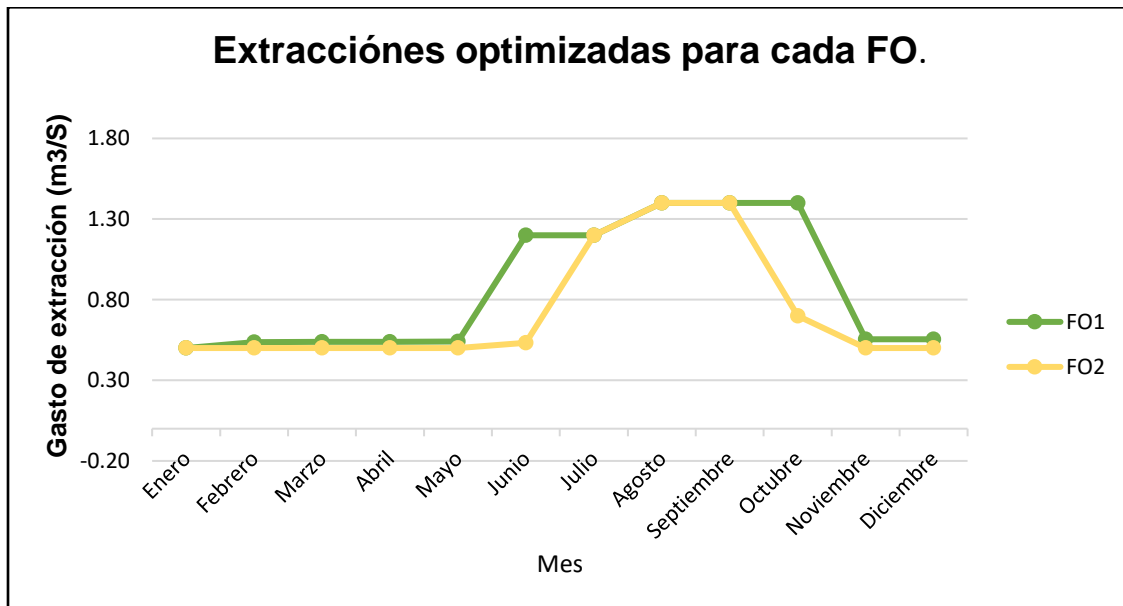
**Tabla 15. “Extracciones mensuales obtenidas a partir de la minimización”**

Mes	Extracciones FO <sub>1</sub> (m3/s)	Extracciones FO <sub>2</sub> (m3/s)
<b>Enero</b>	0.5	0.5
<b>Febrero</b>	0.54	0.5
<b>Marzo</b>	0.54	0.5
<b>Abril</b>	0.54	0.5
<b>Mayo</b>	0.54	0.5
<b>Junio</b>	1.2	0.53
<b>Julio</b>	1.2	1.2
<b>Agosto</b>	1.4	1.4
<b>Septiembre</b>	1.4	1.4
<b>Octubre</b>	1.4	0.7

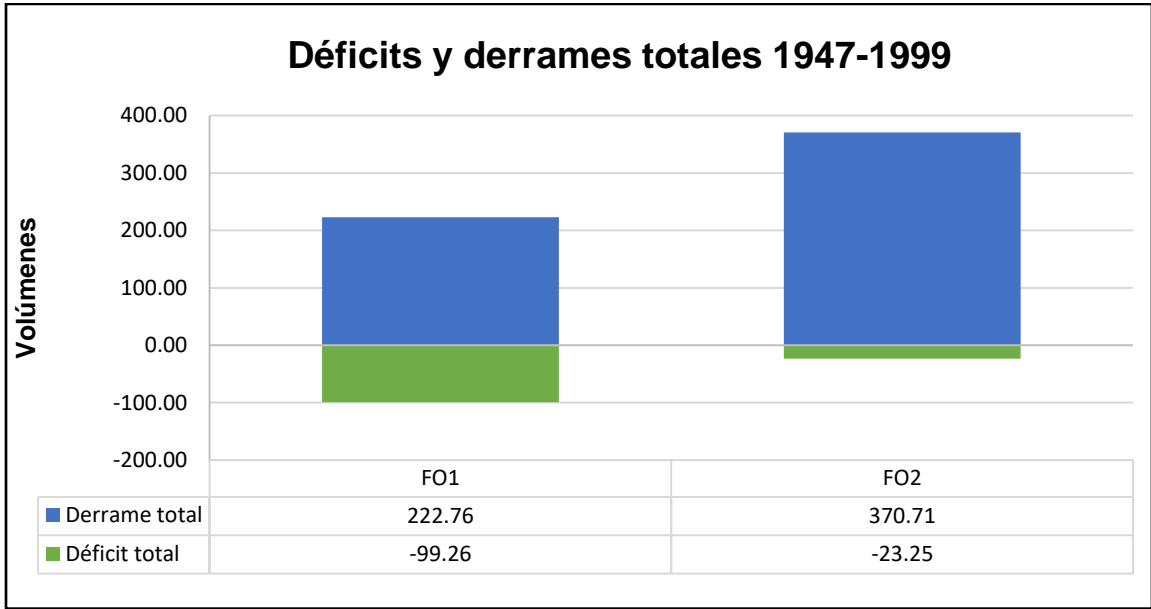
<b>Noviembre</b>	0.55	0.5
<b>Diciembre</b>	0.55	0.5
<b>Valor FO</b>	<b>452.21</b>	<b>528.33</b>

