



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias en Hidrología Ambiental

**MODELADO DEL FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DEL VASO DE LA PRESA JESÚS  
MARÍA PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO POR DESBORDAMIENTO.**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta:

**Ing. Josué Misael Reséndiz García**

Dirigido por:

Dr. Eusébio Jr. Ventura Ramos

**SINODALES**

Dr. Eusébio Jr. Ventura Ramos

**Presidente**

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. M. Alfonso Gutiérrez López.

**Secretario**

\_\_\_\_\_

Firma

M.C. Luis Ángel Miranda Sánchez

**Vocal**

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Carlos Alberto Chávez García

**Suplente**

\_\_\_\_\_

Firma

M.C. Sebastián Fuentes Castro

**Suplente**

\_\_\_\_\_

Firma

\_\_\_\_\_

Dra. Ma de la Luz Pérez Rea.

**Directora de la Facultad**

\_\_\_\_\_

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

**Jefe de Posgrado**

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

**PARA MI HERMOSA FAMILIA**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia a Dios por permitirme conocer esta etapa de la vida, por darme salud, bienestar, estabilidad, paciencia, entusiasmo, valentía, motivación, coraje y sobre, todo las ganas de continuar día con día, porque nadie más que él sabe las veces que estuve a punto de rendirme.

A mis padres Bibiana y Jaime que me han apoyado incondicionalmente a lo largo de toda mi vida, por haber sembrado en mí esa semilla de valores y que han regado con sudor y lágrimas, esperando cosechar de mí una persona integra, consiente de la realidad, dispuesta a actuar y a andar por el camino del bien. Por enseñarme a superar los retos que la vida me pone en el camino, por no limitar mis pensamiento sin despegar los pies del piso.

A mi director de tesis Dr. Eusebio por el apoyo, motivación y paciencia para culminar con este trabajo de investigación.

A mis sinodales, coordinador de la maestría y a mis profesores por brindarme el apoyo y las herramientas para formarme como un postgraduado, por la paciencia, motivación y compartir experiencias dentro y fuera del aula de clases, de las cuales he tomado para seguir adelante y continuar día a día en mi proceso de formación académica y profesional.

A la Facultad de ingeniería y a la Universidad Autónoma de Querétaro, por brindarme por primera ocasión la oportunidad de ser miembro de esta distinguida casa de estudios.

Al CONAHCYT por brindarme el apoyo económico para financiar mis estudios de maestría y poder concluir este trabajo de investigación que espero sea de aporte a la sociedad.

A mis amigos, por hacer y ser más amena mi instancia en la maestría, por compartir experiencias dentro y fuera del aula de clases, por las lecciones de vida que me brindaron cuando las necesité.

Por eso y muchas cosas solo me queda decir:

¡Gracias!

## Índice general

1.	INTRODUCCIÓN.....	13
1.1.	Descripción del problema y justificación .....	14
2.	ANTECEDENTES .....	15
3.	HIPÓTESIS .....	18
4.	OBJETIVOS .....	18
	Objetivo General .....	18
	Objetivos específicos .....	18
5.	MARCO TEÓRICO .....	19
5.1.	Conceptos generales.....	19
5.2.	Método de Taylor – Schwarz .....	21
5.3.	Tiempo de concentración.....	21
5.4.	Hidrograma.....	22
5.5.	Método del Hidrograma Triangular (HUT).....	23
5.6.	Precipitación en exceso.....	24
5.7.	Precipitación de diseño.....	25
5.8.	Componentes básicos de una presa .....	26
5.9.	Tránsito de avenidas en vasos .....	27
5.10.	Programas de cómputo utilizados.....	29
	GOOGLE EARTH® .....	29
	QGIS® .....	29
	AX® .....	29
	HEC-HMS® .....	30
6.	METODOLOGIA.....	36
6.1.	Información requerida.....	36
6.2.	Descripción del área de estudio. ....	38
6.3.	Delimitación de la cuenca de aportación. ....	39

6.4.	Parámetros fisiográficos de la cuenca.....	41
6.5.	Pendiente del cauce principal.....	43
6.6.	Tiempo de concentración.....	45
6.7.	Características de uso de suelo y vegetación. ....	45
6.8.	Número de escurrimiento. ....	49
6.9.	Análisis de lluvias. ....	50
6.10.	Polígonos de Thiessen.....	51
6.11.	Análisis de frecuencias. ....	52
6.12.	Lluvias de diseño. ....	68
6.13.	Cálculo de los gastos por el método del Hidrograma Unitario Triangular....	69
6.14.	Modelo hidrológico de vaso para la Presa Jesús María.....	69
6.15.	Modelado .....	74
6.16.	Elaboración de graficas de comportamiento de los desbordes de la presa Jesús María.....	74
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	75
7.1.	Mapa hidrológico base.....	75
7.2.	Gastos generados por las condiciones actuales de la cuenca .....	78
7.3.	Tránsitos de avenidas.....	82
7.4.	Graficas de comportamiento de los desbordes de la presa Jesús María. ....	85
8.	CONCLUSIONES.....	89
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	91

**índice de figuras.**

Figura 1.	El ciclo hidrológico (modificado de Chow, 1964).....	19
Figura 2.	Elementos de un hidrograma. (modificado de Springall, 1970).....	23

Figura 3. Hidrogramas unitarios sintéticos del Servicio de Conservación de Suelos. Donde a la derecha se muestra el hidrograma unitario triangular, mientras que a la izquierda se muestra el hidrograma adimensional. (modificado de Servicio de Conservación de Suelos EU, 1973). .....	24
Figura 4. principales componentes de un vaso de almacenamiento. (modificado de Aparicio, 2001) .....	27
Figura 5. Hidrogramas de entrada (I) y de salida (O). (modificado de Aparicio, 2001) .....	28
Figura 6. Componentes utilizados por el programa HEC-HMS (Fuente propia en el programa HEC-HMS). .....	31
Figura 7. Modelo meteorológico utilizado en el tránsito de avenidas en vasos en HEC-HMS. (Fuente propia en el programa HEC-HMS). .....	32
Figura 8. Especificaciones de control en HEC-HMS. (Fuente propia en el programa HEC-HMS). .....	32
Figura 9. Unidades de las series de tiempo en HEC-HMS. (Fuente propia en el programa HEC-HMS). .....	33
Figura 10. Control de las series de tiempo en HEC-HMS. (Fuente propia en el programa HEC-HMS). .....	33
Figura 11. Datos de las series de tiempo en HEC-HMS. (Fuente propia en el programa HEC-HMS). .....	34
Figura 12. Datos en pares de la función elevaciones - almacenamiento en HEC-HMS. (Fuente propia en el programa HEC-HMS). .....	35
Figura 13. Visita de campo a la Presa Jesús María y sus alrededores. ....	37
Figura 14. Ubicación de la presa Jesús María (Elaboración propia en el programa QGIS). .....	38
Figura 15. Cuenca de aportación de la presa Jesús María, preliminar. (Elaboración propia en el programa QGIS). .....	40
Figura 16. Cuenca de aportación de la presa Jesús María, final. (Elaboración propia en el programa QGIS). .....	41
Figura 17. Cuenca de aportación de la presa Jesús María y cauce principal (Elaboración propia en el programa QGIS). .....	42

Figura 18. Perfil de elevaciones del cauce principal.....	43
Figura 19. Distribución de los tipos de suelo en la cuenca. (Elaboración propia en el programa QGIS).....	46
Figura 20. Distribución de los usos de suelo en la cuenca. (Elaboración propia en el programa QGIS).....	48
Figura 21. Estaciones meteorológicas más cercanas a la cuenca de estudio. (Elaboración propia en el programa QGIS). ....	50
Figura 22. Polígonos de Thiessen de influencia de la subcuenca. (Elaboración propia en el programa QGIS). ....	51
Figura 23. Modelo de cuenca en el programa “HEC-HMS” .....	70
Figura 24. Postproceso de la información obtenida en el vuelo mediante aeronave no tripulada. ....	72
Figura 25. Curvas elevaciones – áreas – capacidades del vaso de la presa Jesús María. (Elaboración propia en el programa “Microsoft Excel”) .....	73
Figura 26. Mapa hidrológico base de la cuenca de influencia a la presa Jesús María. ....	77
Figura 27. Hidrogramas obtenidos para los periodos de retorno obtenidos por el método HUT para la cuenca de influencia a la presa Jesús María. ....	79
Figura 28. Grafica de comportamiento de desbordes para la presa Jesús María ante la ocurrencia de una lluvia asociada a un periodo de retorno de 2 años.....	85
Figura 29. Grafica de comportamiento de desbordes para la presa Jesús María ante la ocurrencia de una lluvia asociada a un periodo de retorno de 5 años.....	86
Figura 30. Grafica de comportamiento de desbordes para la presa Jesús María ante la ocurrencia de una lluvia asociada a un periodo de retorno de 10 años.....	86
Figura 31. Grafica de comportamiento de desbordes para la presa Jesús María ante la ocurrencia de una lluvia asociada a un periodo de retorno de 25 años.....	87
Figura 32. Grafica de comportamiento de desbordes para la presa Jesús María ante la ocurrencia de una lluvia asociada a un periodo de retorno de 50 años.....	87
Figura 33. Comportamiento del vaciado de la presa Jesús María mediante un orificio de concreto de 0.61 metros de diámetro. (Fuente propia elaborada en el programa “HEC-HMS”).....	90

## Índice de tablas.

Tabla 1. Coeficiente de Kuishiling (CONAGUA, 2014) .....	26
Tabla 2. Funciones de distribución de probabilidad analizadas y métodos de solución (Jiménez, 1997).....	30
Tabla 3. Cálculo de la pendiente del cauce principal mediante el método Taylor-Schwarz.....	44
Tabla 4. Clasificación de los tipos de suelos para la cuenca.....	47
Tabla 5. Ponderación del número de escurrimiento de la cuenca con base en los usos de suelo.....	49
Tabla 6. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 22070, PLANTEL 7. (CONAGUA, 2023) .....	52
Tabla 7. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 22045, JURQUILLA. (CONAGUA, 2023) .....	53
Tabla 8. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 22026, COLON. (CONAGUA, 2023) .....	54
Tabla 9. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 22046, NOGALES. (CONAGUA, 2023).....	55
Tabla 10. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 22049, ZAMORANO. (CONAGUA, 2023) .....	56
Tabla 11. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 11144, CHARAPE. (CONAGUA, 2023) .....	57
Tabla 12. Resumen de errores estándares para la estación 22070, PLANTEL 7.....	58
Tabla 13. Resumen de errores estándares para la estación 22045, JURQUILLA....	58
Tabla 14. Resumen de errores estándares para la estación 22026, COLON.....	59
Tabla 15. Resumen de errores estándares para la estación 22046, NOGALES. ....	59
Tabla 16. Resumen de errores estándares para la estación 22049, ZAMORANO....	60
Tabla 17. Resumen de errores estándares para la estación 11144, CHARAPE.....	60
Tabla 18. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (en milímetros) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 22070, PLANTEL 7. ....	61
Tabla 19. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (en milímetros) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 22045, JURQUILLA. ....	61

Tabla 20. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (en milímetros) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 22026, COLON. ....	62
Tabla 21. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (en milímetros) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 22046, NOGALES.....	62
Tabla 22. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (en milímetros) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 22049, ZAMORANO. ....	63
Tabla 23. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (en milímetros) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 11144, CHARAPE. ....	63
Tabla 24. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 22070, PLANTEL 7. ....	64
Tabla 25. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 22045, JURQUILLA. ....	65
Tabla 26. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 22026, COLON. ....	65
Tabla 27. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 22046, NOGALES.....	66
Tabla 28. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 22049, ZAMORANO. ....	66
Tabla 29. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 11144, CHARAPE. ....	67
Tabla 30. Precipitaciones máximas en 24 horas utilizadas para el cálculo de los caudales.....	67
Tabla 31. Valores de las precipitaciones medias de diseño (en milímetros) para los distintos periodos de retorno. ....	68
Tabla 32. Valores de precipitación en exceso ( $H_e$ ) para los diferentes periodos de retorno.....	69
Tabla 33. Elevaciones – áreas – capacidades del vaso de la presa Jesús María. (Elaboración propia en el programa “Microsoft Excel”) .....	73
Tabla 34. Gastos obtenidos para los diferentes periodos de retorno obtenidos por el método HUT para la cuenca de influencia a la presa Jesús María. ....	78

Tabla 35. Tabla para generar los hidrogramas para los distintos periodos de retorno por el método HUT para la cuenca de influencia a la presa Jesús María (m <sup>3</sup> /s). .....	80
Tabla 36. Desbordes presentados en la presa Jesús María para los distintos niveles de agua y periodos de retorno.....	82
Tabla 37. Resumen de desbordes presentados en la presa Jesús María. ....	84

## RESUMEN

El estado de Querétaro, de acuerdo con los recientes datos demográficos ha presentado una tasa de crecimiento de aproximadamente el doble de la media nacional. La expansión de la mancha urbana de la zona metropolitana sobre municipios vecinos ha generado altas tasas de crecimiento en donde se concentra el 79 por ciento de la población del estado, en contraste con el resto de los municipios, con lo que ha generado la necesidad de urbanizar, lo que conlleva a modificar las condiciones de la cuenca, aumentando los coeficientes de escurrimiento, lo que por añadidura trae en tiempos de lluvia, una concentración más rápida de los escurrimientos, provocando inundaciones.

Con base en lo anterior se tiene la incertidumbre de la capacidad actual que presenta la presa Jesús María para dar protección ante una lluvia de cualquier magnitud.

El presente trabajo se presenta un análisis hidrológico de la cuenca de influencia de la presa Jesús María y un modelado del funcionamiento del vaso para determinar con base en información oficial la capacidad de regulación que brinda actualmente el vaso ante distintos periodos de retorno y niveles de operación, y poder determinar un nivel óptimo de operación que sea capaz de brindar abastecimiento de agua hacia los ejidatarios de la zona y por otro lado, tener la capacidad de regular el máximo volumen posible.

**Palabras clave:** coeficientes de escurrimiento, inundaciones, análisis hidrológico, cuenca de influencia, capacidad de regulación, periodos de retorno, niveles de operación.

## **Abstract**

The Queretaro's state, according to recent demographic data, has presented a growth rate of approximately double the national average. The expansion of the urban stain of the Metropolitan Zone over neighboring municipalities has generated high growth rates where 79 percent of the state's population is concentrated, in contrast to the rest of the municipalities. This has generated a need to urbanize, which leads to modifying the conditions of the basin, modifying the runoff coefficients, which in addition brings intimates of rain a faster concentration of runoff, causing flooding.

Based on the above, there is uncertainty about the current capacity of the Jesús María dam to provide protection against rain of any magnitude.

Therefore, in this work, a hydrological analysis of the basin of the Jesús María dam and a modeling of the functioning of the basin is presented to determine, based on official information, the regulation capacity that the basin currently provides during different periods of return and operation levels, and through statistical analysis to be able to determine an optimal level of operation that is capable of providing water supply to the ejidatarios of the area and on the other hand have the capacity to regulate rainfall.

**Keywords:** runoff coefficients, floods, hydrological analysis, basin, regulation capacity, return periods, operating levels.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las presas son obras hidráulicas que construye el ser humano regularmente en un cauce o fuera de éste, consisten en construir una barrera que obstruya el flujo de agua sobre el cauce y acumularlo para posteriormente aprovechar el recurso hídrico o para protegerse de éste. Existen varias clasificaciones, pero las más importantes son por su tamaño o por sus materiales de construcción.

Los usos que actualmente se les dan a las presas son para dotación de agua a poblaciones, sector agropecuario, generación de energía eléctrica, recreación turística, de protección ante eventos meteorológicos extremos, entre otras. Su diseño está relacionado a un riesgo, y éste depende de la magnitud de la presa.

La presa Jesús María, está ubicada en el afluente del río Querétaro en la localidad de La Griega, en el municipio de El Marqués, Qro. en la latitud  $20.66837^\circ$  y longitud  $-100.25178^\circ$ , fue construida en el año 1909 por los hacendados de la región, el motivo por el cual fue construida la presa, era para dar abastecimiento a las actividades agrícolas (CONAGUA, 2012).

El río Querétaro es uno de los principales afluentes de mayor significancia en cuestión a la seguridad hidráulica, debido a que cruza la zona metropolitana de la ciudad de Querétaro, y en los últimos años se ha podido observar en épocas de lluvia un aumento en el tirante hidráulico, por lo que la presa Jesús María es una obra hidráulica de gran importancia que brinda seguridad a la población de la ciudad de Querétaro.

Actualmente el municipio de El Marqués presenta un crecimiento acelerado en la urbanización, ocasionado por el crecimiento de la población con una tasa de incremento anual de 9.88 por ciento (INEGI, 2020), esto nos da a interpretar que la mancha urbana continuará presentando aumento en los siguientes años. Tal situación seguirá presentando una modificación en el uso de suelo, y por añadidura un aumento en los escurrimientos pluviales.

El crecimiento urbano e industrial que se está presentado en el municipio de El Marqués está alterando el ciclo hidrológico, a causa que se modifica el uso de suelo, aumentando los escurrimientos y a esto responde que la infraestructura pluvial

existente no sea suficiente ante los eventos presentados y, se vean superadas en su capacidad de diseño, presentando problemas a la población aledaña.

Actualmente la presa Jesús María presenta una doble función: como unidad de riego destinado al sector agrícola y, a consecuencia de la obstrucción del flujo en el cauce presenta un funcionamiento de vaso que por añadidura cumple la función de regular los escurrimientos pluviales generados por su cuenca de aportación, los cuales han ido en aumento debido a la urbanización.

### **1.1. Descripción del problema y justificación**

La presa Jesús María es afluente del río Querétaro, funciona como vaso regulador que brinda seguridad hidráulica a la ciudad de Querétaro ante una avenida, sin embargo, es una presa que se construyó hace más de un siglo, por lo que hoy en día se presenta la duda si la presa Jesús María cumple con los lineamientos técnicos actuales solicitados por las dependencias.

Aunado a lo anterior, la acumulación de sedimentos depositados en el vaso y el crecimiento de la mancha urbana en la cuenca de influencia de la presa, ponen aún más en duda la capacidad de almacenamiento de agua, ya que como se mencionó anteriormente se tiene que almacenar agua para uso agrícola y por otro lado mitigar los impactos de una avenida. Es por ello que se toma como caso de estudio la presa Jesús María.

El problema surge cuando se quiere usar la presa Jesús María como presa de almacenamiento y como presa reguladora de avenidas, ya que si ésta presenta un nivel alto de agua se garantiza un mayor volumen de agua para uso agrícola, pero se reduce la capacidad de regulación de avenidas, y viceversa, si el nivel de agua en la presa es bajo, se aumenta la capacidad de regulación, pero se reduce el volumen de agua destinado al sector agrícola. Por lo que es necesario un balance entre el almacenamiento de agua y la capacidad de regulación de avenidas de la presa Jesús María.

El presente trabajo pretende simular una mezcla entre varios escenarios de lluvia y niveles de agua en la presa, para poder observar el comportamiento de cada uno de

éstos, y determinar un nivel óptimo que cumpla la función de poder mitigar el mayor volumen de agua ante una avenida, pero sin dejar de lado el almacenamiento de agua destinada para uso agrícola.

De esta manera el organismo operador de la presa tendrá herramientas que ayudan a tomar mejores decisiones para la elaboración de sus políticas de operación y reducir los desbordes ocasionados por el sobre almacenamiento de agua.

## **2. ANTECEDENTES**

Los primeros indicios de la construcción de presas se remontan a las primeras civilizaciones donde tuvieron la necesidad de brindarse protección ante las inundaciones, paliar las épocas de estiaje y construían pequeños estanques para almacenar agua. (Arreguín, 2021)

Se estima que el primer registro de la construcción de estas obras se remonta al año 3,000 antes de cristo y que se desarrolló en la antigua Mesopotamia. Posterior a esta fecha las demás civilizaciones construyeron las propias, sumando hasta el día de hoy un aproximado de 58,000 en todo el mundo (Arreguin, 2021).

Según el comité internacional de grandes presas, México ocupa el lugar número 14 a nivel mundial con el mayor número de construcción de obras de este tipo, tiene en su haber más de 571 grandes presas, sin embargo, se tiene un registro de más de 5,600 presas de todos los tamaños, aunque se especula que pueden llegar a existir más de ocho mil presas en todo el territorio nacional. (CONAGUA, 2012)

Un gran número de las presas que existen en México fueron diseñadas y construidas hace varias décadas, con normativas de diseño y construcción correspondiendo a su época, los cuales en la actualidad han quedado obsoletos, a su vez, el crecimiento y desarrollo de la población cada vez es más notorio y aumenta la probabilidad de que se presente un desbordamiento sobre las presas.

Se ha visto que la temperatura a nivel mundial se ha incrementado más de un grado centígrado desde mediados del siglo XVII hasta la actualidad. Sin embargo, por otro

lado, hay estudios que estiman que a partir de la década de los 80's a la actualidad, la temperatura se ha incrementado en más de dos grados centígrados. Se estima que a consecuencia del aumento de la temperatura se han generado grandes incrementos en las precipitaciones de lluvia (IPCC, 2007).

La presa Jesús María cuenta con 115 años desde su construcción en 1909 y su desgaste que ha presentado en el lapso del tiempo ha dado motivo a que se le realicen algunas modificaciones.

En 1957 la Secretaría de Recurso Hídricos efectuó una rehabilitación que consistió en la ampliación del vertedor, posteriormente durante las abundantes lluvias de julio de 1991, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) le abrió una escotadura en el extremo izquierdo de la cortina y construyó un canal de desfogue.

Para darle estabilidad a la estructura el gobierno del Estado en el año de 1992 colocó material de recarga sobre el talud aguas abajo. (CONAGUA 2012).

Debido a las condiciones en que se construyó la Presa, se pone en duda la seguridad hidráulica que se brinda a la población aledaña.

Una gran variedad de países ha desarrollado metodologías basadas en el análisis de riesgos, las cuales son una herramienta útil a partir de las cuales se pueden establecer políticas de seguridad de presas, necesarias para poder entender y reducir los riesgos de falla que las obras puedan presentar.

