



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS
DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

JOSÉ GUADALUPE GARCÍA CONTRERAS

ASESOR:

SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

DOCTORA EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

CO-ASESORES:

JESÚS PARDO LOAIZA

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

SERGIO EDUARDO CÁZAREZ RODRÍGUEZ

MAESTRO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS



*“Olvidamos que el ciclo del agua y
el ciclo de la vida son uno mismo.”*

-Jacques Y. Cousteau.

Dedicatoria:

*“Empecé este sueño con ustedes, no pude terminarlo con su compañía, pero sé que están a
mi lado, siempre...”*

Papá, mamá, Pepe, los extraño.

A mis padres:

José García González

Esperanza Contreras Loeza

Siempre fueron, son y serán lo que me mantiene vivo, por sus enseñanzas, por sus sacrificios, por su cariño y por todo ese amor que me dieron hasta su último aliento. Su espíritu se mantendrá vivo en mí por siempre. Sino fuera por todo lo que me enseñaron, no habría llegado hasta aquí. Ninguna palabra o acción será suficiente para decirles gracias ni mucho menos para decirles cuanto los quiero y los extraño. Un abrazo papá, mamá. Algún día nos volveremos a ver...

A Pepe:

Fuiste más de lo que necesitaba, un amigo, un consejero, un abuelito, alguien en quien se puede confiar y viviré eternamente agradecido por eso, tu recuerdo lo tendré presente por siempre, te quiero.

A mi familia y amigos:

Sin ustedes no habría podido seguir, son lo que me mantiene atado a estar aquí, su apoyo incondicional, sus consejos y compañía me han permitido superar cada obstáculo en mi vida.

A pesar de todo, lo logré.



Agradecimientos

Este trabajo no sólo representa mi esfuerzo y dedicación, representa también un puñado de emociones y sentimientos: alegría, tristeza, miedo, enojo, frustración, nostalgia, en fin... es una etapa más de mi vida que quizás no es la mejor, pero me siento conforme y agradecido por haber terminado, por creer en mí, por esforzarme tanto a pesar de llevar viento en contra, por nunca darme por vencido, por estar aquí y ahora, por seguir viviendo...

Primeramente, a quienes me dirigieron en este trabajo; mi asesora de tesis, la Dra. Sonia Tatiana S. Q.; a mis coasesores el Inge Checo Cázares y el Inge Jesús Pardo, gracias por su tiempo, paciencia y los conocimientos que me aportaron.

A todos mis compañeros y amigos del laboratorio de hidráulica quienes me acompañaron durante este proceso, de manera particular a: Marisela, Azucena, Julio, Mar, Daniel, Ángel de quienes aprendí al ser ayudante de técnico académico; a los que fueron mis servicios sociales, Sergio, Arturo, Dalí, Yafeth, Parra y muy especialmente a Mish quien siempre me demostró su apoyo incondicional.

A quienes me aconsejaron y guiaron como estudiante y egresado: mis profesores Guillermo Martínez, Constantino Domínguez, Noel Díaz, Efraín González, Benjamín Lara, Leonel Hurtado y a mi primer jefe de trabajo, el Inge Guillermo Arévalo.

Siempre estarán en mi corazón mis compañeros de infancia, de salón, compañeros de aventuras y peripecias: Iván, Daniel, Bryan, Rubí, Cynthia, Alexis, Adrián, Kathia, Rebeca, Cecilia, Miguel, Félix, Rigo, Álvaro, Tony, Joana, Diana, Alán, Aritsha, Moni y Mario... gracias por todo, por su amistad y apoyo incondicional, sus consejos, por todos esos buenos momentos que hemos compartido a través de los años, porque tenerlos como mis amigos hacen que sea más ameno este viaje llamado vida, los quiero.

Finalmente, a toda mi familia, a los que están aquí: gracias Tías Nico, Carmela; Madrina Toña, Tía Lola, Rosi, Tío Ezequiel, Reyna, Noemí, Marifer, César, Vero, Toño, gracias por estar pendientes de mí. Y los que físicamente no están, pero sigue presente su recuerdo, Pepe, mamá y papá, gracias especialmente a ustedes, sé que están felices de ver que lo logré, un abrazo.