En la Tabla 15 se muestran las extracciones mensuales que dio el funcionamiento de vaso, además el valor de cada función objetivo al final de la optimización.

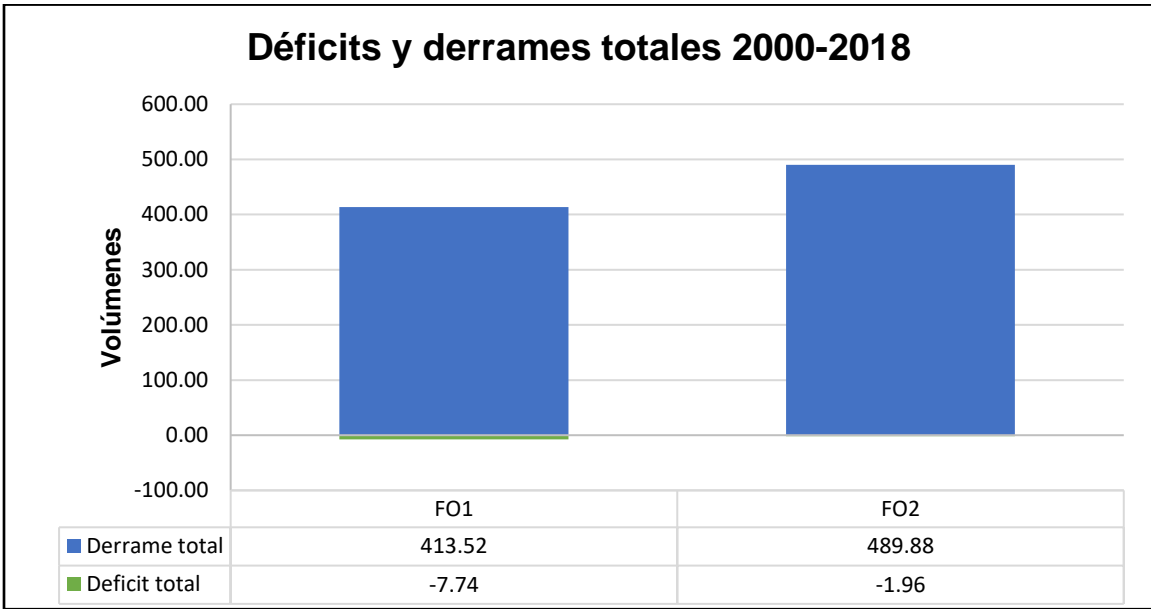
Para poder sensibilizar la observación de los resultados se agregaron las siguientes gráficas (Figura 25, Figura 26 y Figura 27). Figura 25 representa las extracciones para cada mes para las diferentes funciones objetivo y las figuras 26 y 27 muestran los derrames y déficit encontrados en los dos periodos de años simulados.



**Figura 25. "Extracciones optimizadas para cada función objetivo"**



**Figura 26. “Déficits y derrames totales para cada función objetivo (1947-1999)”**



**Figura 27. “Déficits y derrames totales para cada función objetivo (2000-2018)”**

De las figuras anteriores se observa que en general, el déficit es considerablemente menor para el segundo periodo que para primer periodo e incluso estos son despreciables comparados con los derrames presentados.

Los resultados desglosados de las simulaciones realizadas con las extracciones optimizadas para los años posteriores a 1999 (es decir el segundo periodo) se muestran a continuación (Tabla 16 y Tabla 17).