La seguridad de presas es un sistema de estudio que enfatiza y salvaguarda la integridad y el funcionamiento de las presas que se encuentran en operación, en vísperas de construcción o modificación y de aquellas que están fuera de funcionamiento, se debe tomar en cuenta una serie de criterios y consideraciones para reducir las probabilidades de falla que ponen en riesgo a la población, bienes muebles e inmuebles y en general al medio ambiental y entorno (Arreguín, 2005).

El planteamiento de seguridad de presas y embalses está basado en reducir los riesgos mediante el uso de códigos y reglamentos basados en la técnica y la experiencia de los expertos, así como la validación de los factores de seguridad, aclarando como una medida de seguridad de carácter de riesgo empírico.

A lo largo de todo el país existen distintas técnicas, códigos, lineamientos, normativas y reglamentos para el diseño de presas, sin embargo, en el estado de Querétaro la CONAGUA, Comisión Estatal de Aguas (CEA) y la Comisión Estatal de Infraestructura (CEI) han homologado criterios acerca de las consideraciones a tomar en cuenta para el diseño y construcción de vasos reguladores de avenidas. Los cuales consisten en regular el volumen excedente producto de la urbanización relacionada a un periodo de retorno de 50 años (CEA, 2023).

### **3. HIPÓTESIS**

El nivel óptimo de operación de la presa Jesús María para satisfacer la demanda de riego al sector agrícola y regular al menos una lluvia asociada a un periodo de retorno de 50 años sin presentar desbordes; puede obtenerse a través de la modelación del tránsito de avenidas con distintos niveles iniciales de agua en el vaso.

### **4. OBJETIVOS**

#### **Objetivo General**

Determinar un nivel de operación óptimo para la presa Jesús María, que sea capaz de reducir los desbordes (maximizar el volumen de regulación), sin dejar de lado el almacenamiento destinado al uso agrícola.

#### **Objetivos específicos**

- Realizar un mapa hidrológico base de la cuenca de aportación de la presa Jesús María
- Determinar mediante métodos indirectos los gastos generados por las condiciones actuales de la cuenca, para varios periodos de retorno de lluvia.
- Realizar diversos modelos de tránsito de avenidas de la presa con ayuda del programa de cómputo HEC HMS®.
- Elaborar gráficas de comportamiento de los desbordes de la presa.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. Conceptos generales

#### Ciclo hidrológico.

Se puede describir como el movimiento de agua a través de todos sus estados (sólido, líquido y gas) para formar un intercambio entre la superficie terrestre y la atmósfera, la principal fuente de energía que alimenta este proceso proviene del sol, como se muestra en la Figura 1, (Chow et al., 1994)

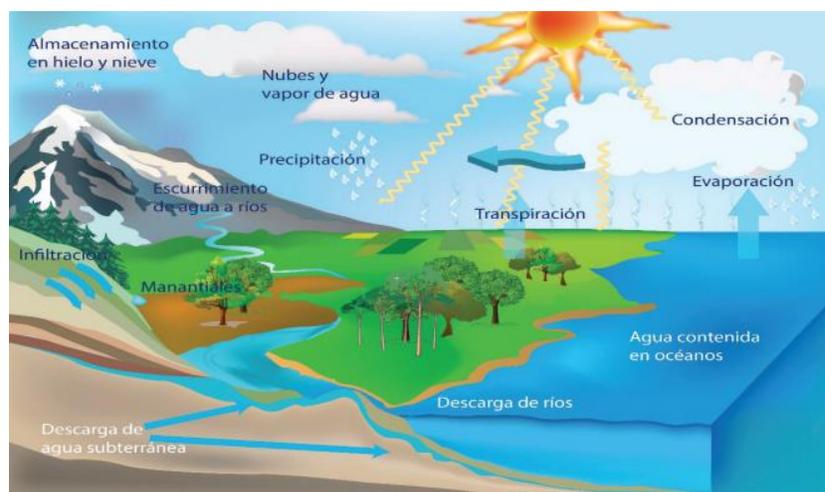


Figura 1. El ciclo hidrológico (modificado de Chow, 1964)

#### Cuenca hidrográfica.

Se puede definir como una superficie topográfica deprimida, delimitada por el contorno de las partes altas del relieve terrestre que capta las precipitaciones de lluvia para desfogarlas en un punto bajo, para seguir su confluencia hacia el mar (cuencas abiertas) o almacenarse en un estanque (cuencas cerradas) (Chereque, 1989).

#### Cauces

Son depresiones del terreno dentro de una cuenca hidrográfica, que cumplen la función de transportar los escurrimientos desde la parte alta hasta la parte baja, cabe mencionar que los cauces se van haciendo más robustos conforme desciende la altitud y esto es debido a que se va acumulando el flujo y transportan mayores volúmenes de agua (Montenegro, 2005)

### **Cauce principal**

Es el cauce de mayor longitud, que va desde la parte más alta hasta la parte más baja de la cuenca hidrográfica (Villón, 2002b)

### **Uso de suelo y vegetación**

Se considera como uso de suelo a la cobertura terrestre que el ser humano ha clasificado para desarrollar alguna actividad específica, para satisfacer sus necesidades. Para realizar lo antes mencionado se necesitan realizar una serie de gestiones para modificar la cobertura natural del suelo y transformarlo en un espacio de acuerdo con las necesidades requeridas, el uso más común que se le da es para desarrollar sembradíos, pastizales y desarrollos urbanos (FAO, 1997a; FAO/UNEP, 1999)

### **Probabilidad de ocurrencia**

En hidrología se interpreta como la probabilidad en que un evento vuelva a ocurrir en el mismo régimen. Matemáticamente es el inverso del periodo de retorno (Gómez et al., 2010)

### **Periodo de retorno**

Se define como el tiempo estimado que se espera en que un evento vuelva a ocurrir en el mismo régimen. Matemáticamente es el inverso de la probabilidad de ocurrencia (Gómez et al., 2010)

### **Precipitación**

Se conoce como la acción en la que el agua (en estado sólido o líquido) cae desde la atmosfera hasta el suelo. Este proceso puede ser en forma de agua líquida, nieve o granizo (Villón, 2002a)

### **Estaciones climatológicas**

Es un conjunto de instrumentos instalados en la intemperie en puntos estratégicos donde se consideran que los datos alojados son representativos y que permiten medir las variaciones del clima. Los eventos climáticos medidos pueden ser la precipitación, temperatura, evaporación, viento, tiempo, visibilidad, entre otros (CONAGUA, 2014).

## **Escurrimiento**

Se puede entender como el flujo de agua proveniente de la lluvia que transita por la superficie de una cuenca hidrográfica, y conforme pasa el tiempo, se va adhiriendo hacia los cauces (Villón, 2002a)

## **Pendiente de la cuenca**

Toma importancia porque de esta se derivan algunos procesos hidrológicos de gran importancia como es el escurrimiento, la humedad, la infiltración y el flujo base de los cauces. Es uno de los componentes físicos que determinan el tiempo en que los escurrecimientos permanecen en la cuenca y que por añadidura tiene relación directa con la magnitud de las avenidas (Campos, 2010).

### **5.2. Método de Taylor – Schwarz**

Este método se utiliza para determinar la pendiente en el cauce principal de una cuenca, la hipótesis consiste en considerar un cauce de estudio formado por varios tramos de canales de pendiente uniforme en donde el tiempo de traslado de estos canales es igual al del cauce (Aparicio, 2001):

$$S_{lc} = \left[ \frac{l_t}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\sqrt{S_i}}} \right]^2 \quad (1)$$

donde  $S_{lc}$  es la pendiente media del cauce (adimensional),  $l_t$  es la longitud total del cauce (en metros) y  $S_i$  es la pendiente del tramo  $i$  (adimensional).

### **5.3. Tiempo de concentración**

Se puede determinar como el tiempo de transporte del flujo desde la zona más elevada de la cuenca hasta el punto más bajo.

En el aspecto bibliográfico existe un gran número de ecuaciones para estimar el tiempo de concentración en cuencas. A continuación, se presentan las tres solicitadas por la CONAGUA (CONAGUA, 2014).

**Método de Kirpich:**

$$t_c = 0.0003245 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (2)$$

donde  $t_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca (en horas),  $L$  es la longitud del cauce principal (en metros) y  $S$  es la pendiente media del cauce (adimensional).

**Método de Rowe:**

$$t_c = \left( \frac{0.86L^3}{D} \right)^{0.385} \quad (3)$$

donde  $t_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca (en horas),  $L$  es la longitud del cauce principal (en metros) y  $D$  es el desnivel máximo sobre el cauce principal (en metros).

**Método del servicio de conservación de suelos (SCS)**

$$t_c = \frac{L^{1.15}}{3085D^{0.38}} \quad (4)$$

donde  $t_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca (en horas),  $L$  es la longitud del cauce principal (en metros) y  $D$  es el desnivel máximo sobre el cauce principal (en metros).

**5.4. Hidrograma**

Es una representación gráfica del cambio del gasto a través de tiempo en un punto de control. Donde el gasto ( $Q$ ) se define como el volumen de agua que transita a través de un medio por unidad de tiempo ( $m^3/s$ ). En la figura 2 se muestra un ejemplo de un hidrograma (Springall, 1970).

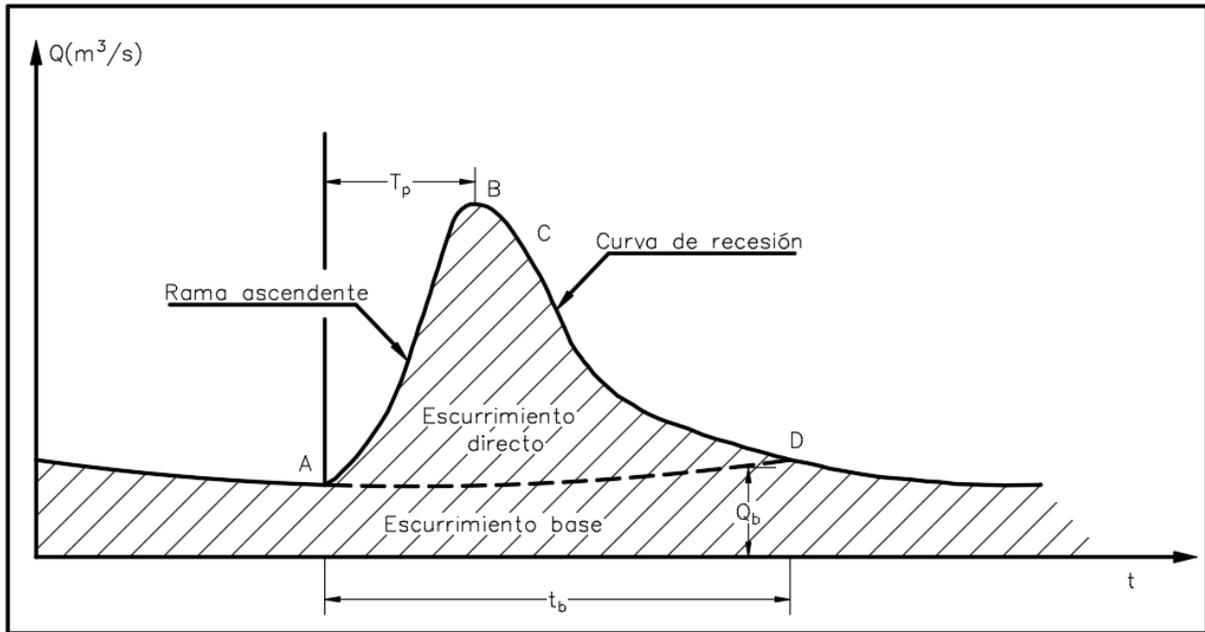


Figura 2. Elementos de un hidrograma. (modificado de Springall, 1970)

### 5.5. Método del Hidrograma Triangular (HUT)

Este método, fue desarrollado en Estados Unidos por el sistema de conservación de suelos, también se le puede llegar a conocer como el método del “número de curva” está conformado de dos fases. En la primera se hace un cálculo estimado del volumen que escurre durante la lluvia y, en la segunda fase se estima el tiempo de la dispersión del escurrimiento, incluyendo el caudal punta (Aparicio, 2001).

El intervalo de tiempo de la duración del hidrograma se representa en unidades del tiempo pico, al igual que los gastos que escurren, se representan en unidades del gasto pico. Para transformar las unidades es necesario multiplicar el gasto pico y tiempo pico por el hidrograma adimensional mostrado en la figura 3 (Chow et al., 1994)

En donde en el eje de las abscisas se representa la acumulación del tiempo y en las ordenadas la variación del gasto.

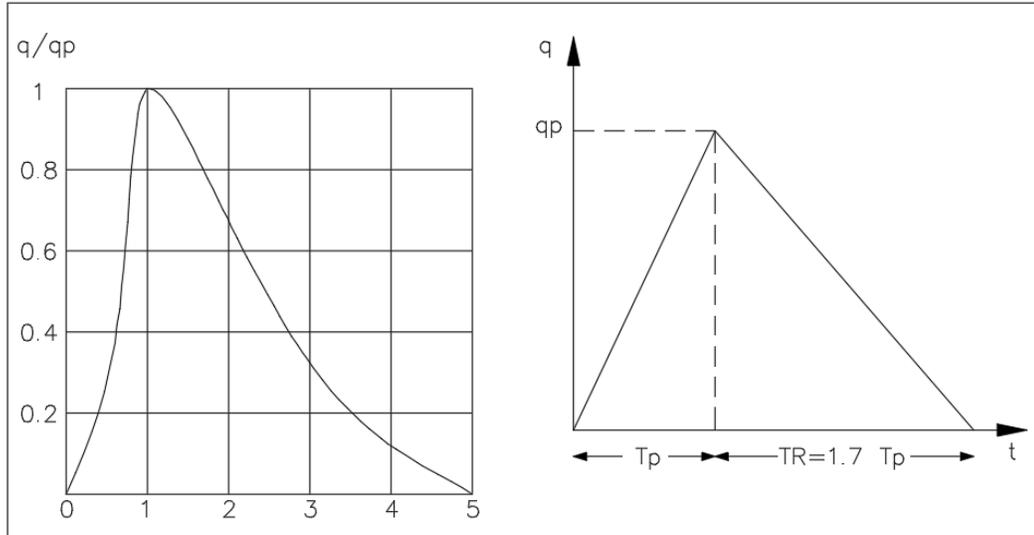


Figura 3. Hidrogramas unitarios sintéticos del Servicio de Conservación de Suelos. Donde a la derecha se muestra el hidrograma unitario triangular, mientras que a la izquierda se muestra el hidrograma adimensional. (modificado de Servicio de Conservación de Suelos EU, 1973).

Uno de los parámetros esenciales del hidrograma unitario triangular es el tiempo pico, el cual se puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$T_p = 0.60T_c + \frac{D}{2} \quad (5)$$

donde  $T_p$  es el tiempo pico (en horas),  $T_c$  es el tiempo de concentración (en horas) y  $D$  es la duración de la tormenta (en horas).

Los datos de entrada necesarios para emplear este método son el área en kilómetros cuadrados, el tiempo de concentración en horas, el número de curva de la cuenca y calcular la precipitación en exceso.

### 5.6. Precipitación en exceso.

La precipitación en exceso se estima mediante la siguiente ecuación:

$$He = \frac{\left(H_D - \frac{500}{N} + 5.08\right)^2}{H_D + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (6)$$

donde  $H_e$  es la precipitación en exceso (en horas),  $H_D$  es la precipitación media de diseño (en milímetros) y  $N$  es el número de curva de la cuenca (adimensional) (CONAGUA, 2014).

### 5.7. Precipitación de diseño.

Para la estimación de la precipitación media de diseño se utiliza la expresión de Emil Kuishiling y C.E. Gransky, quienes determinaron que la duración de la lluvia es igual al tiempo de concentración y el cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$H_D = \frac{KT_c^{1-e}}{1-e} \quad (7)$$

$$K = \frac{H_p(1-e)}{24^{(1-e)}} \quad (8)$$

donde  $H_D$  es la precipitación media de diseño (en milímetros),  $T_c$  es la duración de la lluvia o para este caso el tiempo de concentración (en horas),  $H_p$  es la precipitación máxima en 24 horas (en milímetros),  $K$  es el coeficiente de distribución (adimensional) y  $e$  es un parámetro adimensional que depende del tiempo de concentración, sirve para apegarse a la distribución de la lluvia y a la forma de la curva de intensidades y cuyos valores oscilan entre 0.58 y 0.80 como se muestra en la Tabla 1 (CONAGUA, 2014).

Tabla 1. Coeficiente de Kuishiling (CONAGUA, 2014)

Tc	e	Tc	e
0.20	0.800	3.60	0.648
0.40	0.775	3.80	0.644
0.60	0.750	4.00	0.640
0.80	0.725	4.20	0.636
1.00	0.700	4.40	0.632
1.20	0.696	4.60	0.628
1.40	0.692	4.80	0.624
1.60	0.688	5.00	0.620
1.80	0.684	5.20	0.616
2.00	0.680	5.40	0.612
2.20	0.676	5.60	0.608
2.40	0.672	5.80	0.604
2.60	0.668	6.00	0.600
2.80	0.664	7.00	0.597
3.00	0.660	8.00	0.594
3.20	0.656	9.00	0.592
3.40	0.652	10.00	0.589

Considerando los parámetros anteriores, el cálculo del gasto se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{0.556 * H_e * A}{2 * T_p} \quad (9)$$

Donde  $Q$  es el gasto calculado (en metros cúbicos sobre segundo),  $H_e$  es la precipitación en exceso (en milímetros),  $A$  es el área de la cuenca (en kilómetros cuadrados) y  $T_p$  es el tiempo pico (en horas) (CONAGUA, 2014).

### 5.8. Componentes básicos de una presa

Los componentes básicos se muestran en la figura 4, sin embargo, los niveles que se trabajarán en el presente trabajo son los siguientes:

NAMINO: nivel de aguas mínimas de operación

NAMIN: nivel de aguas mínimas

NAMO: nivel de aguas máximas ordinarias o de operación.

NAME: nivel de aguas máximas extraordinarias

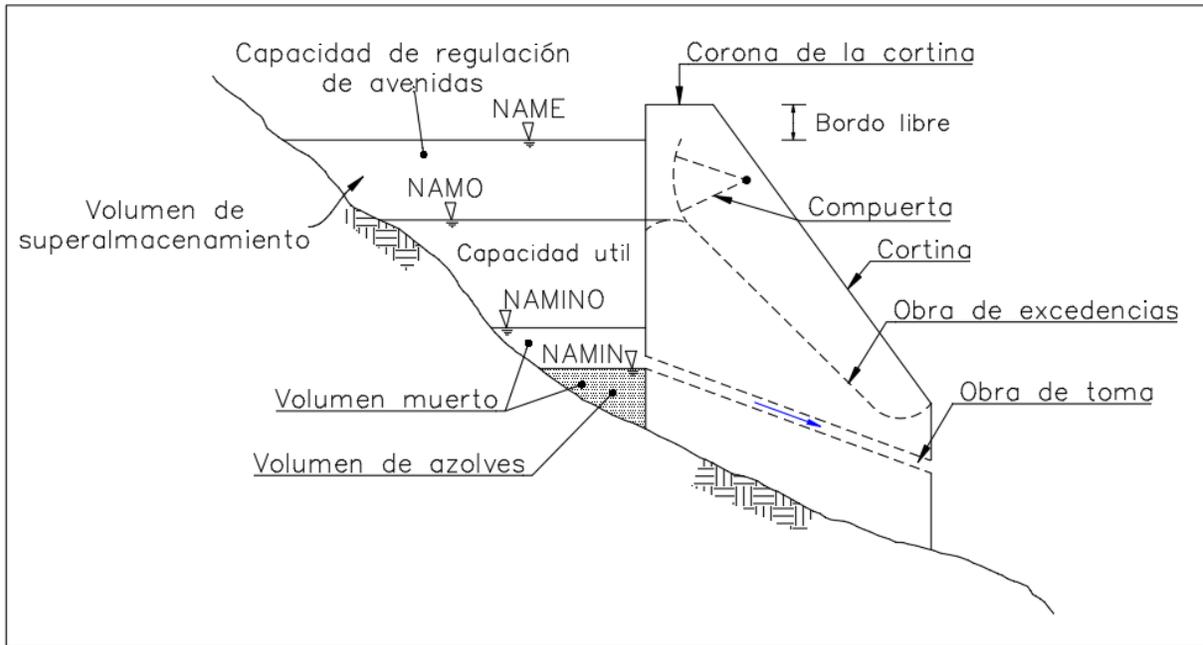


Figura 4. Componentes principales de una presa de almacenamiento. (modificado de Aparicio, 2001)

### 5.9. Tránsito de avenidas en vasos

Es una metodología utilizada para determinar las salidas de aguas de un vaso con base en las entradas de agua y la geometría misma del vaso. Algunas de sus aplicaciones son:

Conocer cómo se comportan los niveles de agua en el vaso y los gastos que salen por las distintas obras (excedencias y toma).

Dimensionar la obra de excedencias y toma.

Fijar el NAME y las dimensiones de las obras de desvío.

El tránsito de avenidas usa la ecuación de continuidad:

$$I - O = \frac{dV}{dt} \quad (10)$$

donde  $I$  es el gasto de entrada al vaso (en metros cúbicos por segundo),  $O$  es el gasto de salida del vaso (en metros cúbicos por segundo),  $\frac{dV}{dt}$  es la variación del volumen almacenado en el tiempo.

Un hidrograma que pasa a través de una presa se comporta aproximadamente como se muestra en la Figura 5. En donde al inicio del escurrimiento las condiciones de entrada son similares a las de salida. Posteriormente ambos hidrogramas irán en aumento hasta que el hidrograma de entrada llegue a un punto máximo y comience a descender, tiempo después el hidrograma de salida llegará a un punto máximo, en este punto es donde se presenta el mayor almacenamiento en la presa y por añadidura el nivel de agua máximo y, el área que se encuentra en medio de ambos hidrogramas es representado como el volumen máximo que almacena la presa de acuerdo con el hidrograma de entrada (Aparicio, 2001).