Contenido	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivos generales.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. ANTECEDENTES.....	4
3.1 El agua y su distribución en la hidrosfera.....	4
3.1.1 Usos del agua	5
3.2 Movimiento del agua en la naturaleza	6
3.3 Hidrología	8
3.4 Definición de Cuenca y sus características geomorfológicas	9
3.5 Precipitación	12
3.6 Evapotranspiración	14
3.7 Esgurrimiento	15
3.8 Infiltración	16
3.9 Balance hidrológico	17
4. ZONA DE ESTUDIO	18
4.1 Caracterización de la zona de estudio.....	18
4.2 Localización.....	19
4.3 Orografía.....	23
4.4 Hidrografía.....	24
4.5 Clima.....	25
4.6 Edafología.....	26
4.7 Uso de suelo.....	27
4.8 Geología.....	29



5.	MATERIALES.....	31
5.1	Bases de datos	31
5.1.1	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)	31
5.1.2	Sistema CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)	35
5.1.3	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS-CONAGUA)	35
5.2	Softwares de análisis de datos.	36
5.2.1	GESTAD (GESTion de STADística de datos Climatológicos).....	36
5.2.2	JMP Statistical Discovery.™ From SAS.	37
5.3	Software de Modelación Geográfica	38
5.3.1	ArcGIS	38
5.4	Softwares de Modelación Matemática en la Gestión de los Recursos Hídricos....	39
5.4.1	El modelo EVALHID.....	41
5.4.2	El modelo SIMGES	50
6.	MÉTODOS.....	53
6.1	Delimitación del área de estudio mediante los Sistemas de Información Geográfica	53
6.2	Recopilación de Datos	55
6.2.1	Estaciones climatológicas.....	55
6.2.2	Estaciones hidrométricas	58
6.3	Procesamiento de la información climatológica en GESTAD	59
6.3.1	Análisis y validación de datos.....	60
6.3.2	Llenado de datos faltantes	69
6.4	Cálculo de la Evapotranspiración	71
6.4.1	Método de Thorntwaite	72
6.5	Modelo Precipitación-Escorrentía	73
6.5.1	Traslado de datos para la elaboración del MPE	77
6.5.2	Calibración del MPE.....	79
6.6	Análisis multivariante en las subcuencas para la asignación de parámetros del modelo de Témez.....	87



6.7	Modelo del Sistema de Gestión de Recursos Hídricos SIMGES	91
6.7.1	Elementos considerados	93
6.7.2	Calibración del modelo SIMGES	95
6.8	Restitución a Régimen Natural	97
6.9	Índices de Alteración Hidrológica (IAH)	98
6.9.1	Criterios utilizados para seleccionar los parámetros	99
6.9.2	Descripción de los parámetros e indicadores	101
7.	RESULTADOS	106
7.1	Resultados generales	106
7.2	Estaciones climatológicas	107
7.2.1	Selección de estaciones principales.	109
7.3	Estaciones Hidrométricas	114
7.4	Modelación y calibración del MPE en EvalHID	115
7.4.1	Modelación de la subcuenca de Cointzio	116
7.4.2	Modelación de la subcuenca de Queréndaro	121
7.4.3	Asignación de parámetros mediante análisis multivariante	126
7.5	Modelo de gestión (SIMGES) y su calibración.	132
7.5.1	Calibración del modelo SIMGES	137
7.6	Índices de Alteración Hidrológica (IAH)	144
8.	CONCLUSIONES	151
9.	RECOMENDACIONES	154
10.	REFERENCIAS	155