**Tabla 16. "Resultados de la simulación con la FO1"**

<b>Año</b>	<b>Volumen de entrada</b>	<b>Déficit Total Anual</b>	<b>Derrame Total Anual</b>	<b>Déficit total en Edo. Méx</b>
2000	56.15	0.00	27.36	0.00
2001	35.40	0.00	6.71	0.00
2002	49.92	-1.19	23.10	0.00
2003	59.35	0.00	30.53	0.00
2004	58.59	0.00	31.31	0.00
2005	36.30	0.00	9.20	0.00
2006	41.45	0.00	13.57	0.00
2007	47.25	0.00	21.76	0.00
2008	32.91	0.00	2.94	0.00
2009	33.17	-0.35	5.45	0.00
2010	50.85	0.00	27.18	0.00
2011	35.12	0.00	5.31	0.00
2012	37.08	0.00	13.77	0.00
2013	55.99	-6.20	29.10	4.07
2014	57.02	0.00	28.24	0.00
2015	49.65	0.00	23.72	0.00
2016	61.41	0.00	34.36	0.00
2017	77.25	0.00	50.62	0.00
2018	60.44	0.00	29.29	0.00
<b>Total</b>	935.30	-7.74	413.52	4.07
<b>Por año</b>	49.23	-0.41	21.76	0.21

**Tabla 17. "Resultados de la simulación con la FO2"**

<b>Año</b>	<b>Volumen de entrada total</b>	<b>Déficit Total Anual</b>	<b>Derrame Total Anual</b>	<b>Déficit total en Edo. Méx</b>
2000	56.15	0.00	32.21	0.00
2001	35.40	0.00	11.00	0.00
2002	49.92	0.00	26.19	0.00
2003	59.35	0.00	34.94	0.00
2004	58.59	0.00	35.59	0.00
2005	36.30	0.00	13.34	0.00
2006	41.45	0.00	17.85	0.00
2007	47.25	0.00	26.04	0.00
2008	32.91	0.00	6.83	0.00
2009	33.17	0.00	9.77	0.00
2010	50.85	0.00	30.42	0.00
2011	35.12	0.00	10.62	0.00
2012	37.08	0.00	16.18	0.00
2013	55.99	-1.96	30.98	1.96
2014	57.02	0.00	32.80	0.00
2015	49.65	0.00	27.73	0.00
2016	61.41	0.00	37.83	0.00
2017	77.25	0.00	55.71	0.00
2018	60.44	0.00	33.85	0.00
<b>Total</b>	935.30	-1.96	489.87	1.96
<b>Por año</b>	49.23	-0.10	25.78	0.10

De las tablas anteriores se observa que con la optimización de las políticas apenas se tendría un año con déficit para el Estado de México, ambos déficits se presentan en el año 2013.

En la Tabla 18Tabla 19 y en la Tabla 19 se muestran los déficits, derrames y el número de meses con déficits para cada función objetivo, además de los meses con déficits únicamente para el Estado de México, adicionalmente muestran el porcentaje de meses que se tuvo déficits para cada periodo.

**Tabla 18. “Tabla resumen de los volúmenes para cada condición, obtenidos de las extracciones programadas para FO1 y FO2 (Primer periodo)”**

	De 1947 a 1999 (53 años, 636 meses)						
	Déficit Total por año (hm <sup>3</sup> )	Derrame total por año (hm <sup>3</sup> )	meses con déficit	% de meses con déficit	En el Estado de México		
					Déficit Total por año (hm <sup>3</sup> )	meses con déficit	% de meses con déficit
<b>FO<sub>1</sub></b>	-1.89	4.19	118	<b>18.6%</b>	-0.43	<b>66</b>	<b>10.4%</b>
<b>FO<sub>2</sub></b>	-0.44	6.99	42	<b>6.6%</b>	-0.19	<b>30</b>	<b>4.7%</b>

**Tabla 19. “Tabla resumen de los volúmenes para cada condición, obtenidos de las extracciones programadas para FO1 y FO2 (Segundo periodo)”**

	De 2000 a 2018 (19 años, 228 meses)						
	Déficit Total por año (hm <sup>3</sup> )	Derrame total por año (hm <sup>3</sup> )	meses con déficit	% de meses con déficit	En el Estado de México		
					Déficit Total por año (hm <sup>3</sup> )	meses con déficit	% de meses con déficit
<b>FO<sub>1</sub></b>	-0.41	21.74	7	<b>3.1%</b>	-0.21	<b>4</b>	<b>1.8%</b>
<b>FO<sub>2</sub></b>	-0.10	25.78	3	<b>1.3%</b>	-0.10	<b>2</b>	<b>0.9%</b>