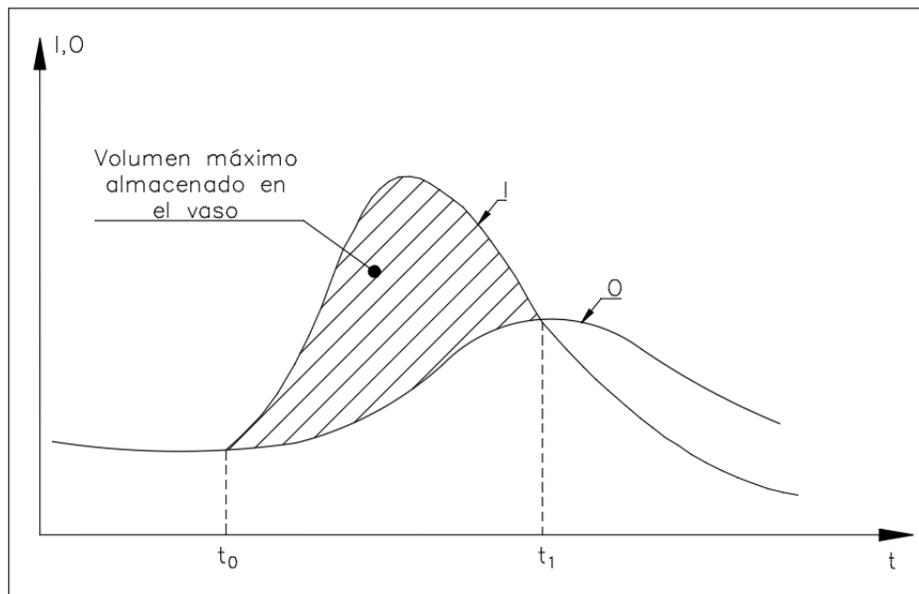


Figura 5. Hidrogramas de entrada (I) y de salida (O). (modificado de Aparicio, 2001)

## **5.10. Programas de cómputo utilizados**

Para poder llevar a cabo el presente trabajo se utilizaron algunos programas de cómputo como lo son:

### **GOOGLE EARTH®**

Es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de acceso libre utilizado para visualización espacial del relieve mediante la unión de fotografías satelitales y un modelo digital de elevaciones que incluye el software, además, permite la creación de entidades de polígonos y líneas las cuales se puede determinar sus áreas, perímetros y desnivel topográfico de las líneas.

### **QGIS®**

Es un Sistema de Información Geográfica de acceso libre y código abierto, es utilizado para la creación, visualización, análisis y edición de datos geoespaciales.

Es un programa de código abierto para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS y Microsoft Windows. Permite el manejo de datos de tipo vectorial y tipo raster.

### **AX®**

Es un programa de cómputo elaborado en el año de 1992 (primera versión) por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, para sistema operativo de Windows, es utilizado para realizar ajustes de funciones de probabilidad a series de datos, calcula el error cuadrático y estima extrapolación de valores para distintos periodos de retorno.

Las funciones con las que trabaja el programa son las siguientes:

- Normal.
- Log-normal.
- Gumbel.
- Exponencial.
- Gamma
- Doble Gumbel

Mientras que los métodos para el cálculo de los parámetros de las funciones de probabilidad son:

- Momentos
- Máxima verosimilitud

Además, las funciones de Log-normal y Gamma se pueden calcular para dos y tres parámetros. Para la función Doble Gumbel el método de cálculo es mediante mínimos cuadrados y se puede llegar a resolver de manera numérica o visual.

Los errores estándar de cada una de las funciones se pueden visualizar los ajustes por separado o mediante el cálculo global y se aprecia una tabla como el ejemplo de la Tabla 2 (Jiménez, 1997).

Tabla 2. Funciones de distribución de probabilidad analizadas y métodos de solución (Jiménez, 1997).

Función	Métodos			
	Momentos		Máxima verosimilitud	
	2 Par.	3 par.	2 par.	3 par.
Normal	√	---	√	---
Log-normal	√	√	√	√
Gumbel	√	---	√	---
Exponencial	√	---	√	---
Gamma	√	√	√	√
Doble Gumbel	√			

### HEC-HMS®

El modelo HEC-HMS o sistema de modado hidrológico por sus siglas en inglés, es un programa de cómputo de acceso libre desarrollado por el cuerpo de ingenieros de la armada de Estados Unidos. Cuenta con una gran cantidad de usos a la hora de realizar modelos hidrológicos y uno de ellos es el modelado del tránsito de avenidas en vasos (US Army Corps of Engineers, 2024).

Para realizar el tránsito de avenidas de una presa, HEC-HMS utiliza cinco componentes que incluyen en el programa, como son el modelo de la cuenca, modelo meteorológico, especificaciones de control, series de tiempo y pares de datos, como se muestran en la Figura 6.

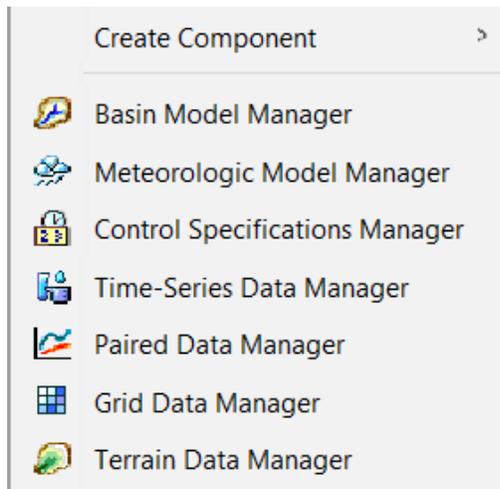


Figura 6. Componentes utilizados por el programa HEC-HMS (Elaboración propia en el programa HEC-HMS).

### **Modelo de la cuenca.**

Se utiliza para trabajar la parte física de la cuenca insertando y uniendo los siguientes elementos

- Fuente: Este elemento se utiliza para introducir al modelo el gasto de la cuenca, no tiene entradas y el gasto es definido por el usuario.
- Reservorio: se utiliza para modelar el comportamiento del hidrograma a través del embalse.
- Salida: funciona para verter el hidrograma de salida del embalse.

### **Modelo meteorológico.**

El modelo meteorológico estima la lluvia que se necesita, se puede ingresar precipitación puntual o por intervalos de tiempo, se puede modelar precipitación líquida como sólida o evapotranspiración, también se puede calcular el deshielo a través de la variación de las temperaturas.

Para este caso se utilizará el método de precipitación del hietograma especificado, donde el usuario define el ingreso del hietograma, como se muestra en la Figura 7.

<b>Met Name: MODELO_METEOROLOGICO</b>	
Description:	<input type="text"/>
Unit System:	Metric <input type="button" value="v"/>
Shortwave:	--None-- <input type="button" value="v"/>
Longwave:	--None-- <input type="button" value="v"/>
Precipitation:	Specified Hyetograph <input type="button" value="v"/>
Temperature:	--None-- <input type="button" value="v"/>
Windspeed:	--None-- <input type="button" value="v"/>
Pressure:	--None-- <input type="button" value="v"/>
Dew Point:	--None-- <input type="button" value="v"/>
Evapotranspiration:	--None-- <input type="button" value="v"/>
Replace Missing:	Abort Compute <input type="button" value="v"/>

Figura 7. Modelo meteorológico utilizado en el tránsito de avenidas en vasos en HEC-HMS. (Elaboración propia en el programa HEC-HMS).

### Especificaciones de control.

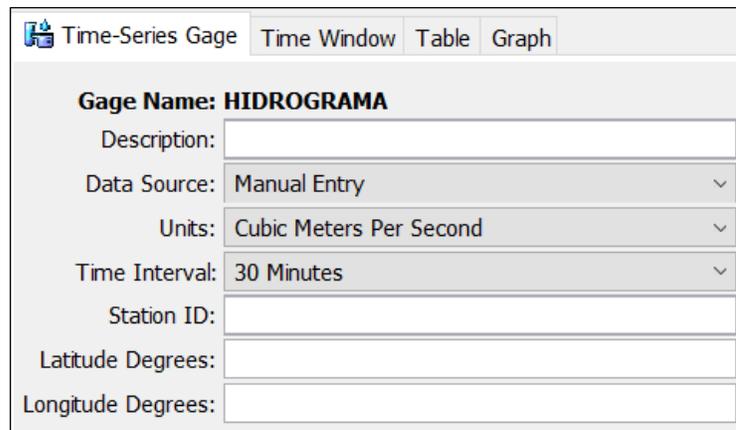
En este apartado se define el tiempo de duración del modelo, incluyendo la fecha y hora de inicio de la modelación, así como la de término. También incluye el intervalo de tiempo entre cada paso de la modelación, como se muestra en la Figura 8.

<b>Control Specifications</b>	
<b>Name: CONTROL</b>	
Description:	<input type="text"/>
*Start Date (ddMMMYYYY)	<input type="text"/>
*Start Time (HH:mm)	<input type="text"/>
*End Date (ddMMMYYYY)	<input type="text"/>
*End Time (HH:mm)	<input type="text"/>
Time Interval:	30 Minutes <input type="button" value="v"/>

Figura 8. Especificaciones de control en HEC-HMS. (Elaboración propia en el programa HEC-HMS).

### Datos de series de tiempo.

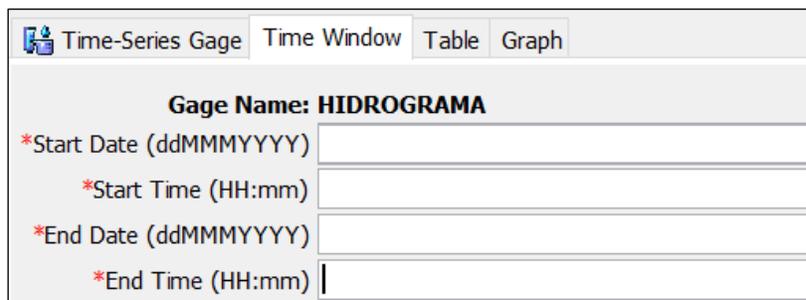
En este apartado es donde el usuario ingresa de forma manual el hidrograma a través de los medidores de entrada. El usuario define el sistema de unidades del hidrograma y el intervalo de entiempo entre cada paso, como se muestra en la Figura 9, Figura 10 y Figura 11.



The screenshot shows the 'Time-Series Gage' dialog box with the following fields and values:

Field	Value
Gage Name	HIDROGRAMA
Description	
Data Source	Manual Entry
Units	Cubic Meters Per Second
Time Interval	30 Minutes
Station ID	
Latitude Degrees	
Longitude Degrees	

Figura 9. Unidades de las series de tiempo en HEC-HMS. (Elaboración propia en el programa HEC-HMS).



The screenshot shows the 'Time-Series Gage' dialog box with the following fields and values:

Field	Value
Gage Name	HIDROGRAMA
*Start Date (ddMMYYYY)	
*Start Time (HH:mm)	
*End Date (ddMMYYYY)	
*End Time (HH:mm)	

Figura 10. Control de las series de tiempo en HEC-HMS. (Elaboración propia en el programa HEC-HMS).

Time-Series Gage		Time Window	Table	Graph
Time (ddMMMYYYY, HH:mm)		Discharge (M3/S)		
01oct2021, 00:00				
01oct2021, 00:30				
01oct2021, 01:00				
01oct2021, 01:30				
01oct2021, 02:00				
01oct2021, 02:30				
01oct2021, 03:00				
01oct2021, 03:30				
01oct2021, 04:00				
01oct2021, 04:30				
01oct2021, 05:00				
01oct2021, 05:30				
01oct2021, 06:00				

Figura 11. Datos de las series de tiempo en HEC-HMS. (Elaboración propia en el programa HEC-HMS).

**Pares de datos.**

Muy a menudo los modelos hidrológicos requieren datos en pares para definir las entradas con base en funciones, donde se relaciona una variable dependiente y una independiente. Para definir el almacenamiento del embalse se lleva a cabo mediante una función elevaciones – almacenamiento, en donde en el eje de la abscisas está definido por las elevaciones y el eje de las ordenadas el almacenamiento, como se muestra en la Figura 12.

Paired Data Table Graph	
Elevation (M)	Storage (1000 M3)

Figura 12. Datos en pares de la función elevaciones - almacenamiento en HEC-HMS. (Elaboración propia en el programa HEC-HMS).

## **6. METODOLOGIA**

### **6.1. Información requerida.**

Para comenzar con el desarrollo de este trabajo se necesita información preliminar, a continuación, se enlista la información que se recabó para el desarrollo del trabajo:

#### **Estaciones meteorológicas de influencia.**

Como parte fundamental del análisis hidrológico, es necesario contar con información de lluvia. Para este proyecto se ha trabajado con precipitaciones máximas en 24 horas, las cuales están a cargo de la CONAGUA y son de acceso libre. En el apartado 10 de este capítulo se muestran los Polígonos de Thiessen como método de selección de estaciones.

Los datos de las estaciones seleccionadas son solicitados a la CONAGUA dirección Querétaro.

Como archivo preliminar se descargó de la página de CONAGUA un archivo en formato kmz, que contiene información de las estaciones meteorológicas en operación y las suspendidas. El archivo contiene el nombre oficial, clave y ubicación georreferenciada de las estaciones.

#### **Topografía.**

El instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) cuenta en su plataforma digital una base de datos con un modelo continuo de elevaciones de toda la república mexicana, mejor conocido como modelo digital de elevaciones (MDE).

Para fines de este trabajo se obtuvo el modelo digital de elevaciones en escala 1:50,000, con una resolución de píxel de 30 metros, el cual ha sido empleado en el apartado 3 para la delimitación de la cuenca de aportación (INEGI, 2023).

#### **Uso de suelo y edafología.**

La Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) es la encargada de la administración del tipo de suelo. En su portal digital cuenta con una base de datos, en donde se muestra información de edafología en formato digital tipo

shape, para poder identificar características y tipo de suelo de la zona de estudio, y posteriormente corroborar con las visitas de campo, se descargaron los archivos más actuales correspondientes a la fecha de publicación del años 2001.

Mientras que el INEGI cuenta en su plataforma digital una base de datos con información de los usos de suelo. Por lo que se obtuvieron los datos para posteriormente asignarles números de escurrimiento y emplearlos en la metodología de estudio, se descargaron los archivos más actuales correspondientes a la fecha de publicación del año 2019.

### **Visita de campo.**

Para poder entender y describir el comportamiento de la presa Jesús María y su cuenca de aportación se realizaron diversas visitas al sitio de estudio y sus alrededores, como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Visita de campo a la Presa Jesús María y sus alrededores.

Las visitas de campo son de gran importancia para la elaboración de documentos científicos, ya que nos ayudan a calibrar los modelos teóricos, y obtener valores lo más

parecidos a la realidad. Las visitas de campo se tendrán que hacer cuantas veces sean necesarias hasta tener un ajuste lo más preciso posible.

## 6.2. Descripción del área de estudio.

La presa Jesús María se encuentra ubicada al Este de la ciudad de Querétaro en las inmediaciones de la localidad de La Griega, en el municipio de El marqués, Qro. La vía de acceso a la cortina es mediante una brecha que colinda con la carretera estatal 500. El vertedor principal y la obra de toma se encuentran ubicados aproximadamente en la latitud  $20.6682^\circ$  y longitud  $-100.2517^\circ$ , como se observa en la Figura 14.

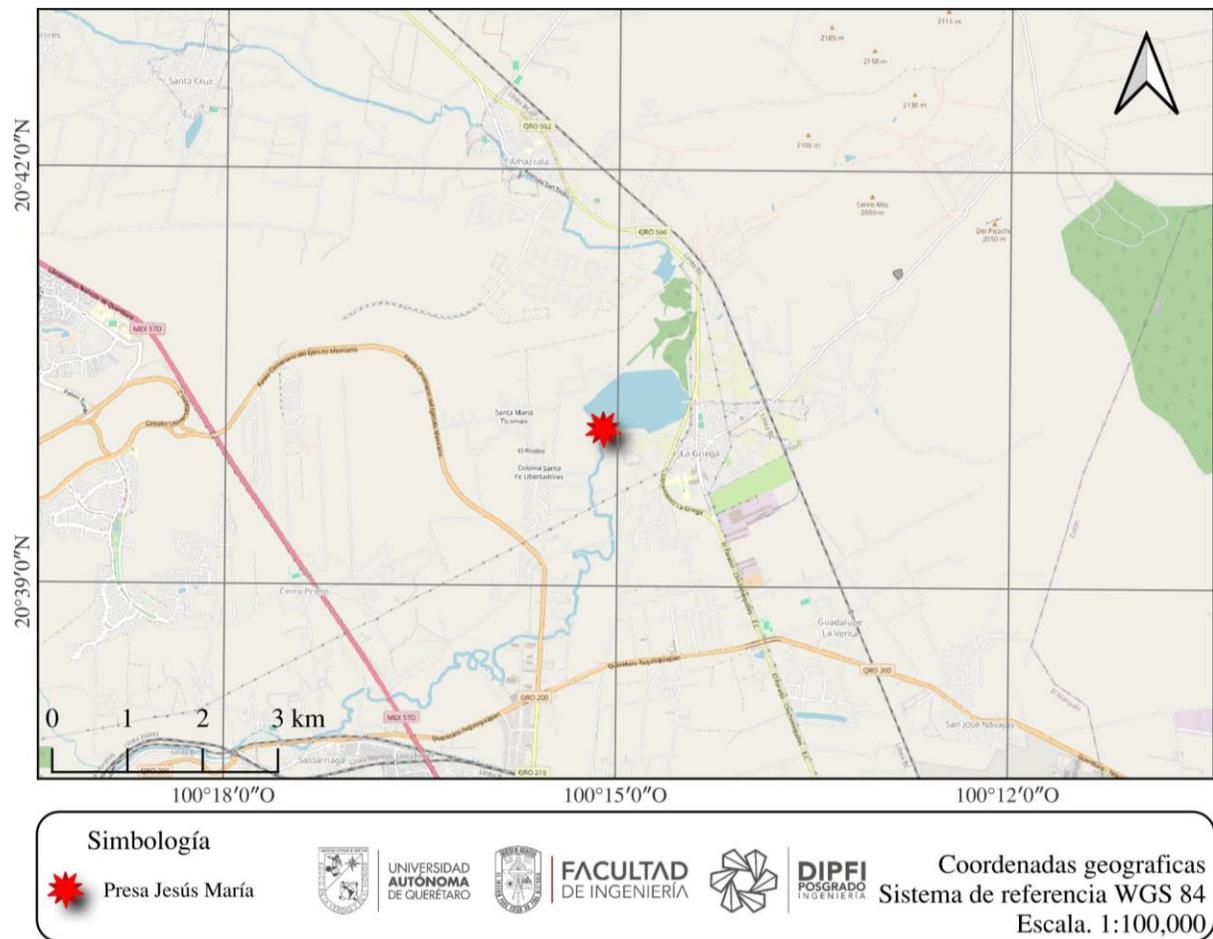


Figura 14. Ubicación de la presa Jesús María (Elaboración propia en el programa QGIS).

Sin embargo, como se observa en la Figura 13, la presa se ubica en una zona baja, por lo que parte de los escurrimiento pluviales provienen de las partes altas de las montañas y por esta razón es necesario delimitar la cuenca de aportación.

### **6.3. Delimitación de la cuenca de aportación.**

Para delimitar la cuenca de aportación a la presa Jesús María se utilizó el modelo digital de elevaciones del INEGI, escala 1:50,000, el cual se insertó en el programa “QGIS 3.28.4” en el sistema de referencia WGS 84, como punto de salida se ha colocado un punto con la coordenada de la cortina.

Con los datos de entrada anteriores y ayuda del programa se ha delimitado un parteaguas de manera preliminar para posteriormente ser corregido. En la Figura 15 se muestra la cuenca de aportación preliminar:

Dentro de la cuenca de influencia de la presa Jesús María se encuentra la presa El Carmen y la Presa Pirules, dos grandes obras de almacenamiento que fueron diseñadas para retener volúmenes de escurrimientos para periodos de retorno de hasta 10,000 años (CONAGUA, 2012), y siendo que el presente trabajo solo considera periodos de retorno de hasta 1,000 años, se optó por reducir el área de aportación de la presa Jesús María, considerando la cuenca de influencia desde la parte baja de las cortinas de éstas presas hasta la parte alta de la cortina de la presa Jesús María.

Así como también se ajustó el parteaguas de la cuenca de influencia de la presa Jesús María con base en las modificaciones urbanas como lo son: carreteras, muros de fraccionamientos, desarrollos, entre otros. Para finalmente considerar la cuenca como se muestra en la Figura 16.