Índice de figuras

<i>Figura 1. Distribución del agua en el planeta Tierra.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. Ciclo hidrológico del agua.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3. Tipos de cuencas.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Características de la cuenca y los cauces.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 5. Tipos de Pluviómetros.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6. Balance hidrológico en una cuenca cerrada para un intervalo de tiempo determinado (Ley de la Conservación de la Masa.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7. Cuenca del Lago de Cuitzeo.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8. Macro y microlocalización de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9. Ubicación en Región Hidrológica.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 10. Ubicación en Subregión Hidrológica.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 11. Municipios abarcados por la Cuenca.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 12. Orografía de la zona de estudio.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 13. Red hidrográfica de la zona de estudio.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14. Clima presente en la zona de estudio.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 15. Edafología de la zona de estudio.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 16. Uso de suelo de la zona de estudio.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 17. Rejilla de los MDE en escala 1:50 000.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 18. Modelos de Precipitación–Escorrentía disponibles en EvalHID.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 19. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo de Témez.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 20. Cuenca del Lago de Cuitzeo en la plataforma del SIATL.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 21. Delimitación de la zona de estudio.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 22. Estaciones climatológicas seleccionadas para la zona de estudio.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 23. Estaciones hidrométricas en la zona de estudio.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 24. Ventana inicial del software GESTAD.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 25. Subcuencas de la zona de estudio (Pardo, 2016).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 26. Subcuenca perteneciente a la estación hidrométrica DM12347.....</i>	<i>76</i>



Figura 27.	Subcuenca perteneciente a la estación hidrométrica DM12314.	77
Figura 28.	Ventana de trabajo de la extensión de GESTAD para el traslado de datos.	78
Figura 29.	Esquema de funcionamiento del Calibrador para EvalHID (Casas, 2013).	80
Figura 30.	Hoja de cálculo “SCEUA” del calibrador para EvalHID.	81
Figura 31.	Gráficas creadas por el calibrador.	82
Figura 32.	Diagrama general del SCE-UA. Adaptación de Duan et al., 1992 (Casas y Paredes, 2013).	84
Figura 33.	Recomendación del CIS-WDF para los Ecological Quality Ratios.	102
Figura 34.	Diagrama radial para la representación conjunta de los IAH.	105
Figura 35.	Cuenca del Lago de Cuitzeo.	106
Figura 36.	Estaciones validadas por GESTAD.	109
Figura 37.	Mapa de estaciones climatológicas principales.	111
Figura 38.	Estaciones climatológicas seleccionadas para el MPE de EvalHID.	113
Figura 39.	Polígonos de Thiessen de las 13 estaciones seleccionadas.	113
Figura 40.	Estaciones hidrométricas empleadas para los modelos de EvalHID y SIMGES.	115
Figura 41.	Subcuenca de Cointzio.	116
Figura 42.	División de la subcuenca de Cointzio para el MPE de Témez.	117
Figura 43.	Ventana del software GESTAD para el traslado de datos a los centroides.	118
Figura 44.	Ventanas del software EvalHID con el MPE de la subc. de Cointzio.	119
Figura 45.	Subcuenca de Queréndaro.	121
Figura 46.	División de la subcuenca de Queréndaro para el MPE de Témez.	122
Figura 47.	Ventanas del software EvalHID con el MPE de la subc. de Queréndaro.	123
Figura 48.	Matriz de gráficos de dispersión elaborada por JMP.	127
Figura 49.	Conglomeración de subcuencas por el Método de Ward.	128
Figura 50.	Conglomeración jerárquica para la asignación de parámetros de Témez.	128
Figura 51.	Agrupación de subcuencas de acuerdo al análisis multivariante.	129
Figura 52.	Ventana del software EvalHID con las 16 subcuencas que conforman el modelo general de la cuenca.	130



Figura 53. Ventana con el resumen de parámetros de Témez.....	130
Figura 54. Ventana que muestra el modelo de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	131
Figura 55. Detalle del esquema de simulación SIMGES de la Cuenca del Lago de Cuitzeo (Pardo, 2016).	133
Figura 56. Plano topobatimétrico del Lago de Cuitzeo (CONAGUA, 2019).	134
Figura 57. Gráfica de áreas y volúmenes del Lago de Cuitzeo en sus condiciones naturales y vaso reducido (CONAGUA, 2019).	134
Figura 58. IAH del Río Grande de Morelia.....	145
Figura 59. IAH para los tramos 102 al 106 del Río Grande de Morelia.	146
Figura 60. Esquema de los tramos con mayor afectación.....	147
Figura 61. IAH del Río Queréndaro.	148
Figura 62. IAH para los tramos 202 y 203 del Río Queréndaro.	149
Figura 63. Esquema de los tramos con menor afectación.	150