Podemos observar que para la FO<sub>1</sub> se tienen 118 meses con déficits de los 635 que componen el primer periodo, correspondiente a un 18.6% como porcentaje para la condición de déficit, además se tienen 66 meses con déficits únicamente para el estado de México correspondiente a un 10.4%. Para el periodo comprendido entre 2000 y 2018 se tienen apenas 7 meses con déficits de los cuales 4 meses corresponden únicamente al Estado de México.

Para la FO<sub>2</sub> se obtuvieron 42 meses con déficits totales y 30 únicamente para el Estado de México, correspondiente al primer periodo. Para el segundo periodo se obtuvieron 3 meses con déficit de los cuales 2 no alcanzaron a abastecer al Estado de México.

Finalmente, en la Tabla 20 se muestra la extracción que se debía obtener con las políticas de operación optimizadas, comparadas con las que en realidad se obtuvieron.

Se observa que a pesar de que ambas funciones objetivo no alcanzan a entregar la extracción programada en su totalidad, la FO2 se apega mejor esperado.

Es importante tomar en cuenta que para la FO1 la extracción programada por año es menor, con respecto de la FO1. Debido a esto se tiene un menor porcentaje de déficits y un mayor porcentaje de escurrimientos para la FO2 que para la FO1.

**Tabla 20. “Extracción promedio anual total programada y real estimada para el periodo 2000-2018.**

	Extracción programada por año (hm <sup>3</sup> )	Extracción real por año (hm <sup>3</sup> )	Extracción real por año (m <sup>3</sup> /s)
FO <sub>1</sub>	27.29	26.88	0.85
FO <sub>2</sub>	23.00	22.90	0.73

## Bibliografía

- Domínguez M.R. (2020). “Análisis de extracciones de la Presa Madín para dimensionar la capacidad de tratamiento para una nueva planta potabilizadora y definir políticas de operación” Instituto de Ingeniería. UNAM.

## CAPÍTULO V

### Conclusiones y recomendaciones

Después de analizar la información y observar que a partir del año 2000 los escurrimientos de la cuenca han aumentado considerablemente provocando derrames en la presa Madín se llegó a la conclusión de que se requiere aprovechar dichos derrames, incrementando la extracción en época de lluvias.

Durante la época de estiaje los escurrimientos no han reflejado aumentos considerables, pero la presa tiene capacidad suficiente para suministrar 0.5 m<sup>3</sup>/s al Estado de México sin que se presenten déficits significativos en el suministro.

Se determinó, con base en lo analizado, que una extracción constante durante todo el año no sería adecuada, pues como se demostró, se presentarían mayores déficits en el suministro de agua al estado de México.

Por lo que se partió, entonces, de la política propuesta por OCAVAM, que busca aprovechar las aportaciones de la época de lluvias, pero tomando en cuenta que dichas aportaciones han ido incrementando (probablemente debido a que ha aumentado en coeficiente de escurrimiento) con el paso de los años, se obtuvo una política de extracciones cuidando que el déficit en el suministro al estado de México sea el menor posible. De hecho, el riesgo de obtener déficits con la política obtenida al optimizar la función objetivo FO<sub>1</sub> es muy parecido a lo obtenido después de simular la propuesta de OCAVAM. La diferencia entre ambas extracciones se muestra en la Tabla 21.

**Tabla 21. “Comparativa de las extracciones uniformes y optimizadas”**

<b>Mes</b>	<b>Extracciones OCAVM (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Extracciones Optimizadas (m<sup>3</sup>/s)</b>
<b>Enero</b>	0.50	0.50
<b>Febrero</b>	0.50	0.54
<b>Marzo</b>	0.50	0.54
<b>Abril</b>	1.00	0.54
<b>Mayo</b>	1.00	0.54
<b>Junio</b>	1.00	1.20
<b>Julio</b>	1.00	1.20
<b>Agosto</b>	1.00	1.40



<b>Septiembre</b>	<b>1.00</b>	<b>1.40</b>
<b>Octubre</b>	<b>1.00</b>	<b>1.40</b>
<b>Noviembre</b>	0.50	0.55
<b>Diciembre</b>	0.50	0.55

En el caso de plantear la idea de aumentar el aprovechamiento con una nueva planta potabilizadora se debe tomar en cuenta la extracción de  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  que se suministra al Estado de México, por lo que la nueva planta deberá diseñarse con un  $Q=0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  para utilizarse a su máxima capacidad durante 7 meses al año si se considera la propuesta de OCAVAM, mientras que si se decide tomar las políticas óptimas de extracciones, el gasto de diseño deberá ser de  $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$  para ser utilizada a su máxima capacidad durante 3 meses al año o de  $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$  para ser utilizada a su máxima capacidad por 5 meses al año.