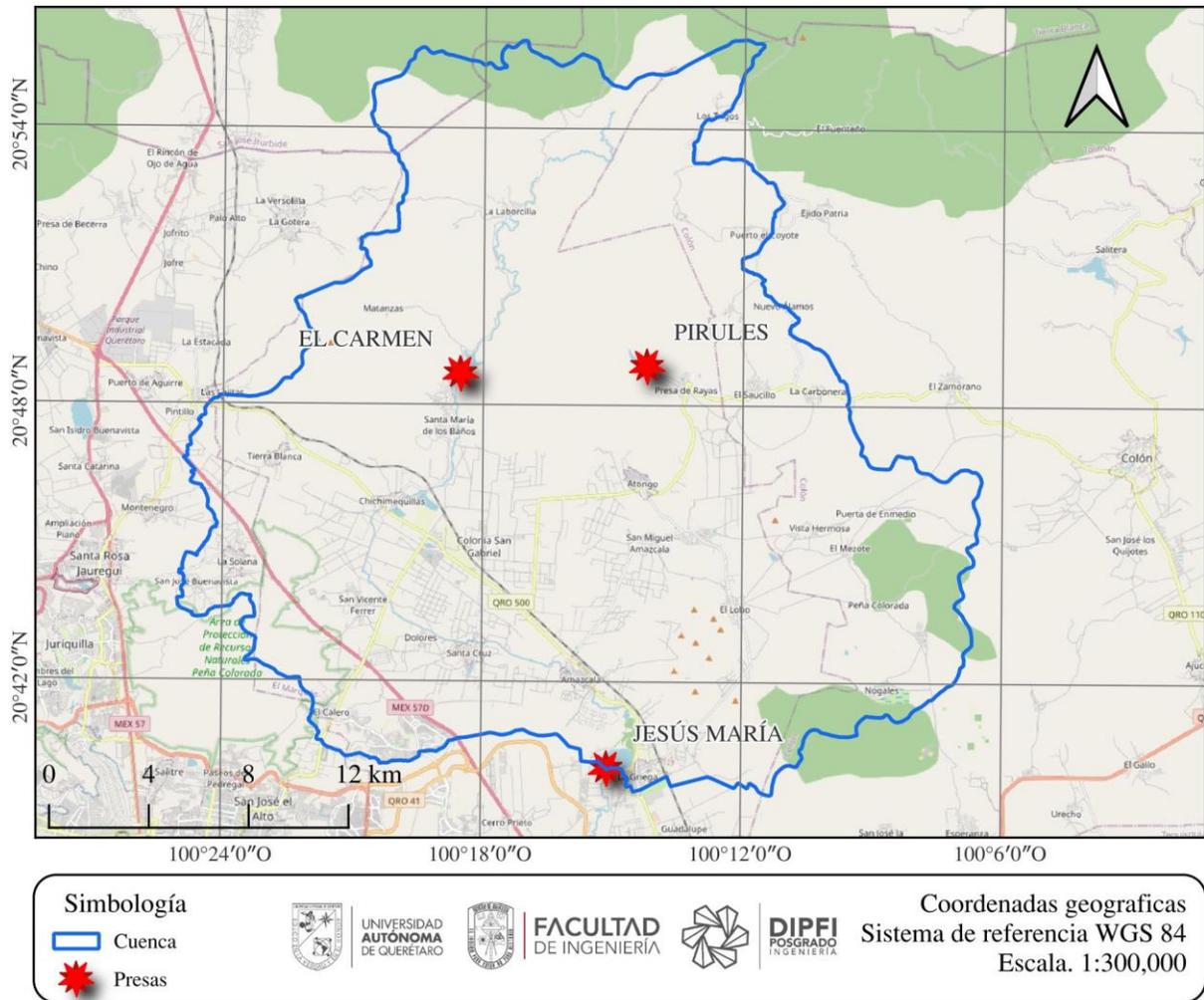


Figura 15. Cuenca de aportación de la presa Jesús María, preliminar. (Elaboración propia en el programa QGIS).

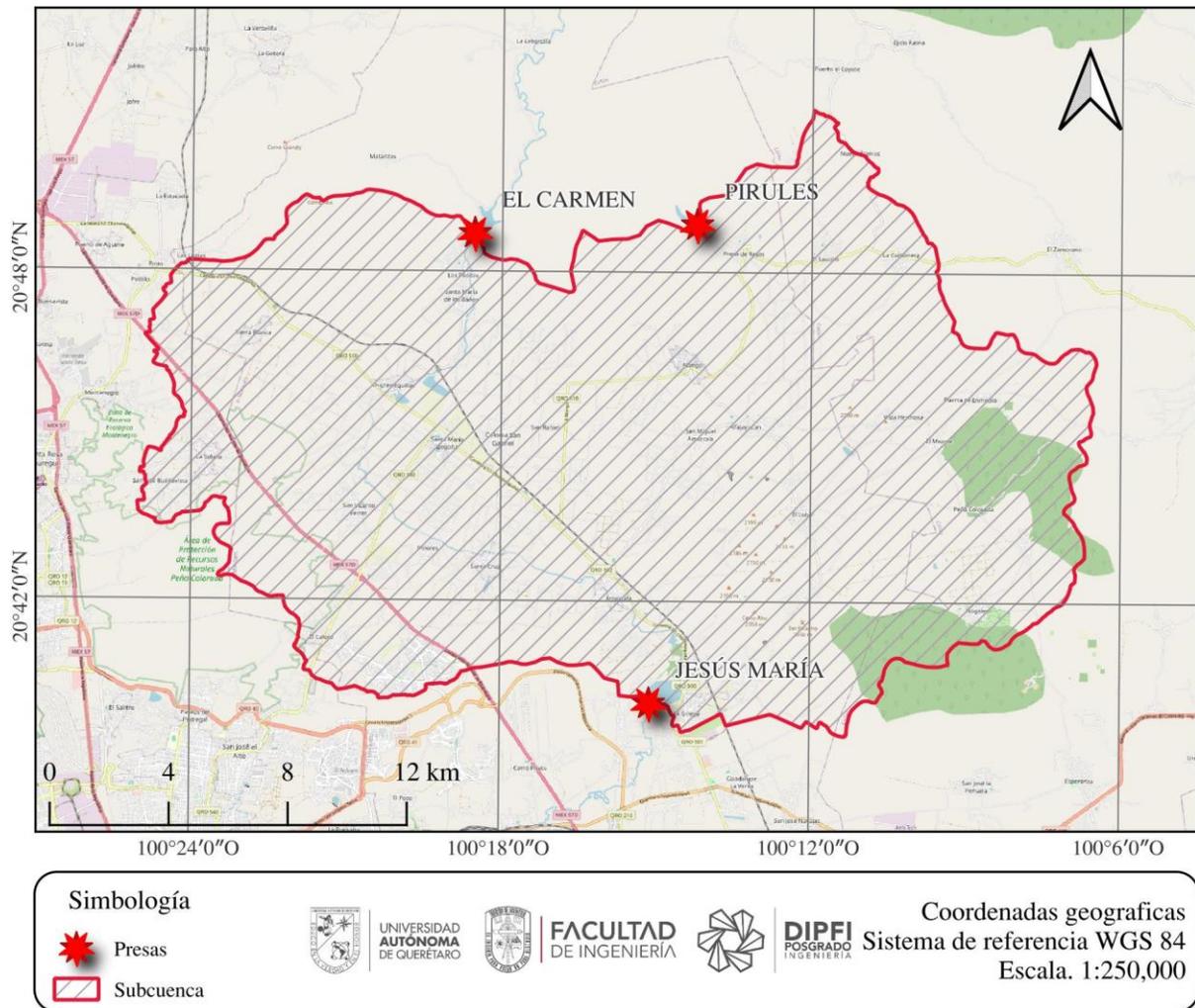


Figura 16. Cuenca de aportación de la presa Jesús María, final. (Elaboración propia en el programa QGIS).

#### 6.4. Parámetros fisiográficos de la cuenca.

##### Área de la cuenca.

Para obtener la superficie que ocupa la cuenca se utilizó el programa “QGIS 3.28.4”, utilizando la máscara resultante en la delimitación de la cuenca de influencia de la presa (figura 16), obteniendo la superficie de la cuenca en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>).

## Longitud y desnivel del cauce principal.

Con el programa "QGIS 3.28.4" se obtuvo una serie de cauces con base en el método de Strahler, posteriormente se unieron las líneas para obtener el cauce más largo de toda la cuenca, siendo éste el cauce principal, como se muestra en la *Figura 17*.

Con apoyo del modelo digital de elevaciones y el archivo vectorial del cauce principal, se graficó en el eje de las abscisas la distancia y en el de las ordenadas la elevación como se muestra en la *Figura 18*.

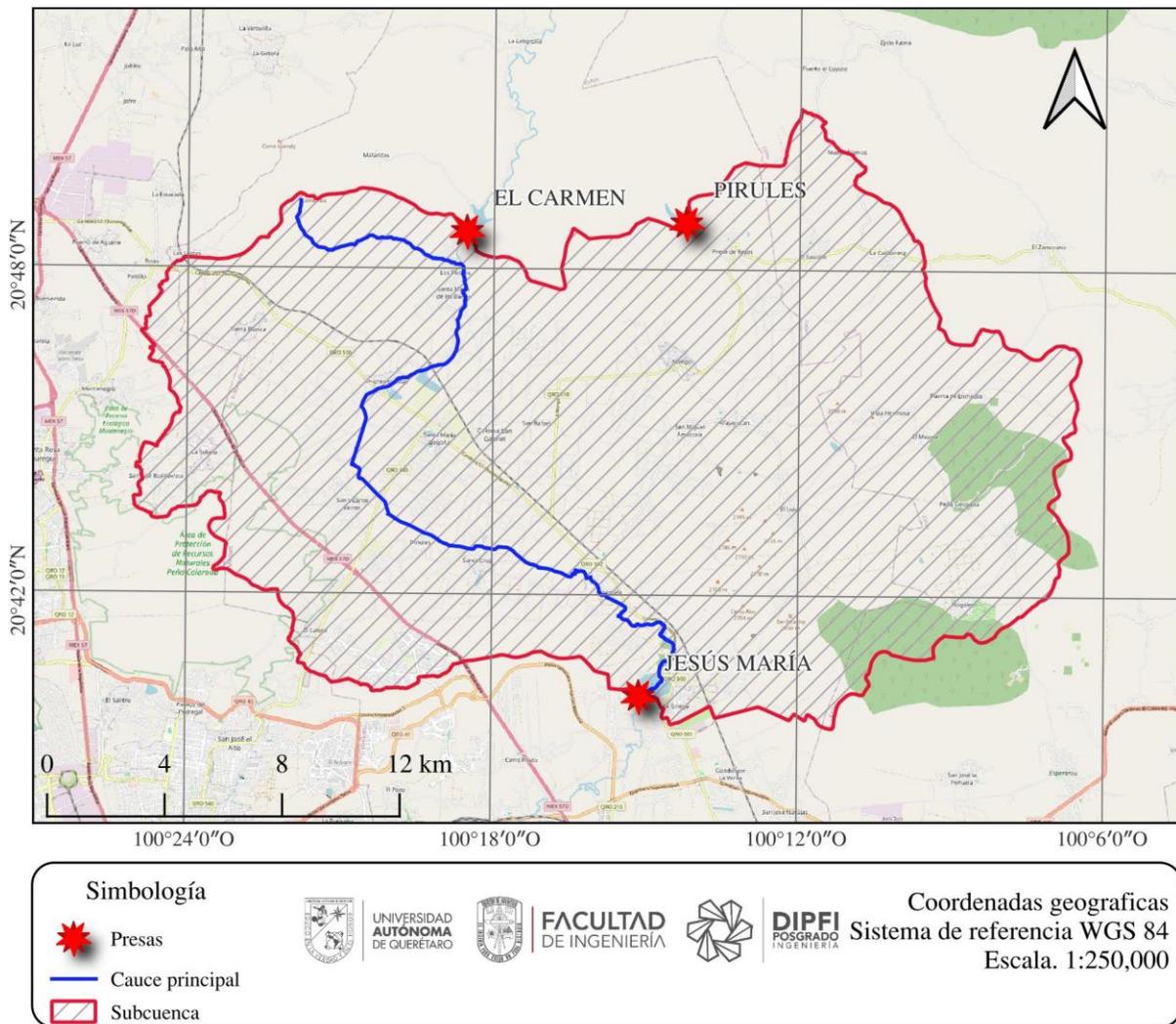


Figura 17. Cuenca de aportación de la presa Jesús María y cauce principal (Elaboración propia en el programa QGIS).

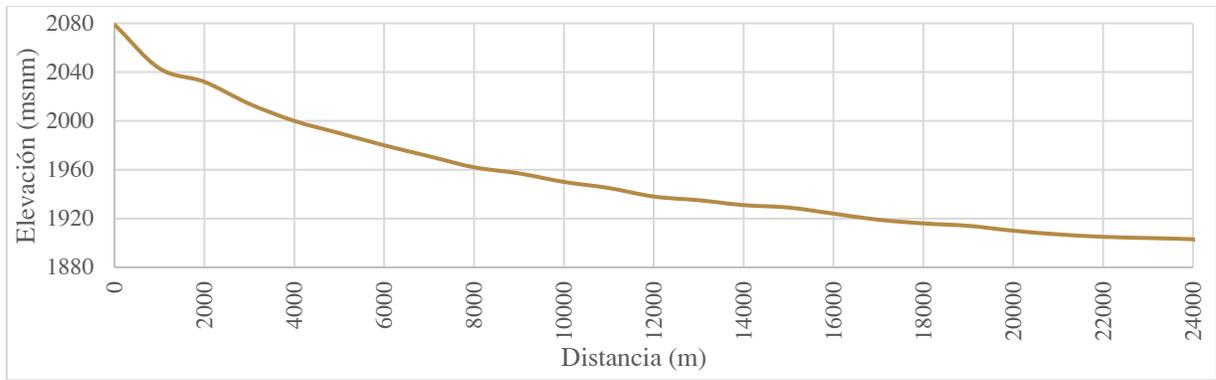


Figura 18. Perfil de elevaciones del cauce principal.

### 6.5. Pendiente del cauce principal.

El cálculo de la pendiente del cauce principal se realizó mediante el método de Taylor-Schwarz, con ayuda del perfil de elevaciones del cauce principal mostrado en la Figura 18 se construyeron intervalos de canales a cada 1,000 metros y se obtuvo una pendiente de 0.0042 como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de la pendiente del cauce principal mediante el método Taylor-Schwarz.

Cadenamiento	Elevación (m.s.n.m)	Longitud (m)	Dif. Elev. (m)	$\sqrt{S_i}$	$\frac{l_i}{\sqrt{S_i}}$
0	2079				
1000	2043	1000	36	0.1897	5270.46
2000	2032	1000	11	0.1049	9534.63
3000	2014	1000	18	0.1342	7453.56
4000	2000	1000	14	0.1183	8451.54
5000	1990	1000	10	0.1000	10000.00
6000	1980	1000	10	0.1000	10000.00
7000	1971	1000	9	0.0949	10540.93
8000	1962	1000	9	0.0949	10540.93
9000	1957	1000	5	0.0707	14142.14
10000	1950	1000	7	0.0837	11952.29
11000	1945	1000	5	0.0707	14142.14
12000	1938	1000	7	0.0837	11952.29
13000	1935	1000	3	0.0548	18257.42
14000	1931	1000	4	0.0632	15811.39
15000	1929	1000	2	0.0447	22360.68
16000	1924	1000	5	0.0707	14142.14
17000	1919	1000	5	0.0707	14142.14
18000	1916	1000	3	0.0548	18257.42
19000	1914	1000	2	0.0447	22360.68
20000	1910	1000	4	0.0632	15811.39
21000	1907	1000	3	0.0548	18257.42
22000	1905	1000	2	0.0447	22360.68
23000	1904	1000	1	0.0316	31622.78
24000	1903	1000	1	0.0316	31622.78
24100	1902	100	1	0.1000	1000.00
$\Sigma =$		24100	177	1.98	369987.78
PENDIENTE (TAYLOR - SCHWARZ) =					0.0042
PENDIENTE DIRECTA =					0.0073

## **6.6. Tiempo de concentración.**

De acuerdo con el apartado 3 del capítulo 5, el tiempo de concentración quedó definido de la siguiente manera:

- Método de Rowe: 4.73 horas
- Método de kirpich: 8.37 horas
- Método del SCS: 4.62 horas

El tiempo seleccionado para los cálculos posteriores fue el obtenido por el método del servicio de conservación de suelos de los estados unidos, debido a que es el tiempo en el cual la cuenca presenta una respuesta más rápida, siendo un tiempo de 4.62 *horas*.

## **6.7. Características de uso de suelo y vegetación.**

En primer paso, para poder asignar los tipos de suelos a la cuenca, se utilizó el archivo digital de edafología en formato shape descargado de la página web de la CONABIO, posteriormente se cortó la capa con la máscara de la cuenca, esto se llevó a cabo en el programa "QGIS 3.28.4". Los diferentes tipos de suelos que predominan en la cuenca son: Feozem Haplico, Feozem Luvico, Litosol, Vertisol Pelico y Yermosol Haplico, en la figura 7 se muestran las distribuciones de los tipos de suelo en la cuenca.

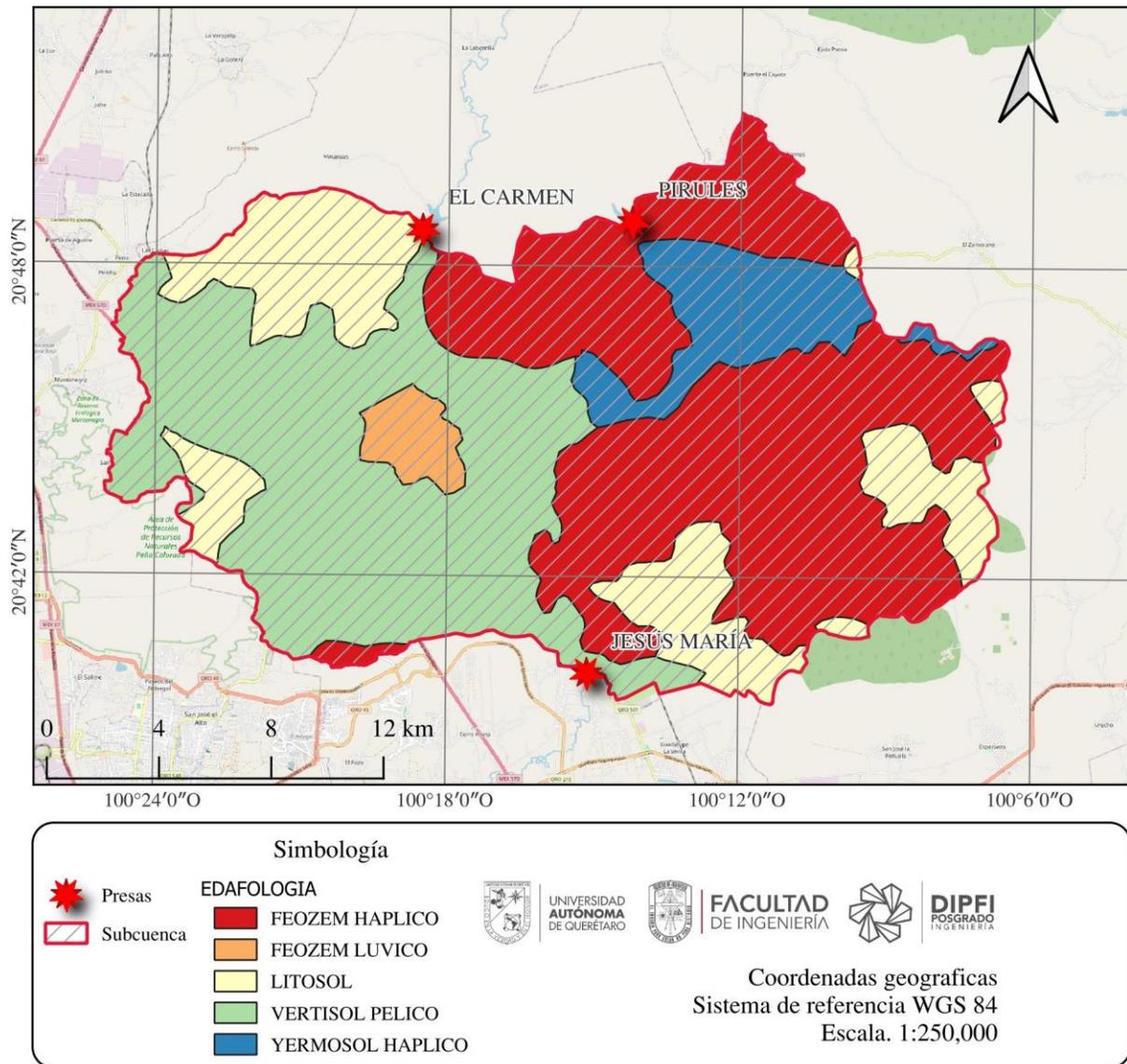


Figura 19. Distribución de los tipos de suelo en la cuenca. (Elaboración propia en el programa QGIS).

De acuerdo con la guía de interpretación de cartografía: edafología (INEGI, 2004) los tipos de suelos quedan clasificados como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de los tipos de suelos para la cuenca.

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Clasificación</b>
Feozem Háplico	B
Feozem Lúvico	C
Litosol	D
Vertisol Pélico	C-D
Yermosol Háplico	C

Se realizó la distribución de los usos de suelos de la cuenca tomando como referencia la clasificación de usos de suelo mostrado en la Tabla 4.

Para la distribución de los usos de suelo se utilizó el archivo descargado de la página oficial del INEGI, que remite a los usos de suelo, una vez realizada la validación de los datos, se observó que el archivo no está actualizado, por lo que con ayuda del programa “QGIS 3.28.4”, se insertó una imagen georreferenciada y corregida reciente de la plataforma “ESRI” y se procedió a actualizar el archivo, insertando polígonos y líneas que corresponden a las zonas urbanas, industriales, carreteras y caminos.

Los usos de suelos de la cuenca resultantes se muestran en la Figura 20.

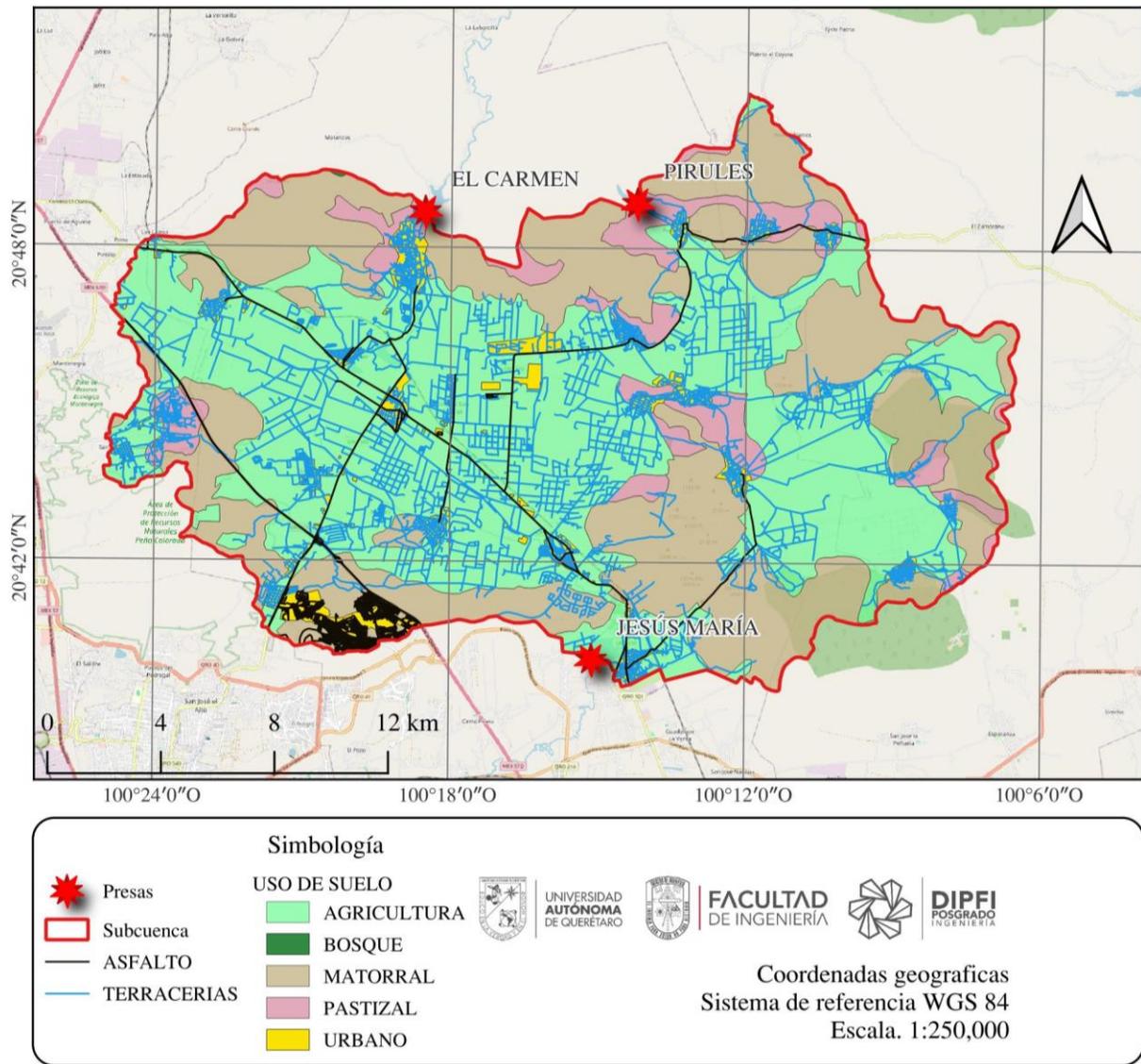


Figura 20. Distribución de los usos de suelo en la cuenca. (Elaboración propia en el programa QGIS).