Índice de tablas

<i>Tabla 1. Clasificación de los principales usos del agua.</i>	5
<i>Tabla 2. Municipios que abarca la Cuenca del Lago de Cuitzeo.</i>	21
<i>Tabla 3. Porcentajes de las áreas de los suelos presentes en la zona de estudio.</i>	27
<i>Tabla 4. Porcentajes de las áreas de los suelos presentes en la zona de estudio.</i>	29
<i>Tabla 5. Rangos de los parámetros del modelo de Témez.</i>	49
<i>Tabla 6. Valores aproximados de Hmax según usos del suelo (Estrela et al., 1999).</i>	49
<i>Tabla 7. Valores aproximados de Imax según la litología del terreno (Estrela et al., 1999).</i>	50
<i>Tabla 8. Datos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.</i>	54
<i>Tabla 9. Estaciones climatológicas seleccionadas.</i>	55
<i>Tabla 10. Estaciones hidrométricas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.</i>	59
<i>Tabla 11. Cambios permitidos para el Test de Helmert (Campos, 2011).</i>	62
<i>Tabla 12. Valores de Ka (Aparicio, 1997).</i>	73
<i>Tabla 13. Nombre de las subcuencas de la zona de estudio (Pardo, 2016).</i>	74
<i>Tabla 14. Datos de la subcuenca Cointzio perteneciente a la estación hidrométrica DM12347.</i>	76
<i>Tabla 15. Datos de la subcuenca Queréndaro perteneciente a la estación hidrométrica DM12314.</i>	77
<i>Tabla 16. Variables ingresadas para el análisis multivariante.</i>	91
<i>Tabla 17. Resumen de parámetros IAH.</i>	100
<i>Tabla 18. Resumen de los indicadores utilizados IAH (Ortín, 2017).</i>	101
<i>Tabla 19. Estados de alteración según el valor del indicador.</i>	102
<i>Tabla 20. Criterio de discretización para selección de estaciones climatológicas.</i>	107
<i>Tabla 21. Periodo histórico de información y % de años efectivos de la est. clim.</i>	107
<i>Tabla 22. Estaciones climatológicas que pasaron 7 de 8 pruebas.</i>	108
<i>Tabla 23. Porcentaje de peso para selección de estaciones principales.</i>	109
<i>Tabla 24. Estaciones principales para la zona de estudio.</i>	110



Tabla 25. Selección de curva para No. mín. de est. climatológicas (Aparicio, 1997).	112
Tabla 26. Estaciones climatológicas a emplear para el MPE.	112
Tabla 27. Estaciones climatológicas para la subc. de Cointzio.	116
Tabla 28. Estación hidrométrica para la subc. de Cointzio.	117
Tabla 29. Coordenadas de los centroides de la subc. de Cointzio.	118
Tabla 30. Valores de las funciones objetivo del algoritmo autocalibrador SCE-UA para subc. de Cointzio.	119
Tabla 31. Estaciones climatológicas para la subc. de Queréndaro.	122
Tabla 32. Estación hidrométrica para la subc. de Queréndaro.	122
Tabla 33. Coordenadas de los centroides de la subc. de Queréndaro.	123
Tabla 34. Valores de las funciones objetivo del algoritmo autocalibrador SCE-UA para sub. de Queréndaro.	124
Tabla 35. Parámetros de Témez obtenidos del MPE.	126
Tabla 36. Matriz de correlación con las características que influyen en el escurrimiento superficial.	126
Tabla 37. Agrupación de subcuencas por medio de análisis multivariante.	129
Tabla 38. Valores de las área y volúmenes para las cotas de SIMGES, obtenidos del plano topobatimétrico del Lago de Cuitzeo.	135
Tabla 39. Valores iniciales de SIMGES de la presa Cointzio.	138
Tabla 40. Valores finales de SIMGES de la presa Cointzio.	139
Tabla 41. Valores iniciales de SIMGES de la presa Malpaís.	141
Tabla 42. Valores finales de SIMGES de la presa Malpaís.	142
Tabla 43. Valores de los IAH del Río Grande de Morelia.	145
Tabla 44. Valores de los IAH para los tramos 102-106.	147
Tabla 45. Valores de los IAH del Río Queréndaro.	148
Tabla 46. Valores de los IAH para los tramos 202 y 203.	149