Finalmente es importante tener en cuenta que el análisis anterior se efectuó con el uso de métodos de programación no lineal, específicamente de la herramienta *Solver* de Excel y el método GRG, aplicado con relativa sencillez y apoyándose en el funcionamiento de vaso; se pudo dar esta propuesta a los organismos operadores para la operación óptima del embalse estudiado.

Se considera que para desarrollos futuros se pueden explorar otros métodos de optimización para hacer comparaciones de los resultados aquí presentados.

## REFERENCIAS

- Aparicio, F.J. (1992). “*Fundamentos de hidrología de superficie*”, Editorial LIMUSA. México
- Breña, A.F. (2006). “*Principios y fundamentos de la hidrología superficial*”. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Zimmermann, E.D. (2009) “*Hidrología procesos y métodos*” UNR Editora. Argentina.
- Mejía, J.A. (2012) “*Hidrología aplicada*” Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú
- Ponce, S.M. (2019) “*Estimación de hidrogramas de descarga de las presas del poniente*”. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería. UNAM
- Israel M. A. (2009) “*Políticas de operación óptimas para un sistema de presas. Aplicación de algoritmos genéticos*” Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Jiménez R. S. (1985) “*Revisión Hidrológica de la avenida de diseño de la Presa Madín, Edo de México*” Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Aragón. UNAM
- Castro M. I. (2012) “*Diagnostico de la Cuenca de la Presa Madín, Estado de México*” Tesis de maestría. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- H. Ayuntamiento Constitucional Atizapán de Zaragoza (2016) “*Plan de Desarrollo Municipal Atizapán de Zaragoza (2016 – 2018)*” (Gaceta Municipal No.29). [www.edomex.gob.mx](http://www.edomex.gob.mx)
- Ayuntamiento Naucalpan de Juárez (2019) “*Plan de Desarrollo Municipal Naucalpan de Juárez (2019 – 2021)*” (Gaceta especial No 4). [www.edomex.gob.mx](http://www.edomex.gob.mx)
- CONAGUA, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México (1999) “*Estudio Limnológico de la Presa Madín*” Informe final.
- CONAGUA – SEMARNAT (2018) “Atlas del Agua en México” [www.gob.mx/conagua](http://www.gob.mx/conagua)
- CONABIO (2002) “*Portal de Geoinformación 2020*” Catalogo de metadatos geográficos. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Fuentes M.S. (1987). “*Políticas de operación de presas*” División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Omar de la Cruz-Courtois, Delva Guichard, Maritza L. Arganis Juárez. (2019). “*Políticas de operación óptima de presas para generación hidroeléctrica con modelos markovianos y variable continua*” Revista Pakbal. No. 44.
- S. Hillier F., J. Lieberman G. (2010). “*Introducción a la investigación de operaciones*” Editorial Mc Graw Gill. Novena edición. México.
- S. Hillier F., S. Hillier M. (2008). “*Métodos cuantitativos para la administración*” Editorial Mc Graw Gill. Tercera edición. México.

- Padilla M.L.D. (2017). “*Actualización de las políticas de operación del sistema de presas del río Grijalva.*” Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Padilla M.L.D. (2020). “*Optimización de las políticas de extracción para riego y suministro de agua potable, utilizando computo evolutivo para el embalse de la presa Cointzio, Michoacán, México*” Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Martínez A.I. (2009). “*Políticas de operación óptimas para un sistema de presas. Aplicación de algoritmos genéticos*” Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería. UNAM.
- Alegría D.A. (2010). “*Política de operación óptima del sistema de presas del río Grijalva. Efectos de la curva guía*” Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería. UNAM.

Domínguez M.R. (2020). “*Análisis de extracciones de la Presa Madín para dimensionar la capacidad de tratamiento para una nueva planta potabilizadora y definir políticas de operación*” Instituto de Ingeniería. UNAM.