Los usos de suelos que predominan en la cuenca son los siguientes:

- Caminos de terracerías.
- Carreteras de asfalto.
- Zonas Urbanas e industriales.
- Agrícola
- Bosques
- Matorrales.
- Pastizales.

## 6.8. Número de escurrimiento.

El número de curva asignado fue realizado con base en los usos de suelo de la cuenca, como se muestran en la Figura 20, con ayuda del programa “QGIS 3.28.4” se determinaron las superficies y porcentajes de cada uno de los usos de suelos y cada uno se les asignó un número de curva de acuerdo con la bibliografía consultada (Aparicio, 1992), para posteriormente obtener un número ponderado, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Ponderación del número de escurrimiento de la cuenca con base en los usos de suelo.

USO DEL SUELO	ÁREA TRIBUTARIA km <sup>2</sup>	% DEL ÁREA TOTAL	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	NÚMERO DE CURVA PARA EL GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO		
				TIPO DE SUELO	VALOR DE "N"	VALOR DE "N" PONDERADO
<i>Calles y caminos</i>						
<i>Terracerías</i>	9.510	2.14		C	87	1.86
<i>Asfalto</i>	2.590	0.58		C	92	0.54
<i>Rancherías, pueblos y zonas urbanas (65%) *, con lotes de 500 m<sup>2</sup> o menos</i>	20.811	4.69		C	90	4.22
<i>Suelo Agrícola cultivado</i>						
<i>Cultivo en hilera</i>	216.403	48.74	Buena	C	77	37.53
<i>Terreno natural</i>						
<i>Bosques</i>	0.072	0.02	Regular	C	73	0.01
<i>Matorral, maleza</i>	163.012	36.71	Buena	C	65	23.86
<i>Hierba o pasto</i>	31.598	7.12	Buena	C	74	5.27
<b>TOTAL:</b>	<b>443.996</b>	100.00				<b>73.29</b>
<b>Cuenca condiciones actuales</b>	<b>443.996</b>	<b>km<sup>2</sup></b>				

## 6.9. Análisis de lluvias.

Una parte fundamental como variable de entrada es la lluvia, para el presente trabajo se utilizaron las precipitaciones máximas en 24 horas a cargo de la CONAGUA. Para elegir las estaciones meteorológicas más cercanas a la cuenca de estudio se trabajó con el archivo en formato kmz mencionado en el apartado uno de información requerida, este archivo se exportó al programa “QGIS 3.28.4”, en donde se observan las estaciones en operación más cercanas a la cuenca de estudio como son: 22049 (ZAMORANO), 22045 (JURIQUILLA), 11144 (CHARAPE), 22070 (PLANTEL 7), 22046 (NOGALES), 22026 (COLON), entre otras como se muestra en la Figura 21.

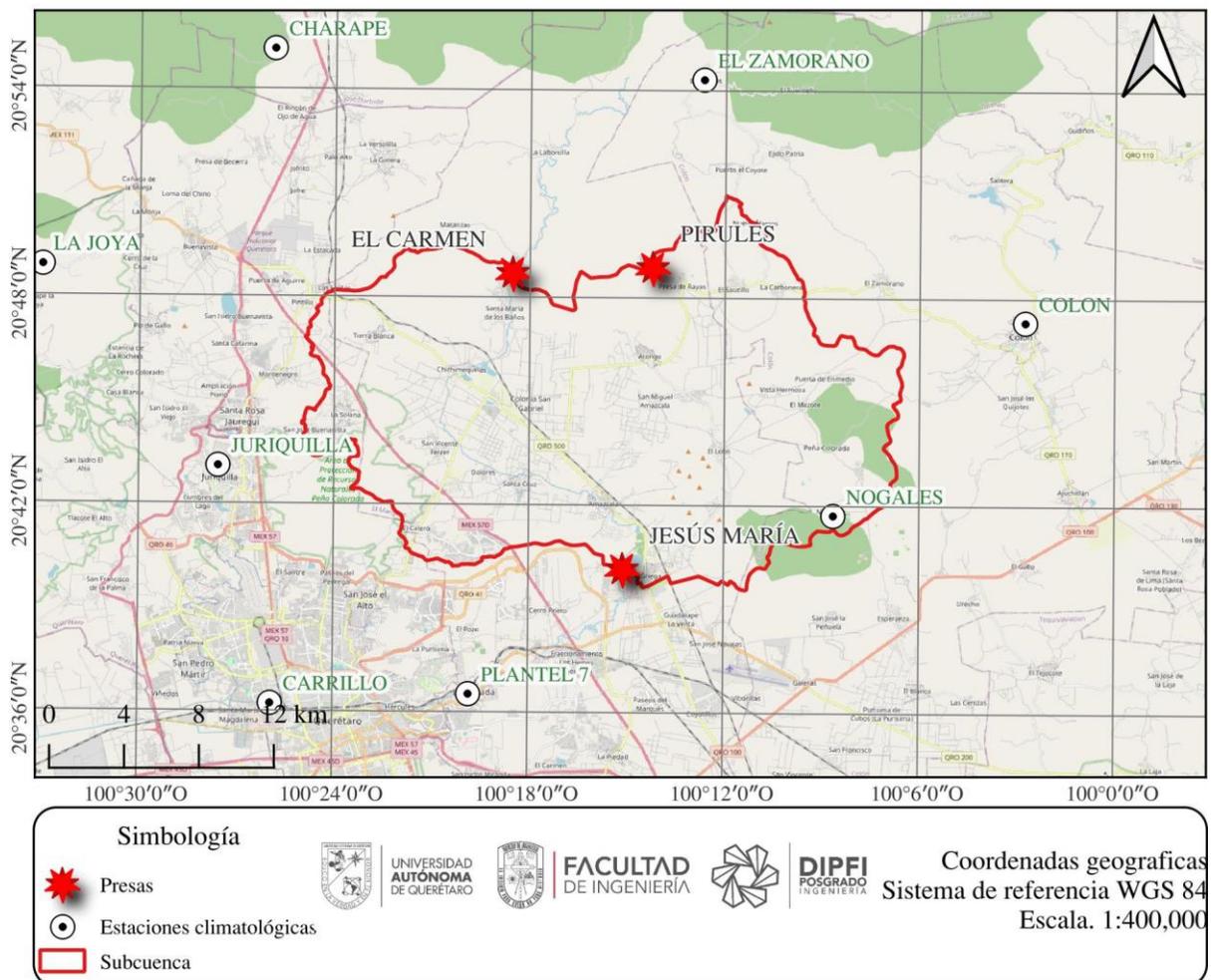


Figura 21. Estaciones meteorológicas más cercanas a la cuenca de estudio. (Elaboración propia en el programa QGIS).

## 6.10. Polígonos de Thiessen.

Para seleccionar las estaciones de influencia sobre la cuenca de estudio, se trabajó con lluvias medias de acuerdo con el método de los polígonos de Thiessen. Se tomaron las coordenadas georreferenciadas de las estaciones más cercanas a la cuenca de estudio como se muestran en la Figura 21, se insertaron en el programa “QGIS 3.28.4” en formato punto, seguido de ello, con la herramienta polígonos de “voronoi” se definieron los polígonos de Thiessen como se muestran en la Figura 22.

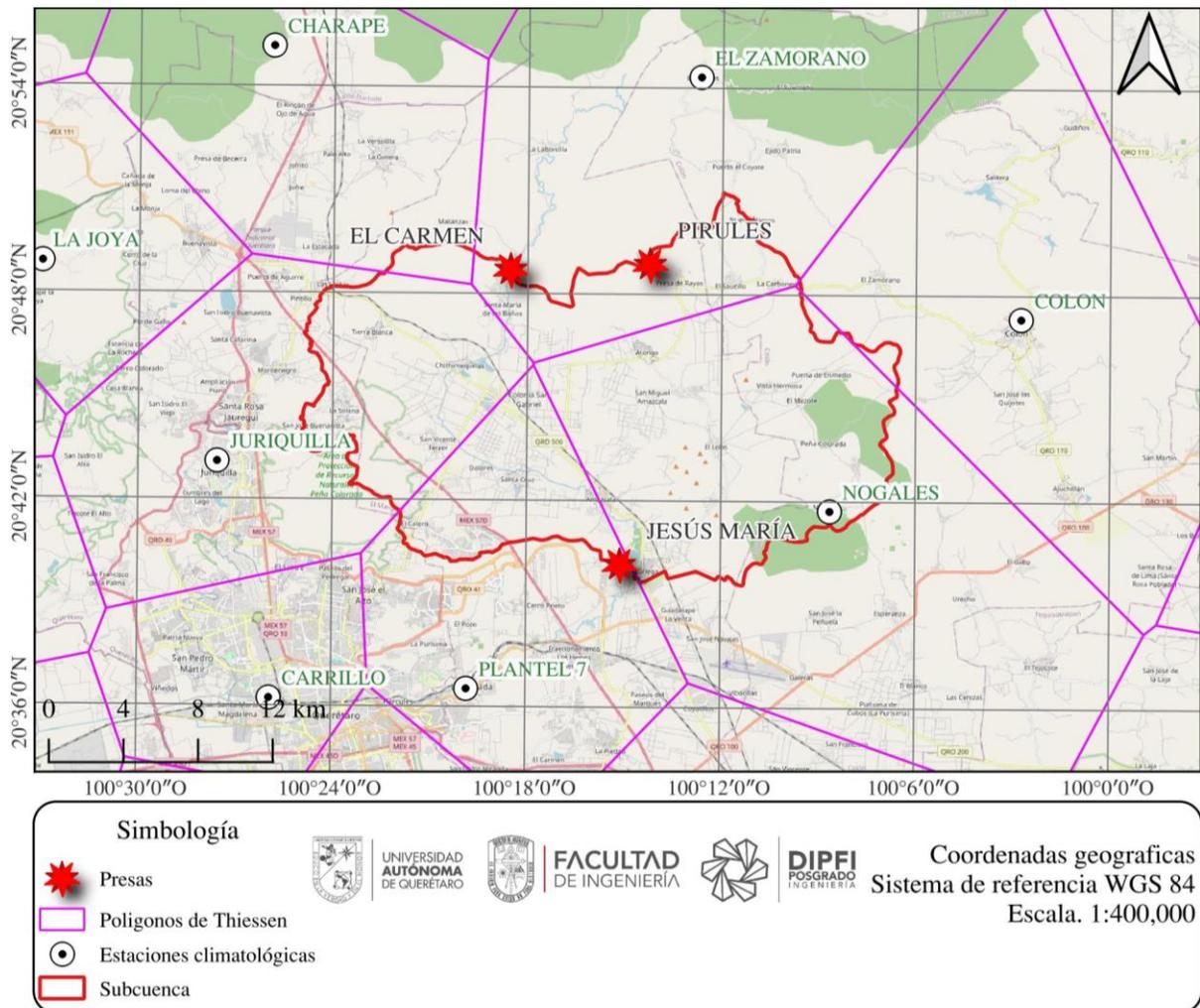


Figura 22. Polígonos de Thiessen de influencia de la subcuenca. (Elaboración propia en el programa QGIS).

De acuerdo con los polígonos de Thiessen, las estaciones de influencia de la cuenca son:

- 22049 (ZAMORANO)
- 22045 (JURIQUILLA)
- 11144 (CHARAPE)
- 22070 (PLANTEL 7)
- 22046 (NOGALES)
- 22026 (COLON)

### 6.11. Análisis de frecuencias.

Una vez obtenidas las estaciones de influencia, se solicitaron las precipitaciones máximas en 24 horas a la dirección local de la CONAGUA cede Querétaro, donde se muestran en las tablas 6 a 11.

Tabla 6. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 22070, PLANTEL 7. (CONAGUA, 2023)

AÑO	PRECIP. (mm)	AÑO	PRECIP. (mm)	AÑO	PRECIP. (mm)
1996	49.5	2005	69.0	2014	60.0
1997	50.0	2006	40.4	2015	80.5
1998	53.0	2007	82.4	2016	52.6
1999	28.0	2008	40.1	2017	32.3
2000	54.0	2009	128.9	2018	22.5
2001	56.5	2010	104.4	2019	23.6
2002	66.9	2011	51.0	2020	21.1
2003	92.0	2012	60.5	2021	64.0
2004	72.4	2013	70.0	2022	48.0

Tabla 7. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 22045, JURQUILLA. (CONAGUA, 2023)

AÑO	PRECIP. (mm)	AÑO	PRECIP. (mm)	AÑO	PRECIP. (mm)
1979	S/D	1994	41.0	2009	44.3
1980	51.5	1995	41.0	2010	118.0
1981	34.2	1996	66.5	2011	52.0
1982	35.0	1997	50.5	2012	90.0
1983	95.2	1998	47.5	2013	50.0
1984	44.2	1999	72.0	2014	56.0
1985	62.8	2000	46.0	2015	50.0
1986	42.0	2001	48.0	2016	67.8
1987	60.0	2002	40.4	2017	66.9
1988	49.1	2003	71.0	2018	75.8
1989	51.5	2004	63.0	2019	41.2
1990	36.0	2005	34.6	2020	71.5
1991	53.0	2006	48.0	2021	56.9
1992	42.0	2007	112.5	2022	48.7
1993	43.5	2008	74.7		

Tabla 8. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 22026, COLON. (CONAGUA, 2023)

AÑO	PRECIP. (mm).	AÑO	PRECIP. (mm)	AÑO	PRECIP. (mm)
1964	70.0	1984	40.0	2004	24.5
1965	43.0	1985	45.0	2005	36.0
1966	56.5	1986	65.0	2006	41.0
1967	67.2	1987	80.0	2007	48.0
1968	62.0	1988	59.0	2008	46.5
1969	38.0	1989	22.5	2009	38.0
1970	43.0	1990	49.0	2010	51.5
1971	59.8	1991	22.0	2011	48.0
1972	66.0	1992	40.0	2012	40.0
1973	41.0	1993	42.0	2013	61.0
1974	56.6	1994	61.0	2014	30.0
1975	42.0	1995	27.0	2015	51.0
1976	47.0	1996	30.0	2016	108
1977	30.4	1997	55.0	2017	36.0
1978	63.0	1998	S/R	2018	42.0
1979	63.2	1999	S/R	2019	48.0
1980	35.3	2000	S/R	2020	38.0
1981	44.0	2001	40.0	2021	45.0
1982	45.0	2002	36.0	2022	23.0
1983	48.5	2003	50.5		

Tabla 9. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 22046, NOGALES. (CONAGUA, 2023)

AÑO	PRECIP. (mm)	AÑO	PRECIP. (mm)	AÑO	PRECIP. (mm)
1980	48.7	1995	52.8	2010	63.3
1981	41.5	1996	58.0	2011	39.5
1982	48.7	1997	S/D	2012	20.5
1983	56.3	1998	25.8	2013	30.0
1984	46.5	1999	48.0	2014	43.7
1985	51.8	2000	40.0	2015	59.0
1986	54.4	2001	49.6	2016	83.0
1987	37.7	2002	40.0	2017	28.2
1988	30.6	2003	S/D	2018	55.4
1989	32.5	2004	45.3	2019	47.3
1990	36.9	2005	42.8	2020	40.9
1991	49.6	2006	30.8	2021	46.5
1992	S/D	2007	45.0	2022	45.4
1993	S/D	2008	30.4		
1994	S/D	2009	S/D		

Tabla 10. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 22049, ZAMORANO. (CONAGUA, 2023)

AÑO	PRECIP. (mm)	AÑO	PRECIP. (mm)	AÑO	PRECIP. (mm)
1980	41.5	1995	20.5	2010	29.0
1981	35.0	1996	45.0	2011	29.5
1982	40.5	1997	40.0	2012	39.9
1983	79.0	1998	92.5	2013	23.7
1984	40.4	1999	48.0	2014	36.7
1985	54.2	2000	44.0	2015	42.0
1986	24.3	2001	38.0	2016	51.2
1987	21.0	2002	61.0	2017	38.3
1988	61.8	2003	42.0	2018	64.7
1989	60.0	2004	39.0	2019	40.0
1990	35.2	2005	47.0	2020	S/R
1991	40.5	2006	62.0	2021	48.0
1992	47.0	2007	30.0	2022	35.0
1993	42.0	2008	28.0		
1994	85.0	2009	44.0		

Tabla 11. Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación hidrometeorológica 11144, CHARAPE. (CONAGUA, 2023)

AÑO	PRECIP. (mm)	AÑO	PRECIP. (mm)	AÑO	PRECIP. (mm)
1980	63.0	1994	35.0	2008	20.6
1981	38.3	1995	21.0	2009	0
1982	31.3	1996	20.2	2010	28.8
1983	28.2	1997	20.9	2011	20.7
1984	40.7	1998	20.0	2012	20.5
1985	28.7	1999	20.6	2013	20.9
1986	20.8	2000	20.0	2014	50.0
1987	20.5	2001	30.7	2015	35.6
1988	20.9	2002	20.7	2016	20.6
1989	200.	2003	22.5	2017	20.9
1990	20.7	2004	30.	2018	20.9
1991	20.9	2005	20.7	2019	20.5
1992	20.3	2006	26.0	2020	20.7
1993	500.	2007	20.5		

Posteriormente se pasaron los datos de precipitaciones a un archivo de texto (bloc de notas) por cada estación, para poder importarlos al programa "Ax". Ya dentro del interfaz del programa se realizaron los ajustes de las funciones, obteniendo los errores estándares como se muestran en las *tablas 12 a 17*.

Tabla 12. Resumen de errores estándares para la estación 22070, PLANTEL 7.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	6.369	-----	6.369	-----
Log-normal	5.643	5.376	4.810	4.722
Gumbel	5.320	-----	4.649	-----
Exponencial	7.404	-----	27.359	-----
Gamma	5.373	5.383	5.370	5.213
Doble Gumbel	6.781			
Mínimo error estándar: 4.649				
Calculado por la función: Gumbel (máx.ver.)				

Tabla 13. Resumen de errores estándares para la estación 22045, JURQUILLA.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	7.555	-----	7.555	-----
Log-normal	4.744	4.245	5.768	5.960
Gumbel	4.567	-----	6.168	-----
Exponencial	3.712	-----	30.868	-----
Gamma	5.539	3.960	6.247	3.310
Doble Gumbel	3.402			
Mínimo error estándar: 3.310				
Calculado por la función: Gamma (máx.ver.)				

Tabla 14. Resumen de errores estándares para la estación 22026, COLON.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	4.529	-----	4.529	-----
Log-normal	4.096	3.989	3.910	3.870
Gumbel	4.040	-----	3.781	-----
Exponencial	5.698	-----	27.421	-----
Gamma	4.019	4.037	4.072	3.998
Doble Gumbel	4.834			
Mínimo error estándar: 3.781				
Calculado por la función: Gumbel (máx.ver.)				

Tabla 15. Resumen de errores estándares para la estación 22046, NOGALES.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	2.996	-----	2.996	-----
Log-normal	2.776	2.720	2.660	2.601
Gumbel	2.848	-----	2.552	-----
Exponencial	4.177	-----	26.451	-----
Gamma	2.732	2.736	2.824	2.727
Doble Gumbel	3.487			
Mínimo error estándar: 2.552				
Calculado por la función: Gumbel (máx.ver.)				

Tabla 16. Resumen de errores estándares para la estación 22049, ZAMORANO.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	5.052	-----	5.052	-----
Log-normal	3.182	3.276	3.309	3.498
Gumbel	3.150	-----	3.612	-----
Exponencial	3.846	-----	22.037	-----
Gamma	3.437	3.172	3.969	2.977
Doble Gumbel	2.991			
Mínimo error estándar: 2.977				
Calculado por la función: Gamma (máx.ver.) 3p.				

Tabla 17. Resumen de errores estándares para la estación 11144, CHARAPE.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	6.053	-----	6.053	-----
Log-normal	4.242	3.681	4.854	4.963
Gumbel	4.290	-----	5.400	-----
Exponencial	2.959	-----	13.917	-----
Gamma	4.794	3.251	5.080	11111.000
Doble Gumbel	2.245			
Mínimo error estándar: 2.245				
Calculado por la función: Doble Gumbel				

Una vez identificados los errores estándares mínimos, se extrapolaron los datos de la función con el menor error, para obtener los periodos de retorno como se muestran en las tablas 18 a 23.

Tabla 18. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (en milímetros) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 22070, PLANTEL 7.