Índice de gráficas

<i>Gráfica 1. Resultados del modelo sin calibrar en la presa de Cointzio con un RMSE= 11.83.</i>	96
<i>Gráfica 2. Resultados del modelo calibrado en la presa de Cointzio con un RMSE= 2.46..</i>	97
<i>Gráfica 3. Número mínimo de estaciones climatológicas para calcular la precipitación (Aparicio, 1997).</i>	112
<i>Gráfica 4. Comparativa de aportaciones mensuales simulados y observados de la subcuenca de Cointzio.</i>	120
<i>Gráfica 5. Comparativa de aportaciones anuales simuladas y reales de la subcuenca de Cointzio.</i>	120
<i>Gráfica 6. Comparativa de año medio simulado y real de la subc. de Cointzio.</i>	121
<i>Gráfica 7. Comparativa de aportaciones mensuales simulados y observados de la subcuenca de Queréndaro.</i>	124
<i>Gráfica 8. Comparativa de aportaciones anuales simuladas y reales de la subcuenca de Queréndaro.</i>	125
<i>Gráfica 9. Comparativa de año medio simulado y real de la sub. de Queréndaro.</i>	125
<i>Gráfica 10. Volúmenes históricos de la presa Cointzio.</i>	135
<i>Gráfica 11. Volúmenes medios históricos de la presa Cointzio.</i>	136
<i>Gráfica 12. Volúmenes históricos de la presa Malpaís.</i>	136
<i>Gráfica 13. Volúmenes medios históricos de la presa Malpaís.</i>	137
<i>Gráfica 14. Resultados del modelo sin calibrar en la presa de Cointzio.</i>	138
<i>Gráfica 15. Resultados del modelo calibrado en la presa de Cointzio.</i>	139
<i>Gráfica 16. Comparativa de vol. mensuales históricos VS. vol. mensuales simulados en el embalse "Cointzio".</i>	140
<i>Gráfica 17. Comparativa vol. medios históricos VS. vol. medios simulados del embalse "Cointzio".</i>	140
<i>Gráfica 18. Resultados del modelo sin calibrar en la presa de Cointzio.</i>	141
<i>Gráfica 19. Resultados del modelo calibrado en la presa de Malpaís.</i>	142



<i>Gráfica 20. Comparativa de vol. mensuales históricos VS. vol. mensuales simulados en el embalse "Malpaís".....</i>	<i>143</i>
<i>Gráfica 21. Comparativa vol. medios históricos VS. vol. medios simulados del embalse "Malpaís".....</i>	<i>143</i>
<i>Gráfica 22. Comportamiento de los volúmenes del Lago de Cuitzeo del modelo SIMGES calibrado.....</i>	<i>144</i>



Resumen

El Lago de Cuitzeo es de gran importancia para el estado de Michoacán, ya que es uno de los lagos más grandes y antiguos de México, genera control en el clima de la región y es el sustento de la economía local (Chacón, 2018). Es por eso que se ve la necesidad de realizar un estudio sobre los escurrimientos superficiales de la zona.

Se ha observado que el lago, debido a factores como la extracción y desviación de agua para diversos fines, tala ilegal y problemas asociados al cambio climático presenta un desorden hidrológico (Pardo, 2016). También, los sistemas de almacenamiento de agua o cualquier otra obra de infraestructura hidráulica que altere los patrones de flujos, casi de un modo automático producen alteraciones sobre los ciclos biogeoquímicos, que son a menudo drásticas, dependiendo de las dimensiones de la obra que se trate (Toledo, 2006).

Al interrumpir la continuidad del ciclo hidrológico en una de sus fases, repercute en las demás, es por esto que al modificar los escurrimientos naturales hacia el Lago de Cuitzeo y modificando sus márgenes genera una reducción del recurso hídrico que debería evaporarse para posteriormente convertirse en precipitación, siendo esto una causa de las sequías que se han observado de manera periódica y cada vez con intervalos de tiempo más cortos.

La evaluación de los recursos hídricos es parte fundamental para la gestión integral del agua, por tal motivo se obtendrán las características geomorfológicas de la cuenca por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y se utilizará el modelo de Témez por medio del software EvalHID para realizar un modelo de precipitación-escorrentía de la cuenca del Lago de Cuitzeo y conocer la cantidad de recurso hídrico que ésta produce.

A su vez, otro propósito de este estudio es el de evaluar el grado de alteración hidrológica presente en la Cuenca del Lago de Cuitzeo mediante el cálculo de indicadores basados en la comparación del régimen hidrológico en estado natural (previo a la aparición de alteraciones) con el régimen hidrológico existente (León, 2017). Dicha información se generará a través de un modelo de gestión de recursos hídricos de la cuenca generado con el software SIMGES.

Palabras clave: cuenca, balance hídrico, Témez, gestión de recursos hídricos, alteración hidrológica.



Abstract

Lake Cuitzeo is of great importance to the state of Michoacán, since it is one of the largest and oldest lakes in Mexico, it generates control over the region's climate and it is the mainstay of the local economy (Chacón, 2018). That is why it is necessary to carry out a study on the surface runoff of the area.

It has been observed that the lake, due to factors such as the extraction and detour of water for various purposes, illegal logging and problems associated with climate change presents a hydrological disorder (Pardo, 2016). Also, water storage systems or any other hydraulic infrastructure works that alter flow patterns, almost automatically produce alterations on biogeochemical cycles, which are often drastic, depending on the dimensions of the work in question (Toledo, 2006).

When the continuity of the hydrological cycle is interrupted in one of its phases, it has repercussions on the others. This is why modifying the natural runoffs towards Lake Cuitzeo and modifying its margins generates a reduction in the water resource that should evaporate and later become precipitation, which is one of the causes of the droughts that have been observed periodically and with increasingly shorter intervals of time.

The evaluation of the water resources is a fundamental part for the integral management of the water, for that reason the geomorphologic characteristics of the basin will be obtained by means of Geographic Information Systems (GIS) and the model of Témez will be used by means of the software EvalHID to make a model of precipitation-runoff of the basin of the lake of Cuitzeo and to know the amount of water resource that this one produces.

At the same time, another purpose of this study is to evaluate the degree of hydrological alteration present in the Cuitzeo Lake Basin through the calculation of indicators based on the comparison of the hydrological regime in its natural state (prior to the appearance of alterations) with the existing hydrological regime (León, 2017). This information will be generated through a model of water resources management in the basin generated with the SIMGES software.

Keywords: basin, water balance, Témez, water resources management, hydrological alteration.



1. INTRODUCCIÓN

El Lago de Cuitzeo es uno de los lagos más antiguos del mundo y el segundo cuerpo de agua más grande de la República Mexicana, además, es de gran importancia para la región, ya que contribuye a regular el clima de la cuenca, es hábitat de diversas especies acuáticas y es parte fundamental del desarrollo de la economía local ya que una de las principales actividades del sector económico primario es la pesca.

La Cuenca endorreica del Lago de Cuitzeo está situada en la parte sur de la Altiplanicie Mexicana. Está rodeada al sur por elevaciones que forman parte del Eje volcánico en su porción de las sierras Tarasca y Otzumatlán; al sureste por las de Mil Cumbres y Ucareo; y al norte limita con la región del Bajío regada por el Río Lerma. La superficie de la cuenca es aproximadamente es de 4003 km² y abarca 28 municipios pertenecientes a los estados de Michoacán y Guanajuato.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático indica que la Cuenca del Lago de Cuitzeo se encuentra en una situación de extrema alteración respecto de su dinámica funcional. Esto tiene que ver con diversos aspectos, tales como la desmesura en la desviación y extracción de agua para fines agropecuarios y pecuarios, la contaminación urbana y por medio de fertilizantes, la tala ilegal, además de problemas asociados al cambio climático, es por esto que se ve la necesidad de realizar un balance hídrico para poder determinar la cantidad de agua que se genera en los diferentes afluentes de la cuenca, la precipitación que se infiltra y la que se evapotranspira.