No	Tr	Dato calculado (mm)
1	2	55.3
2	5	78.8
3	10	94.4
4	25	114.1
5	50	128.7
6	100	143.2
7	500	176.7
8	1000	191.1

Tabla 19. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (en milímetros) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 22045, JURQUILLA.

No	Tr	Dato calculado (mm)
1	2	51.6
2	5	71.1
3	10	85.2
4	25	103.1
5	50	116
6	100	127.9
7	500	149.2
8	1000	154.8

Tabla 20. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (en milímetros) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 22026, COLON.

No	Tr	Dato calculado (mm)
1	2	46.5
2	5	63.2
3	10	74.3
4	25	88.2
5	50	98.6
6	100	108.9
7	500	132.6
8	1000	142.9

Tabla 21. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (*en milímetros*) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 22046, NOGALES.

No	Tr	Dato calculado (mm)
1	2	42.1
2	5	54.5
3	10	62.8
4	25	73.3
5	50	81
6	100	88.7
7	500	106.5
8	1000	114.1

Tabla 22. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (en milímetros) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 22049, ZAMORANO.

No	Tr	Dato calculado (mm)
1	2	41.3
2	5	57.8
3	10	68.6
4	25	81.9
5	50	91.5
6	100	100.6
7	500	119.4
8	1000	126

Tabla 23. Datos extrapolados de lluvias máximas en 24 horas (en milímetros) asociadas a distintos periodos de retorno para la estación 11144, CHARAPE.

No	Tr	Dato calculado (mm)
1	2	26.4
2	5	35.6
3	10	46.6
4	25	64.3
5	50	76.4
6	100	87.8
7	500	113.5
8	1000	124.4

Debido a que la cuenca presenta influencia de varias estaciones meteorológicas, se realizó un cálculo ponderado para analizar cuan influye cada estación sobre la totalidad de la cuenca, de acuerdo con la superficie que abarca cada polígono de Thiessen.

Mediante el programa “QGIS 3.28.4” se determinaron las superficie de los polígonos de Thiessen, con lo que se determinaron los porcentajes de influencia como se muestran a continuación:

- Estación 22070 (PLANTEL 7) 15%
- Estación 22045 (JURIQUILLA) 22%
- Estación 22026 (COLON). 1%
- Estación 22046 (NOGALES) 46%
- Estación 22049 (ZAMORANO) 14%
- Estación 11144 (CHARAPE) 2%

En las **tablas 24 a 29** se muestran los porcentajes de influencia que abarca cada estación dentro de la cuenca.

Tabla 24. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 22070, PLANTEL 7.

CUENCA	ESTACIÓN PLANTEL 7	
	ÁREA (km <sup>2</sup> )	66.522
	%	14.98 %
Tr	PRECIP. MAX EN 24 HRS.	
	ESTACIÓN	PONDERADA
2	55.3	8.29
5	78.8	11.81
10	94.4	14.14
25	114.1	17.10
50	128.7	19.28
100	143.2	21.46
500	176.7	26.47
1000	191.1	28.63

Tabla 25. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 22045, JURQUILLA.

CUENCA	ESTACIÓN JURQUILLA	
	ÁREA (km <sup>2</sup> )	99.888
	%	22.50%
Tr	PRECIP. MAX EN 24 HRS.	
	ESTACIÓN	PONDERADA
2	51.6	11.61
5	71.1	16.00
10	85.2	19.17
25	103.1	23.19
50	116.0	26.10
100	127.9	28.77
500	149.2	33.57
1000	154.8	34.83

Tabla 26. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 22026, COLON.

CUENCA	ESTACIÓN COLÓN	
	ÁREA (km <sup>2</sup> )	2.711
	%	0.61%
Tr	PRECIP. MAX EN 24 HRS.	
	ESTACIÓN	PONDERADA
2	46.5	0.28
5	63.2	0.39
10	74.3	0.45
25	88.2	0.54
50	98.6	0.60
100	108.9	0.66
500	132.6	0.81
1000	142.9	0.87

Tabla 27. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 22046, NOGALES.

CUENCA	ESTACIÓN NOGALES	
	ÁREA (km <sup>2</sup> )	203.477
	%	45.83%
Tr	PRECIP. MAX EN 24 HRS.	
	ESTACIÓN	PONDERADA
2	42.1	19.29
5	54.5	24.98
10	62.8	28.78
25	73.3	33.59
50	81.0	37.12
100	88.7	40.65
500	106.5	48.81
1000	114.1	52.29

Tabla 28. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 22049, ZAMORANO.

CUENCA	ESTACIÓN ZAMORANO	
	ÁREA (km <sup>2</sup> )	63.836
	%	14.38%
Tr	PRECIP. MAX EN 24 HRS.	
	ESTACIÓN	PONDERADA
2	41.3	5.94
5	57.8	8.31
10	68.6	9.86
25	81.9	11.78
50	91.5	13.16
100	100.6	14.46
500	119.4	17.17
1000	126.0	18.12

Tabla 29. Influencia de precipitaciones (en milímetros) en la cuenca por parte de la estación 11144, CHARAPE.

CUENCA	ESTACIÓN CHARAPE	
	ÁREA (km <sup>2</sup> )	7.562
	%	1.70%
Tr	PRECIP. MAX EN 24 HRS.	
	ESTACIÓN	PONDERADA
2	26.4	0.45
5	35.6	0.61
10	46.6	0.79
25	64.3	1.10
50	76.4	1.30
100	87.8	1.50
500	113.5	1.93
1000	124.4	2.12

Finalmente se realizó una suma algebraica por cada periodo de retorno. Las precipitaciones ponderadas resultantes que influyen en la cuenca de aportación de la presa Jesús María se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30. Precipitaciones máximas en 24 horas utilizadas para el cálculo de los caudales.

Tr	Pmáx (mm)
2	45.86
5	62.08
10	73.20
25	87.29
50	97.56
100	107.50
500	128.76
1000	136.86

## 6.12. Lluvias de diseño.

Primeramente, se calcularon las precipitaciones medias de diseño ( $H_D$ ), de acuerdo con la fórmula de Emil Kuishiling y C. E. y la Tabla 1, se emplea un factor ( $e$ ) de 0.6276, que corresponde a un tiempo de concentración de 4.62 horas, en la Tabla 31 se muestran los valores de las precipitaciones medias de diseño de acuerdo con los periodos de retorno.

Tabla 31. Valores de las precipitaciones medias de diseño (en milímetros)

Periodo de retorno (años)	K	Precipitación media (mm)
2	5.23	24.83
5	7.08	33.61
10	8.35	39.63
20	9.95	47.26
50	11.12	52.82
100	12.26	58.20
500	14.68	69.71
1,000	15.61	74.09

Una vez obtenidas las precipitaciones medias de diseño, se calcularon las precipitaciones en exceso, empleando la fórmula del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, obteniendo los valores mostrados en la Tabla 32.

Tabla 32. Valores de precipitación en exceso ( $H_e$ ).

Periodo de retorno (años)	$H_e$ (mm)
2	0.40
5	2.12
10	3.92
20	6.81
50	9.28
100	11.91
500	18.23
1,000	20.85

### 6.13. Obtención de los caudales mediante el método del Hidrograma Unitario Triangular.

Los cálculos de los gastos se llevaron a cabo utilizando los datos de las precipitaciones en exceso mostrados en la Tabla 32, mientras que los datos constantes son: el área de la cuenca con un valor de 443.996 km<sup>2</sup>, tiempo pico de 5.08 horas y un factor n de 2.123. Como parte de los objetivos específicos de este trabajo, los resultados obtenidos se muestran en el capítulo 7.

### 6.14. Modelo hidrológico de vaso para la Presa Jesús María.

El modelo del funcionamiento de vaso en el programa "HEC-HMS consta de cinco pasos fundamentales:

#### Modelo de cuenca.

Se basa tres componentes principales: una fuente de entrada, un reservorio y un sumidero de descarga, los cuales son conectados de aguas arriba hacia aguas abajo, como se muestra en la Figura 23.

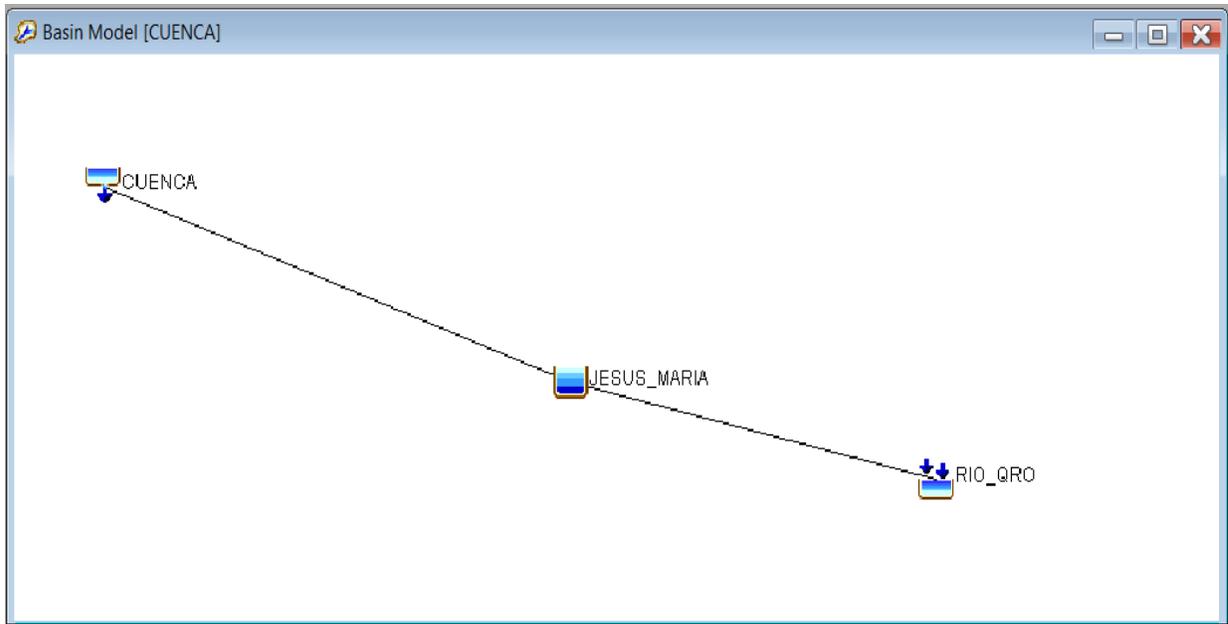


Figura 23. Modelo de cuenca en el programa “HEC-HMS”

El componente de fuente de entrada (CUENCA) estará alimentado por el hidrograma de entrada definido en el apartado 13 de este capítulo.

El componente de reservorio (JESÚS MARÍA) utiliza el método de cálculo de flujo de salida por estructuras, el método de almacenamiento esta alimentado por la función elevaciones – almacenamiento definidos más adelante.

La condición inicial del vaso se consideró variable que va desde que la presa está vacía (elevación 1895.5 m.s.n.m), incrementando 0.10 metros hasta llegar a nivel del vertedor (elevación 1998.65 m.s.n.m)

Se consideraron para este modelo tres vertedores:

- Vertedor 1:
  - Elevación de la cresta 1898.65 m.s.n.m.
  - Longitud de 60 metros.
  - Coeficiente de descarga de 2 (vertedor tipo cimacio).

- Vertedor 2:
  - Físicamente existe un segundo vertedor, pero de acuerdo con el levantamiento topográfico este segundo vertedor no se consideró en el modelo ya que está ubicado en una elevación por arriba de la corona del primer vertedor, por lo que antes de entrar en operación se presentarían desbordes sobre la cortina.
- Vertedor 3:
  - Elevación de la cresta 1900.05 m.s.n.m.
  - Longitud de 1300 metros.
  - Coeficiente de descarga de 2 (vertedor tipo cimacio).

Se agregó el vertedor 3 considerando la corona de la cortina para evitar que el modelo se trunque por las excedencias. Señalando que solo los vertedores 1 y 2 existen en el sitio.

Cabe mencionar que no se consideró obra de toma para este modelo.

### **Modelo meteorológico.**

Se determinó que el modelo trabajará con entradas producto de las precipitaciones.

### **Especificaciones de control.**

El modelo se ajustó para operar en un lapso de 48 horas, con intervalos de tiempo a cada 30 minutos.

### **Datos de series de tiempo.**

El modelo se ajustó para operar con descargas de gastos en unidades de metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ), con intervalos también a cada 30 minutos.

Se ingresaron los datos de manera manual, repitiendo el proceso ocho veces, uno para cada periodo de retorno.

### **Pares de datos**

En este apartado fue donde se definió la función de elevaciones almacenamiento, que fue elaborada con base en las curvas elevaciones-áreas-capacidades, obtenidas de

las curvas de nivel definidas mediante un levantamiento topográfico realizado sobre el embalse de la presa Jesús María.

El levantamiento topográfico fue realizado mediante una aeronave no tripulada (drone), posteriormente se realizó el postproceso de las imágenes para unir las y obtener la topografía del embalse, como se muestra en la figura 24.

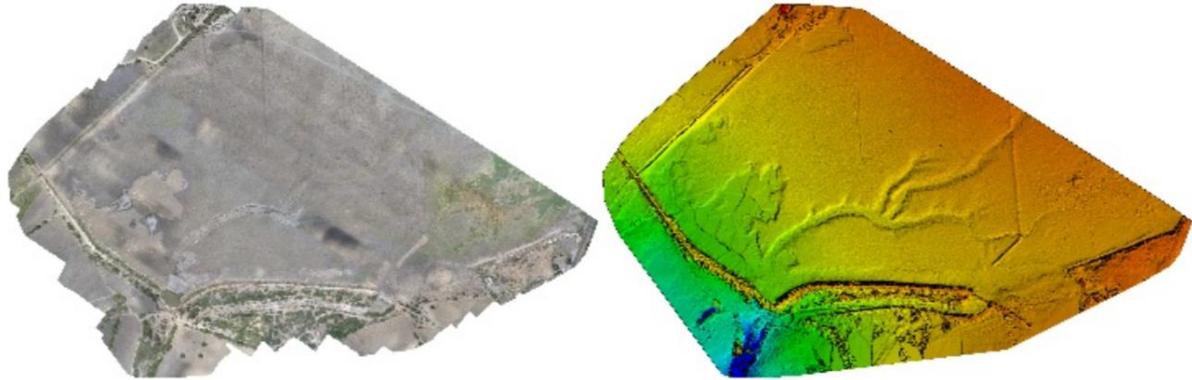


Figura 24. Postproceso de la información obtenida en el vuelo mediante aeronave no tripulada.

Una vez obtenidas las curvas de nivel del embalse de la presa, se construyeron las curvas elevaciones-áreas-capacidades, como se muestra en la Figura 255. Los datos de almacenamiento de la presa Jesús María se muestran en la Tabla 33.

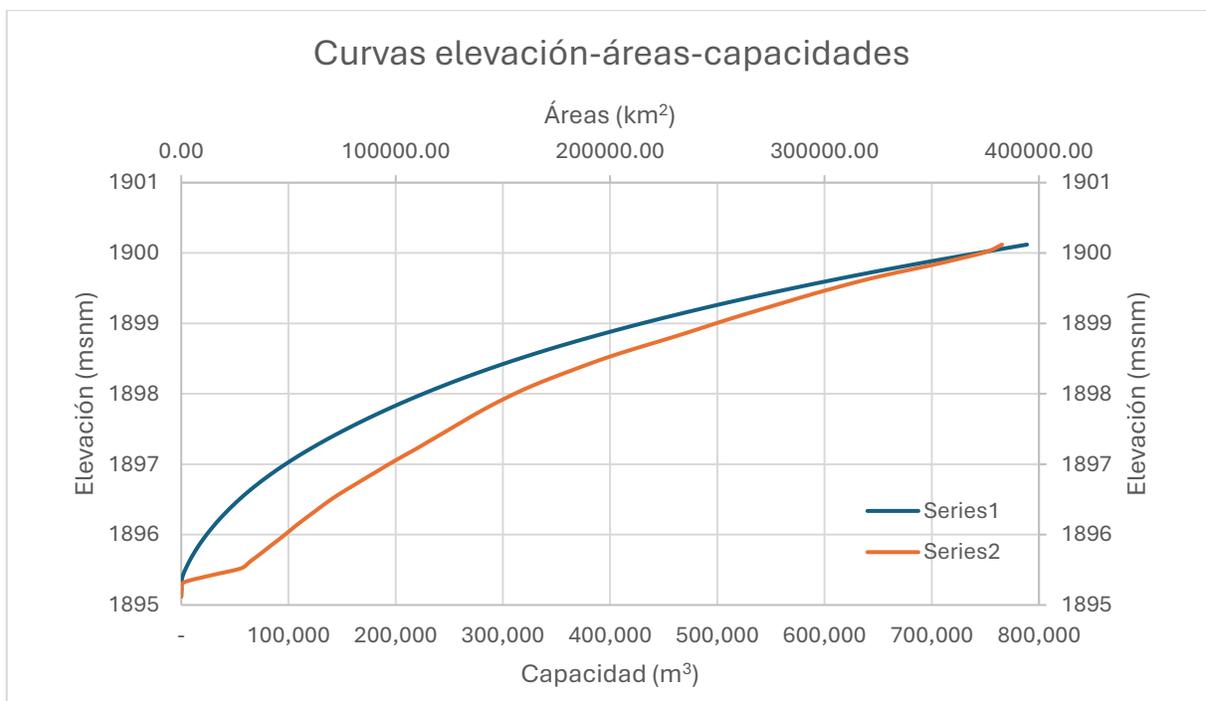


Figura 25. Curvas elevaciones – áreas – capacidades del vaso de la presa Jesús María. (Elaboración propia en el programa “Microsoft Excel”)

Tabla 33. Elevaciones – áreas – capacidades del vaso de la presa Jesús María. (Elaboración propia en el programa “Microsoft Excel”)

ELEVACION (msnm)	AREA (m <sup>2</sup> )	AREA PROMEDIO (m <sup>2</sup> )	ESPESOR (m)	VOLUMEN PARCIAL (m <sup>3</sup> )	CAPACIDAD (m <sup>3</sup> )
1895.12	89.92	0.00	0.00	0.00	0.00
1895.52	29932.26	27749.15	0.10	2774.92	4,289.21
1896.02	51161.23	49235.87	0.10	4923.59	24,678.20
1896.52	73324.13	70885.07	0.10	7088.51	55,649.60
1897.02	100659.19	97939.27	0.10	9793.93	99,140.20
1897.52	129226.29	126448.00	0.10	12644.80	156,732.55
1898.02	160241.84	156770.54	0.10	15677.05	228,743.63
1898.52	203839.46	199014.12	0.10	19901.41	319,360.58
1899.02	256365.35	251238.59	0.10	25123.86	434,606.40
1899.52	312832.74	306614.39	0.10	30661.44	576,561.23
1900.02	382111.76	375800.78	0.10	37580.08	750,534.43
1900.12	383411.76	382761.76	0.10	38276.18	788,810.61

### **6.15. Modelado**

Para realizar la simulación con el modelo “HEC – HMS” se seleccionaron los cinco componentes descritos antes, para posteriormente correr el modelo y obtener los resultados.

El proceso fue iterativo, realizando un total de 185 modelaciones, correspondiente a 37 distintos niveles iniciales del vaso, con una combinación de 5 periodos de retorno.

Solo se realizaron modelaciones para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años, ya no se continuaron para los periodos de 100, 500 y 1000 años debido a que, para el periodo de retorno de 50 años, el embalse ya no presenta regulación.

Como objetivo específico logrado, los resultados son mostrados en el capítulo 7.

### **6.16. Elaboración de graficas de comportamiento de los desbordes de la presa Jesús María.**

Se capturaron los gastos picos desfogados por cada una de las 185 modelaciones correspondientes con su periodo de retorno, graficando en el eje de las abscisas las elevaciones y en las ordenadas los gastos desfogados.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. Mapa hidrológico base.

De acuerdo con la metodología antes mencionada se determinó que la extensión territorial que cubre la cuenca de influencia de la presa Jesús María es de cuatrocientos cuarenta y cuatro punto novecientos noventa y seis metros cuadrados (443.996 km<sup>2</sup>), cuenta con un cauce principal de longitud de treinta y tres punto nueve kilómetros (33.9 km) y de acuerdo con las curva de nivel de los datos espaciales del INEGI en escala 1:50,000, se presenta un desnivel de seiscientos metros (600 m).

De acuerdo con el método de Taylor-Schwarz, se determinó que la pendiente del cauce principal es de 0.0042 metros sobre metro, y presenta un tiempo de concentración de cuatro punto sesenta y dos horas (4.62 h).

La edafología que se presenta en la cuenca corresponde a:

- Feozem Haplico
- Feozem Luvico
- Litosol
- Vertisol Pelico
- Yermosol Haplico.

En cuanto al uso de suelo se presenta del área total de cuenca:

- 2.14% (9.51 km<sup>2</sup>) de caminos de terracería
- 0.58% (2.29 km<sup>2</sup>) de caminos de pavimentos
- 4.69% (20.811 km<sup>2</sup>) de zonas urbanas
- 48.74% (216.403 km<sup>2</sup>) de suelo agrícola cultivado
- 0.02% (0.072 km<sup>2</sup>) de bosques de encino
- 36.71% (163.012 km<sup>2</sup>) de matorrales
- 7.12% (31.598 km<sup>2</sup>) de pastizales.

Los datos mostrados anteriormente son resultado del procesamiento de datos espaciales del INEGI en escala 1:50,000 y la vectorización de fotografías satelitales en formato shapefile.

Con lo cual se tiene un número de curva ponderados de 73.29.

La cuenca de influencia de la presa Jesús María de acuerdo con los polígonos de Thiessen, está dentro de la influencia de seis estaciones:

- Estación 22070 (PLANTEL 7) 15%
- Estación 22045 (JURIQUILLA) 22%
- Estación 22026 (COLON). 1%
- Estación 22046 (NOGALES) 46%
- Estación 22049 (ZAMORANO) 14%
- Estación 11144 (CHARAPE) 2%

La información antes mencionada es representada en un mapa hidrológico base mostrado en la figura 26.

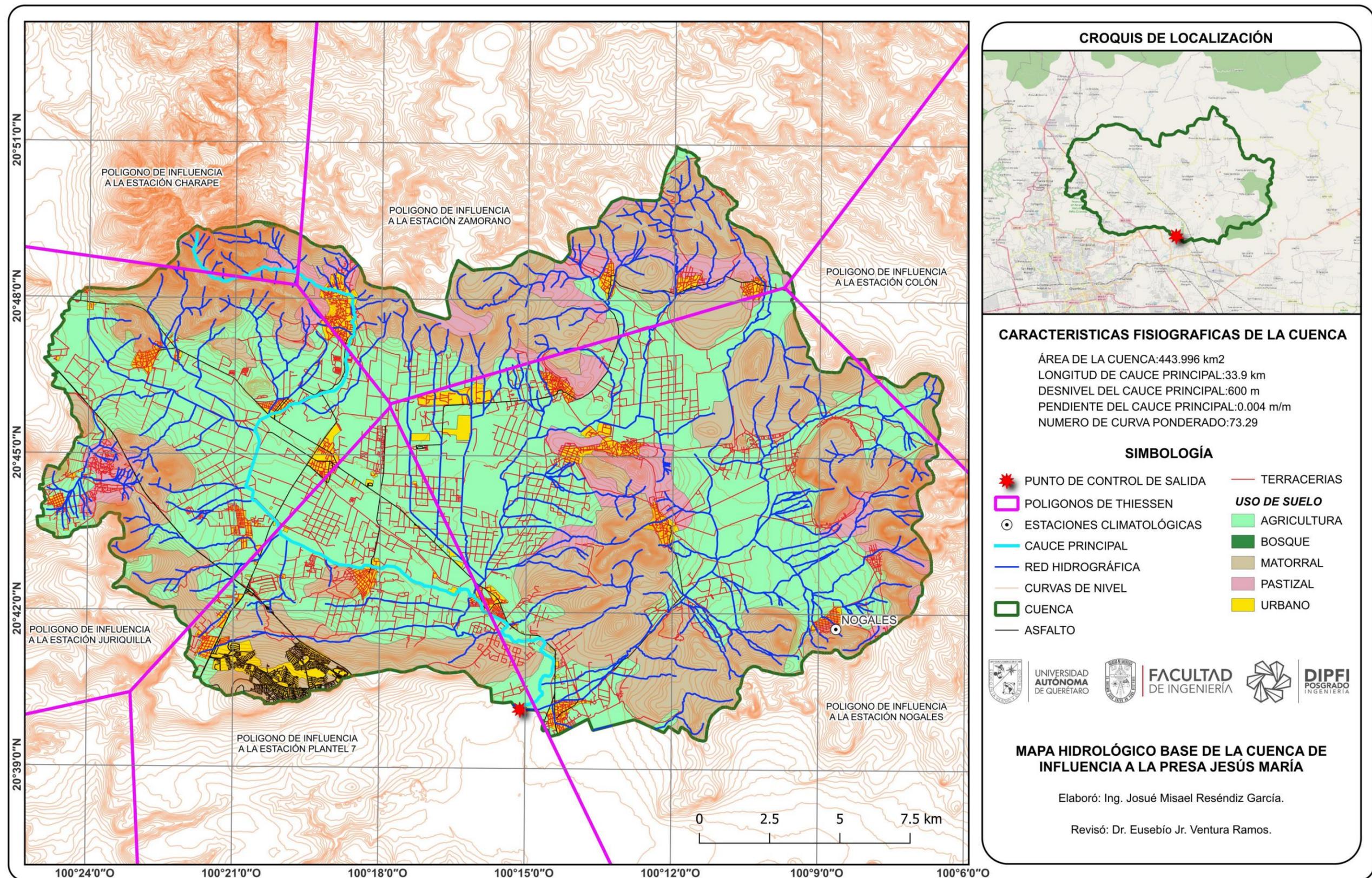


Figura 26. Mapa hidrológico base de la cuenca de influencia de la presa Jesús María.

Como se puede observar en la Figura 266 el mapa corresponde a las condiciones actuales de la cuenca, como ya se mencionó, el municipio de el Marqués se está desarrollando a pasos muy acelerados, por lo que la mancha urbana ira también en aumento y por añadidura también el número de curva, con lo que el suelo ira perdiendo capacidad de filtración y se favorecerá el escurrimiento.

## 7.2. Gastos generados por las condiciones actuales de la cuenca

En la Tabla 34 se muestran los gastos picos obtenidos mediante el método del hidrograma unitario triangular (HUT). Los cuales son para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 años en condiciones actuales de la cuenca, en unidades de metros cúbicos por segundo, mientras que en la Figura 27 se muestran los hidrogramas generados a partir de la Tabla 34, graficando en el eje de las abscisas el tiempo en horas y en el eje de las ordenadas el gasto en unidades de metros cúbicos por segundo.

Tabla 34. Gastos obtenidos mediante el método HUT para la cuenca de influencia de la presa Jesús María.

Periodo de retorno (años)	Q máximo (m <sup>3</sup> /s)
2	9.233
5	48.458
10	89.791
25	155.906
50	212.306
100	272.601
500	417.273
1,000	477.244

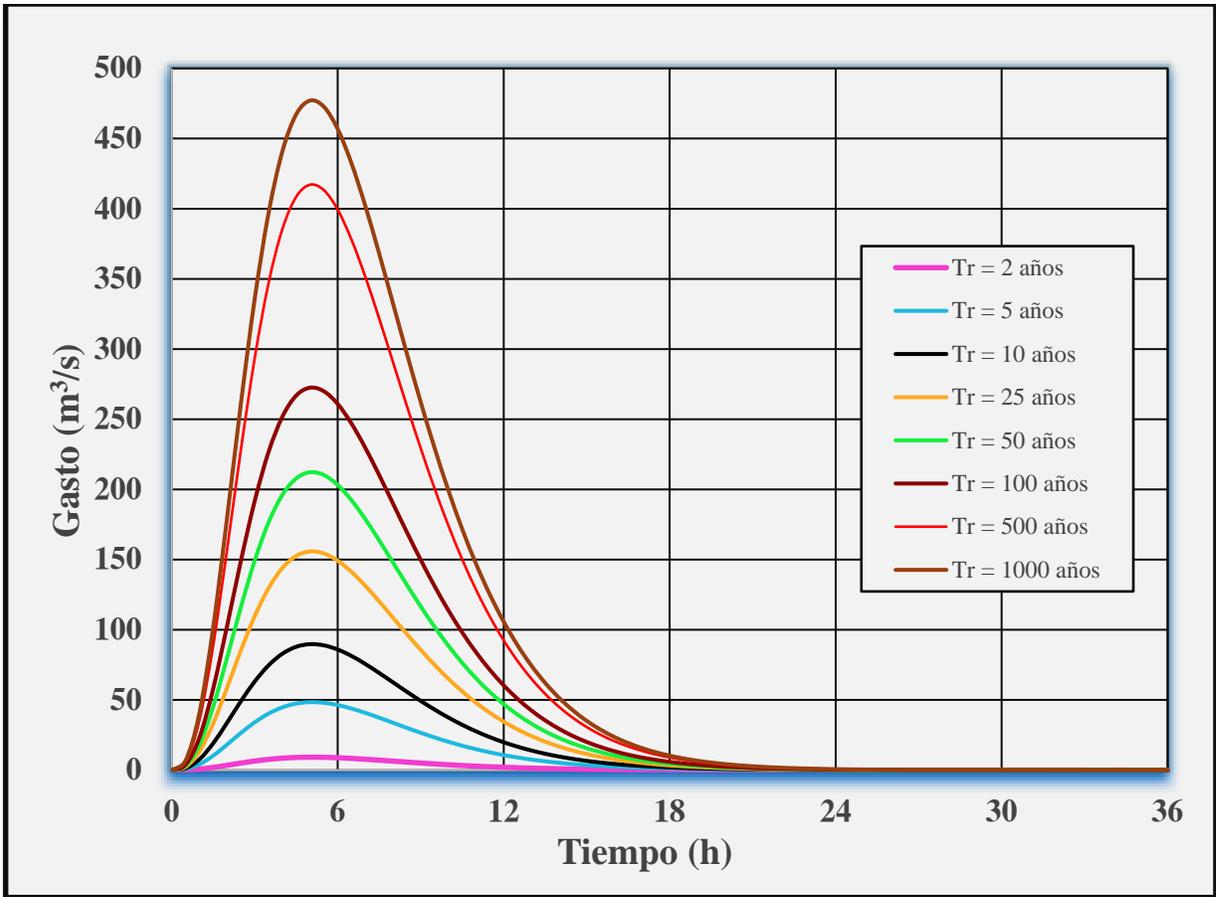


Figura 27. Hidrogramas obtenidos mediante el método HUT para la cuenca de influencia de la presa Jesús María.

Tabla 35. Tabla para generar los hidrogramas mediante el método HUT para la cuenca de influencia de la presa Jesús María (m<sup>3</sup>/s).

T i e m p o (h)	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años	500 años	1000 años
<b>0.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.50</b>	0.13	0.69	1.28	2.22	3.02	3.88	5.94	6.80
<b>1.00</b>	0.78	4.11	7.61	13.22	18.00	23.12	35.39	40.47
<b>1.50</b>	1.97	10.32	19.13	33.22	45.23	58.08	88.90	101.68
<b>2.00</b>	3.47	18.22	33.76	58.61	79.82	102.48	156.87	179.42
<b>2.50</b>	5.05	26.49	49.08	85.22	116.05	149.00	228.08	260.86
<b>3.00</b>	6.49	34.07	63.13	109.62	149.28	191.67	293.39	335.56
<b>3.50</b>	7.67	40.28	74.63	129.58	176.46	226.57	346.82	396.66
<b>4.00</b>	8.53	44.75	82.93	143.99	196.08	251.77	385.38	440.77
<b>4.50</b>	9.04	47.44	87.90	152.62	207.83	266.85	408.47	467.18
<b>5.00</b>	9.23	48.44	89.76	155.84	212.22	272.49	417.11	477.06
<b>5.50</b>	9.14	47.99	88.93	154.41	210.27	269.99	413.28	472.67
<b>6.00</b>	8.84	46.38	85.95	149.23	203.22	260.93	399.41	456.82
<b>6.50</b>	8.36	43.90	81.35	141.24	192.34	246.96	378.03	432.36
<b>7.00</b>	7.78	40.82	75.63	131.32	178.83	229.61	351.47	401.98
<b>7.50</b>	7.12	37.37	69.25	120.24	163.73	210.23	321.80	368.05
<b>8.00</b>	6.43	33.76	62.56	108.63	147.92	189.93	290.73	332.52
<b>8.50</b>	5.74	30.15	55.86	96.99	132.08	169.59	259.59	296.90
<b>9.00</b>	5.08	26.64	49.36	85.71	116.71	149.86	229.39	262.36
<b>9.50</b>	4.44	23.32	43.22	75.04	102.18	131.20	200.83	229.70
<b>10.00</b>	3.86	20.25	37.52	65.15	88.72	113.92	174.37	199.43
<b>10.50</b>	3.32	17.45	32.34	56.14	76.45	98.17	150.27	171.86
<b>11.00</b>	2.85	14.94	27.68	48.05	65.44	84.02	128.61	147.10
<b>11.50</b>	2.42	12.70	23.54	40.87	55.66	71.47	109.40	125.12
<b>12.00</b>	2.05	10.75	19.91	34.57	47.08	60.45	92.53	105.83
<b>12.50</b>	1.72	9.04	16.75	29.09	39.61	50.86	77.85	89.04
<b>13.00</b>	1.44	7.57	14.03	24.36	33.17	42.59	65.19	74.56
<b>13.50</b>	1.20	6.31	11.69	20.31	27.65	35.50	54.35	62.16
<b>14.00</b>	1.00	5.24	9.71	16.86	22.96	29.48	45.12	51.61
<b>14.50</b>	0.83	4.33	8.03	13.94	18.99	24.38	37.32	42.68
<b>15.00</b>	0.68	3.57	6.62	11.49	15.65	20.09	30.75	35.17
<b>15.50</b>	0.56	2.93	5.44	9.44	12.85	16.50	25.26	28.89

<b>16.00</b>	0.46	2.40	4.45	7.73	10.52	13.51	20.68	23.66
<b>16.50</b>	0.37	1.96	3.63	6.31	8.59	11.03	16.89	19.31
<b>17.00</b>	0.30	1.60	2.96	5.14	6.99	8.98	13.75	15.72
<b>17.50</b>	0.25	1.30	2.40	4.17	5.68	7.29	11.16	12.77
<b>18.00</b>	0.20	1.05	1.95	3.38	4.60	5.91	9.04	10.34
<b>18.50</b>	0.16	0.85	1.57	2.73	3.72	4.77	7.31	8.36
<b>19.00</b>	0.13	0.68	1.27	2.20	3.00	3.85	5.89	6.74
<b>19.50</b>	0.10	0.55	1.02	1.77	2.41	3.10	4.74	5.42
<b>20.00</b>	0.08	0.44	0.82	1.42	1.94	2.49	3.81	4.36
<b>20.50</b>	0.07	0.35	0.66	1.14	1.55	1.99	3.05	3.49
<b>21.00</b>	0.05	0.28	0.53	0.91	1.24	1.60	2.44	2.79
<b>21.50</b>	0.04	0.23	0.42	0.73	0.99	1.28	1.95	2.23
<b>22.00</b>	0.03	0.18	0.34	0.58	0.79	1.02	1.56	1.78
<b>22.50</b>	0.03	0.14	0.27	0.46	0.63	0.81	1.24	1.42
<b>23.00</b>	0.02	0.11	0.21	0.37	0.50	0.64	0.99	1.13
<b>23.50</b>	0.02	0.09	0.17	0.29	0.40	0.51	0.78	0.90
<b>24.00</b>	0.01	0.07	0.13	0.23	0.32	0.41	0.62	0.71
<b>24.50</b>	0.01	0.06	0.11	0.18	0.25	0.32	0.49	0.56
<b>25.00</b>	0.01	0.05	0.08	0.15	0.20	0.25	0.39	0.44
<b>25.50</b>	0.01	0.04	0.07	0.11	0.16	0.20	0.31	0.35
<b>26.00</b>	0.01	0.03	0.05	0.09	0.12	0.16	0.24	0.28
<b>26.50</b>	0.00	0.02	0.04	0.07	0.10	0.12	0.19	0.22
<b>27.00</b>	0.00	0.02	0.03	0.06	0.08	0.10	0.15	0.17
<b>27.50</b>	0.00	0.01	0.03	0.04	0.06	0.08	0.12	0.14
<b>28.00</b>	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.09	0.11
<b>28.50</b>	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08
<b>29.00</b>	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07
<b>29.50</b>	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
<b>30.00</b>	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04
<b>30.50</b>	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03
<b>31.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
<b>31.50</b>	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
<b>32.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
<b>32.50</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
<b>33.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
<b>33.50</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01

<b>34.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
<b>34.50</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>35.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>35.50</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>36.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Gasto máximo</b>	9.23	48.44	89.76	155.84	212.22	272.49	417.11	477.06

### 7.3. Tránsitos de avenidas.

Como se había mencionado en la metodología se ajustó el modelo hidrológico de la presa Jesús María en el programa HEC-HMS, donde todos los parámetros se consideraron constantes excepto dos: el nivel de agua en el vaso y los datos de hidrogramas de escurrimientos para los distintos periodos de retorno.

En la Tabla 36 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 36. Desbordes presentados en la presa Jesús María para los distintos niveles de agua y periodos de retorno.

DESFOGUES DEL VASO (m <sup>3</sup> /s)					
NIVEL DEL VASO	PERIODOS DE RETORNO				
	2	5	10	25	50
1895.12	0.000	44.224	87.059	152.618	212.824
1895.20	0.000	44.224	87.059	152.618	212.823
1895.30	0.000	44.226	87.059	152.618	212.823
1895.40	0.000	44.247	87.065	152.621	212.821
1895.50	0.000	44.294	87.076	152.628	212.815
1895.60	0.000	44.349	87.090	152.637	212.808
1895.70	0.000	44.441	87.106	152.647	212.801
1895.80	0.000	44.478	87.123	152.658	212.792
1895.90	0.000	44.548	87.148	152.669	212.783
1896.00	0.000	44.617	87.167	152.687	212.773
1896.10	0.000	44.693	87.187	152.700	212.762

1896.20	0.000	44.773	87.207	152.713	212.751
1896.30	0.000	44.898	87.229	152.727	212.740
1896.40	0.000	44.973	87.251	152.741	212.726
1896.50	0.000	45.047	87.273	152.756	212.713
1896.60	0.000	45.120	87.296	152.784	212.699
1896.70	0.000	45.310	87.318	152.804	212.685
1896.80	0.000	45.489	87.341	152.804	212.679
1896.90	0.000	45.651	87.364	152.820	212.668
1897.00	0.035	45.828	87.387	152.972	212.657
1897.10	0.443	45.985	87.410	152.987	212.646
1897.20	0.944	46.134	87.431	153.002	212.635
1897.30	1.504	46.272	87.490	153.017	212.623
1897.40	2.096	46.402	87.649	153.031	212.612
1897.50	2.694	46.566	87.699	153.045	212.601
1897.60	3.332	46.681	87.731	153.066	212.590
1897.70	3.965	46.765	87.772	153.079	212.580
1897.80	4.603	46.845	87.811	153.090	212.570
1897.90	5.243	46.915	87.853	153.103	212.560
1898.00	5.878	46.975	87.885	153.114	212.552
1898.10	6.496	47.026	87.914	153.124	212.544
1898.20	7.078	47.073	87.938	153.132	212.534
1898.30	7.597	47.123	87.958	153.140	212.527
1898.40	8.042	47.151	87.983	153.147	212.521
1898.50	8.434	47.170	87.997	153.153	212.516
1898.60	8.640	47.184	88.007	153.157	212.512
1898.65	8.717	47.194	88.011	153.159	212.511

La Tabla 36 es producto de 185 distintas modelaciones, donde se muestran a manera de resumen los gastos picos de los hidrogramas de salida de los modelos por cada periodo de retorno y nivel de agua en la presa.

Como se puede observar en la Tabla 36, para el periodo de retorno de dos años, no se presentan desbordes a menos de que el vaso se encontrará por arriba de la elevación 1897 m.s.n.m, con un gasto pico de 0.035 m<sup>3</sup>/s. Para el resto de los periodos de retorno o probabilidad de ocurrencia se puede observar que si se presentaran

desborden incluso estando vacía la presa, en la Tabla 37 se muestra un resumen con los resultados críticos de los tránsitos de avenidas.

Tabla 37. Resumen de desbordes presentados en la presa Jesús María.

Periodo de retorno (años)	Gasto máximo de desborde (m <sup>3</sup> /s)	Gasto mínimo de desborde (m <sup>3</sup> /s)	Diferencia (m <sup>3</sup> /s)
2	8.717	0.035	8.682
5	47.194	44.224	2.970
10	88.011	87.152	0.952
25	153.159	152.618	0.541
50	212.824	212.511	0.313

Cabe mencionar que conforme aumenta el periodo de retorno o baja la probabilidad de ocurrencia, se va reduciendo la diferencia entre el gasto pico de desborde, es decir, se va reduciendo la diferencia entre el gasto máximo desborde y el gasto mínimo desborde.

Como se puede observar en las tablas 36 y 37, solo se muestran datos para periodos de retorno de 2 a 50 años, si bien se calcularon gastos para periodos de retorno de hasta 1000 años como se muestran en la tabla 34, para estos tres últimos periodos de retorno (100, 500 y 1000) no se modelaron los funcionamientos de vaso, debido a que a partir del periodo de retorno de 50 años la presa Jesús María ya no presenta regulación de las avenidas, desfogando un gasto pico similar al gasto de entrada.

Con base en lo anterior, no tiene ningún sentido continuar modelando debido a que la presa ya no tiene capacidad para periodos de retorno superiores.

#### 7.4. Graficas de comportamiento de los desbordes de la presa Jesús María.

Tomando como referencia la Tabla 37 se graficaron en el eje de las abscisas las elevaciones en metros sobre el nivel del mar y en el eje de las ordenadas los desbordes en metros cúbicos por segundo. En donde el resultado final son las figuras 28 a 34, donde la probabilidad de ocurrencia es el valor inverso del periodo de retorno.

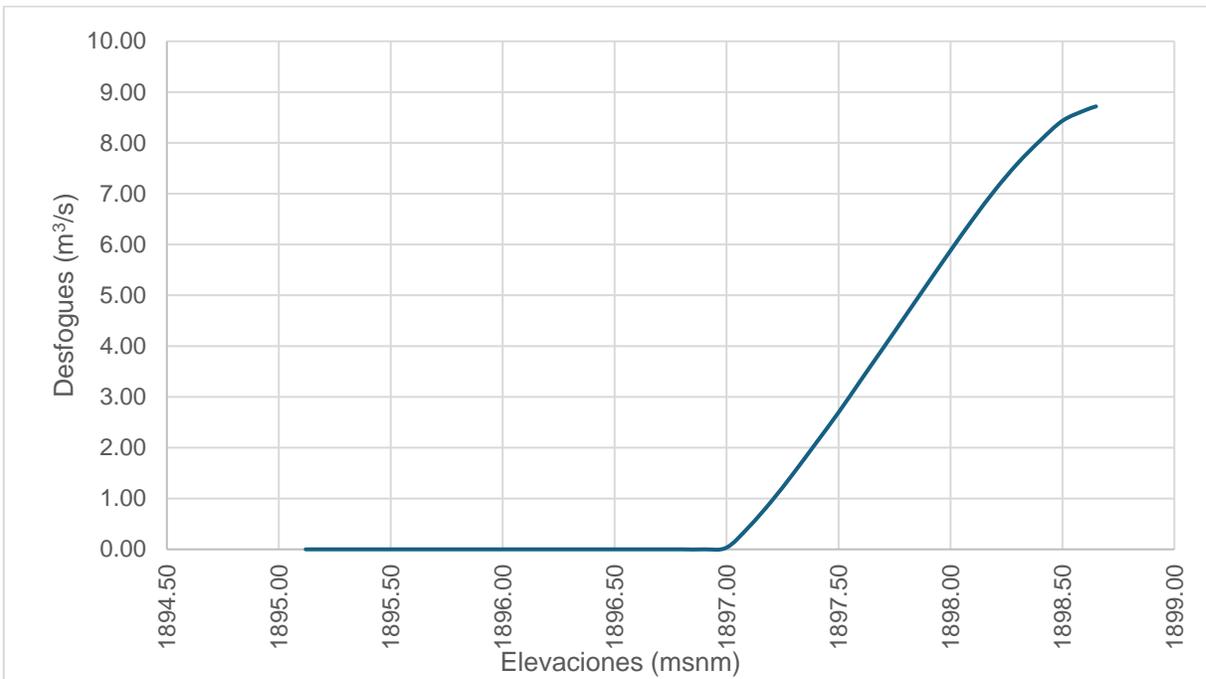


Figura 28. Grafica de comportamiento de desbordes para la presa Jesús María ante la ocurrencia de una lluvia de 2 años.

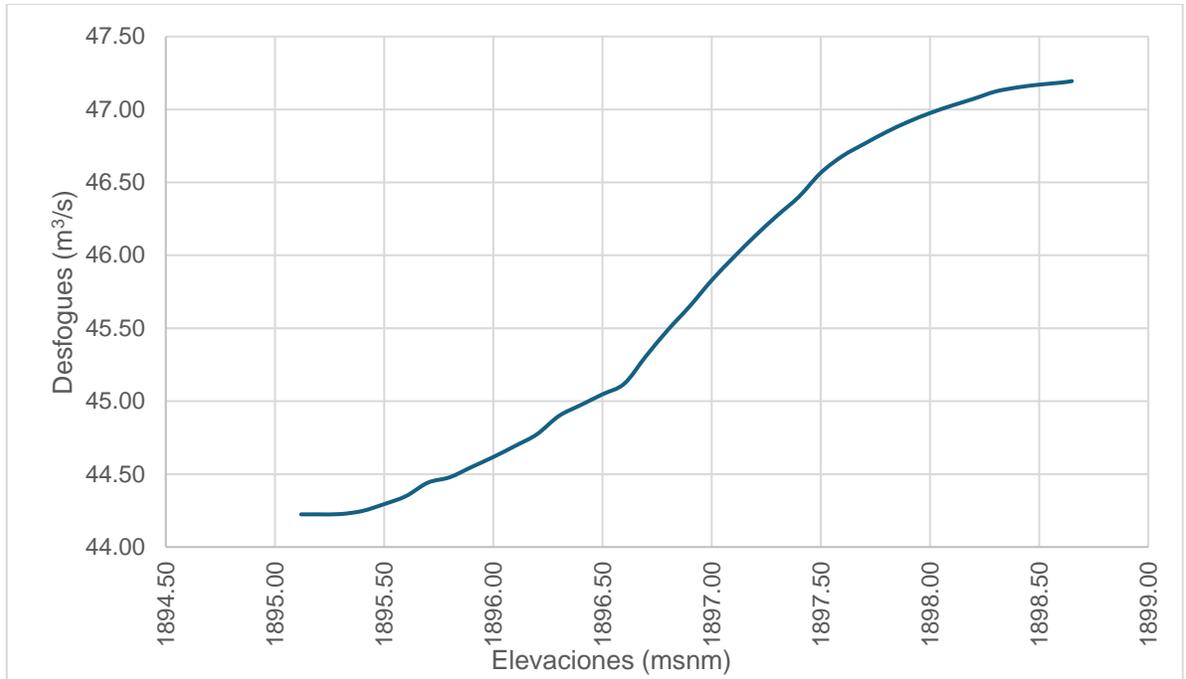


Figura 29. Grafica de comportamiento de desbordes para la presa Jesús María ante la ocurrencia de una lluvia de 5 años.

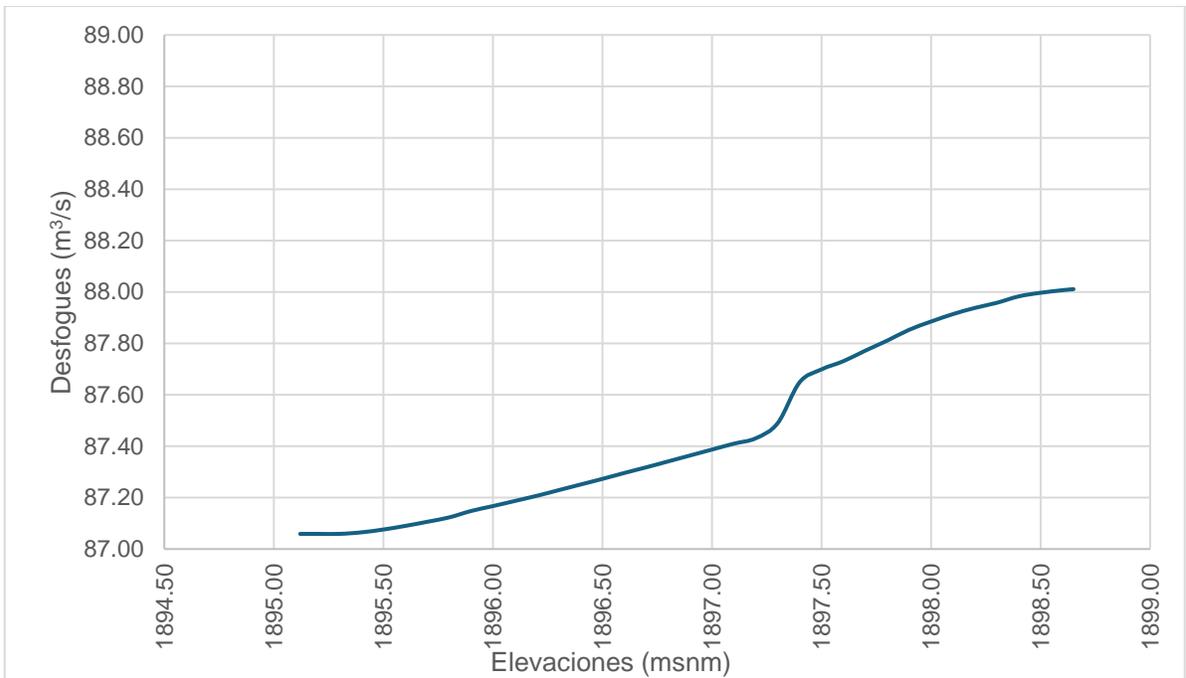


Figura 30. Grafica de comportamiento de desbordes para la presa Jesús María ante la ocurrencia de una lluvia de 10 años.

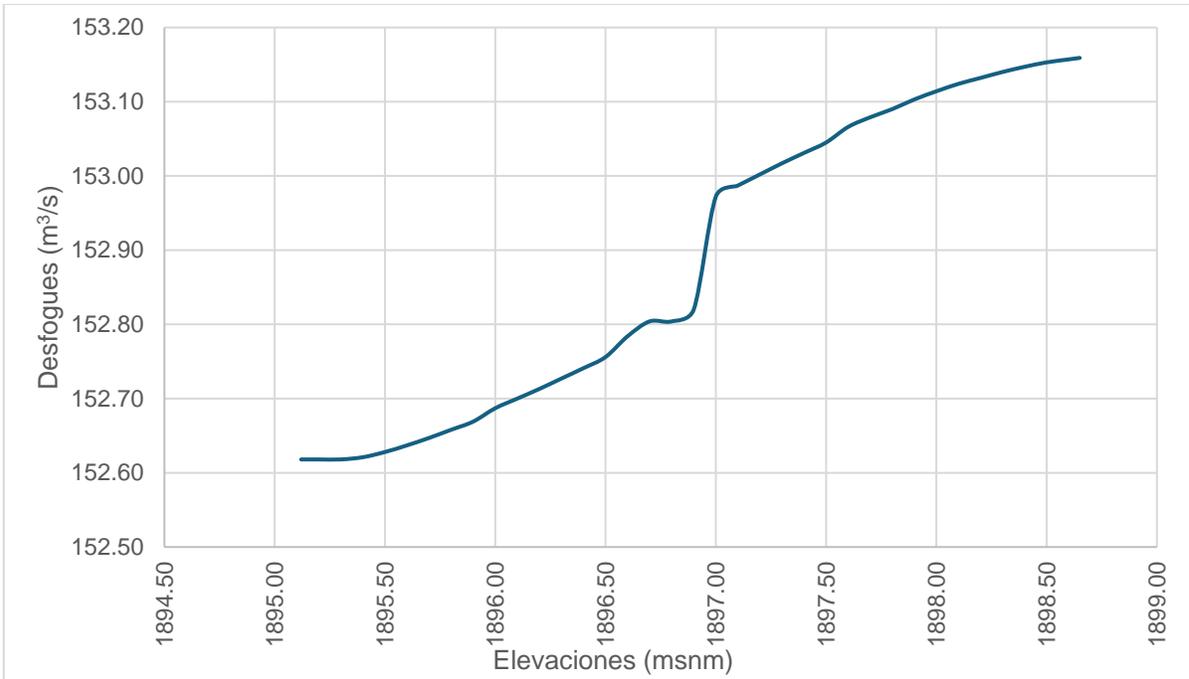


Figura 31. Grafica de comportamiento de desbordes para la presa Jesús María ante la ocurrencia de una lluvia de 25 años.

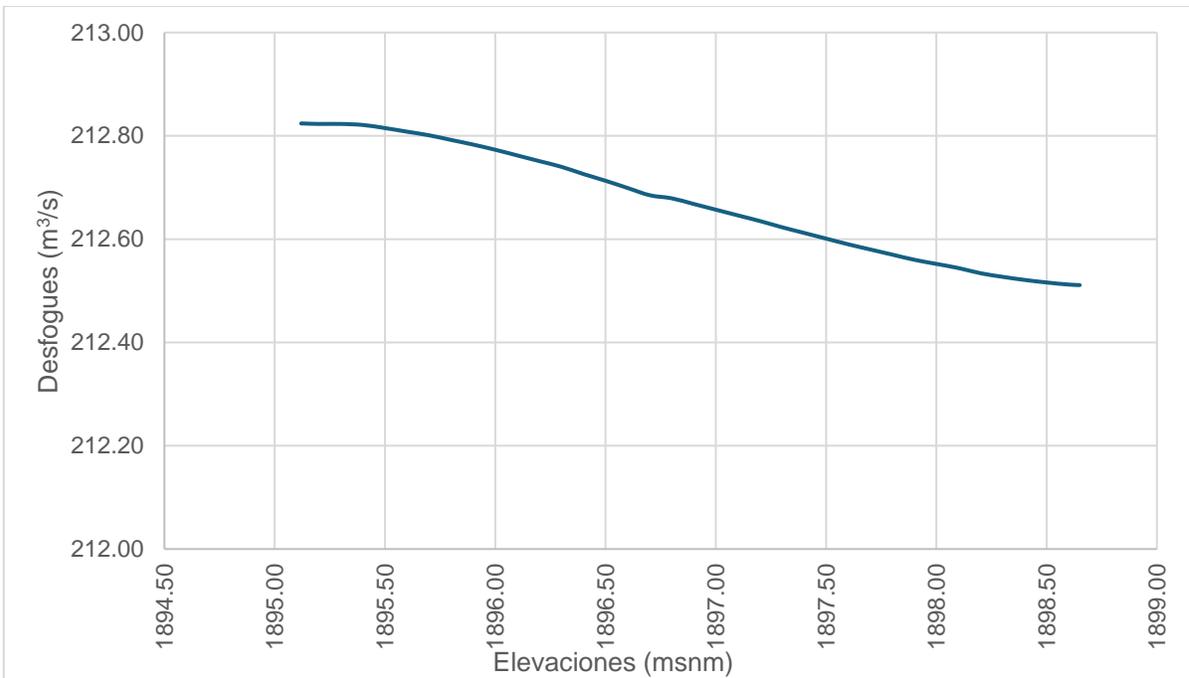


Figura 32. Grafica de comportamiento de desbordes para la presa Jesús María ante la ocurrencia de una lluvia de 50 años.

Como se puede ver en las figuras 28 a 31 la tendencia va en aumento conforme se aumenta el nivel inicial de agua en la presa antes de la avenida, mientras que en la figura 32 para eventos climatológicos poco probables se aprecia que la tendencia va en declive.

Con las gráficas anteriores el organismo operador de la presa Jesús María tiene elementos científicos para conocer la probabilidad de ocurrencia de los desbordes con base en un nivel de agua en el que se encuentre la presa, y cuál sería la magnitud del desborde, así como también elementos para asumir riesgos de daños a la población aledaña ante la presencia de un evento climatológico extraordinario.

## 8. CONCLUSIONES

La presa Jesús María fue construida sin considerar un análisis hidrológico y destinada única y exclusivamente para el riego agrícola, sin embargo, al obstruir el flujo de agua por motivo de la ubicación de un embalse, por añadidura se presenta un funcionamiento de vaso que depende de la geometría y las estructuras que éste contenga.

Con el presente trabajo se determinó la cuenca de influencia de la presa Jesús María y, se conocen los probables gastos que pueden llegar a presentarse, así como también los probables desbordes que se pueden llegar a presentar de acuerdo con la posible ocurrencia de un evento climatológico y al nivel de agua en el cual se encuentre la presa.

De acuerdo con información oficial (Conagua, 2012) se tiene concesionado un volumen de agua correspondiente a 840,000 metros cúbicos de agua para uso agrícola en la presa, por lo que hoy en día debido a la gran cantidad de azolves que presenta el embalse, la presa Jesús María no tiene la capacidad de almacenar este volumen, ni estando totalmente vacía.

Se debe tener bastante precaución a la hora de operar esta presa, debido a que, si se asume el riego de llenar la presa hasta el NAMO, se demorará 3 días y 10 horas para vaciarla (figura 33) y, debido a eso se pondría en grave riesgo a la población que habita aguas abajo de la cortina ante la posible ocurrencia de un evento climatológico extremo.

Como ya se mencionó anteriormente la presa Jesús María no tiene capacidad para regular lluvias mayores e iguales a periodos de retorno de 50 años, por lo que la presa solo puede regular hasta una lluvia de 25 años, y de acuerdo con la tabla 34 y figura 31 el nivel óptimo para minimizar los desbordes y preservar una mayor cantidad de almacenamiento de agua, se recomienda que en temporada de lluvia la presa se mantenga vacía (NAMIN=1895.97 m.s.n.m)

Por lo que para brindar seguridad hidráulica a la población aledaña a la presa Jesús María y minimizar el riesgo de desbordamiento ante la ocurrencia de un evento

climatológico, se recomienda modificar la política de extracción de agua, debido a que en temporada de lluvias la presa deberá permanecer vacía, cumpliendo lo anterior se podría reducir en un 2.1 % el pico de la avenida de una lluvia asociada a un periodo de retorno de 25 años.

Este trabajo fue revisado con base en las condiciones hidrológicas actuales en la cuenca de influencia y del embalse de la presa, por lo que se recomienda que las autoridades competentes soliciten a los urbanizadores regular mínimo el volumen excedente ocasionado por la alteración en la eficiencia de infiltración del suelo producto de la urbanización. De no llevarse a cabo lo anterior se corre el riesgo que los volúmenes de agua que llegan a la presa serán cada vez mayores y por añadidura la seguridad hidráulica se verá reducida.

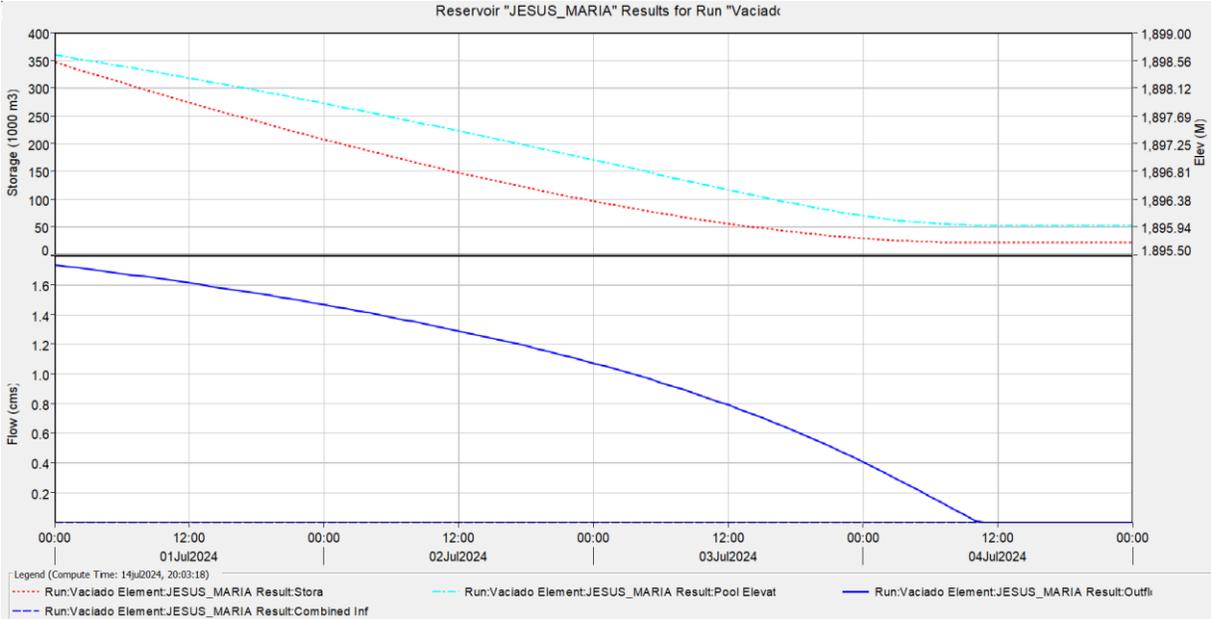


Figura 33. Comportamiento del vaciado de la presa Jesús María mediante un orificio de concreto de 0.61 metros de diámetro. (Fuente propia elaborada en el programa “HEC-HMS”)

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aparicio, F. (1992). *Hidrología de superficie*. Limusa.
- Arreguín, F. (2005). *Las presas y el hombre*. Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Ingeniería UNAM.
- Arreguín, F. (2021). *Obras hidráulicas* (Primera edición). Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Ingeniería UNAM.
- Avila, G. (1997). *Hidráulica general* (Noriega, Ed.; Vol. I). Limusa.
- Bayat, B. (2017). Nonstructural Flood Control using Multi-reservoir Operation. *Asian Journal of Fuzzy and Applied Mathematics*, 5(2).  
<https://doi.org/10.24203/ajfam.v5i2.4668>
- Campos, D. (1987). *Procesos del ciclo hidrológico* (Primera edición). Printengo.
- Campos, D. (2010). *Introducción a la hidrología urbana* (Decima primera). Printengo.
- Norma técnica para el diseño de la infraestructura de agua potable, agua tratada, alcantarillados sanitario y pluvial del estado de Querétaro, (2023).
- Chávez, P. (2019). Análisis del riesgo hidrológico en una presa existente – Presa Surasaca. *Análisis Del Riesgo Hidrológico En Una Presa Existente*, 1.  
<https://doi.org/10.19083/tesis/625119>
- Chereque, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada* (G. Santos, Ed.; J. Saldarriaga, Trans.). McGRAW-HILL.
- CONAGUA. (2012). *Sistema de seguridad de presas*. Sistema de Seguridad de Presas. <https://presas.conagua.gob.mx/inventario/>
- CONAGUA. (2014). *Lineamientos para la elaboración de mapas de peligro por*

*inundación.*

Gómez, J., Aparcio, F., & Patiño, C. (2010). *Manual de análisis de frecuencias en hidrología*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

INEGI. (2020). *Información geográfica y demográfica de México*. INEGI. [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx).

INEGI. (2023). *Mapas*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/>

INEGI, E. (2004). *Guía para la interpretación de cartografía edafología*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.

IPCC. (2007). *4rd. Assessment Report*. ONU; Intergovernmental Panel on Climate Change. [http://www.wmo.int/pages/partners/ipcc/index\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/partners/ipcc/index_en.html)

Jiménez, M. (1997). *manual de operación de los programas AX.EXE (para hidrología)*. Sistema nacional de protección civil centro nacional de prevención de desastres. CENAPRED.

Li, J., Zhong, P., Wang, Y., Yang, M., Fu, J., Liu, W., & Xu, B. (2022). Risk analysis for the multi-reservoir flood control operation considering model structure and hydrological uncertainties. *Journal of Hydrology*, 612, 128263. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128263>

Linsley, R., Kohler, M., & Paulus, J. (1977). *Hidrología para ingenieros (Segunda)*. McGRAW-HILL LATINOAMERICANA, S.A.

Merlos. (2017, August). *Manual de usuario SIHIMAX 1.56*. [Www.hidrobites.com](http://www.hidrobites.com); Hidrobites.

Mery, H. (2013). *Hidráulica aplicada al diseño de obras* (Primera edición). RIL Editores.

Montenegro, E. (2005). *Hidrología. Apuntes cursos Postgrado Gestión Integral de Recursos Hídricos*. Universidad Mayor de San Simón.

Righetto, A. M., & Freitas, B. (2016). Hydrological modeling of a detention reservoir: flood control and aquifer recharge. *RBRH*, 21(4), 752–765.

<https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616041>

Rodríguez, H. (2007). *Apuntes de tránsito de embalses*. Universidad Mayor de San Simón.

SEMARNAT. (2016). Análisis de riesgo y clasificación de presas . *Diario Oficial de La Federación*.

Springall, G. (1970). *Hidrología* (Vol. 1). Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Ingeniería UNAM.

Tan, Q., Mao, Y., Wen, X., Jin, T., Ding, Z., & Wang, Z. (2021). Copula-based modeling of hydraulic structures using a nonlinear reservoir model. *Hydrology Research*, 52(6), 1577–1595. <https://doi.org/10.2166/nh.2021.178>

US Army Corps of Engineers. (2024, May). *HEC-HMS User's Manual*. Hydrologic Engineering Center.

<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest>

Villón, M. (2002a). *Hidrología Estadística* (Segunda). Villón.

Villón, M. (2002b). *Hidrología* (Segunda). McGRAW-HILL.

Yin, L., Wang, L., Keim, B. D., Konsoer, K., & Zheng, W. (2022). Wavelet Analysis of Dam Injection and Discharge in Three Gorges Dam and Reservoir with Precipitation and River Discharge. *Water*, 14(4), 567. <https://doi.org/10.3390/w14040567>