Para la realización de este modelo de precipitación-escorrentía, se basará en los datos climatológicos e hidrométricos recopilados, bajo un criterio estricto de verificación de datos y así observar el impacto que éste tenga en la calibración del modelo.

La necesidad básica de las comunidades por el uso del agua ha requerido de la construcción de obras de infraestructura hidráulica desde tiempos remotos. Este requisito básico para el desarrollo humano de retener el agua circulante en los sistemas fluviales ha creado una fuerte alteración en el régimen de los caudales naturales alrededor del mundo.



Por otro lado, la necesidad de medir y evaluar el estado hidrológico del régimen de flujo que circula en sistemas fluviales ha llevado a producir más de 200 métodos agrupados en cuatro categorías principales: reglas hidrológicas, métodos de calificación hidráulica, métodos de simulación de hábitat y metodologías holísticas (Arthington, Bunn, Poff y Naiman, 2006).

Una de las métricas más utilizadas son los Indicadores de alteración hidrológica (IHA) (B. Richter, Baumgartner, Wigington y Braun, 1997; B. D. Richter, Baumgartner, Powell y Braun, 1996). Esta metodología considera la definición de una serie de atributos hidrológicos relevantes que caracterizan las variaciones intraanuales de las condiciones del agua, y luego realiza un análisis de la variación interanual de estos atributos como la base de una comparación de un régimen natural contra un sistema alterado por actividades humanas. Los resultados establecen un conjunto representativo de múltiples parámetros, que determinan el grado de alteración hidrológica del sistema.

Las alteraciones evaluadas en estas métricas requieren dos tipos de escenarios: un escenario de régimen de flujo natural y uno alterado. En el primer caso, se supone que no hay interferencia antropogénica, mientras que en el segundo caso puede haber presencia de diferentes tipos de infraestructura hidráulica (es decir, presas, embalses, canales artificiales).

Para lograr evaluar estos dos escenarios, se utilizará un Sistema de Soporte a la Decisión (SSD) para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH). La GIRH se basa en tres pilares fundamentales para su correcta aplicación: eficiencia económica, equidad y sostenibilidad ambiental; con el propósito de alcanzar un equilibrio de agua para el sustento y el agua como recurso (Hassing, Ipsen, Clausen, Larsen y Lindgaard-Jørgensen, 2009).

La zona de estudio elegida para hacer esta evaluación es la Cuenca endorreica del Lago de Cuitzeo la cual se ubica en la parte norte de Michoacán entre las coordenadas 19° 30' y 20° 05' de latitud norte, y 100° 35' y 101° 30' de longitud oeste y abarca una extensión aproximada de 4003 km². El lago y las zonas de inundación cubren alrededor de 400 km², los cuales producen varios beneficios para la región: regulan el clima de la cuenca, ofrecen sustento y hábitat a varias especies, apoyan la economía de varias comunidades aledañas que practican la pesca y la agricultura de riego.



2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos generales

Evaluar los recursos hídricos superficiales de la Cuenca del Lago de Cuitzeo a partir de una serie de datos continua y actual, la cual nos permita crear un modelo de precipitación-escurrimiento mediante el modelo de Témez integrado en el software EvalHID para obtener los escurrimientos en los principales embalses de la cuenca para posteriormente complementar el modelo de gestión mediante el software SIMGES, en donde los escurrimientos se verán afectados por las demandas urbanas y agrícolas, así como los retornos que hay en los principales afluentes de la cuenca que son el Río Grande de Morelia y el Río Queréndaro, para de esta manera, lograr obtener los índices de alteración hidrológica en cada uno de ellos, así como también el analizar las metodologías implementadas en el presente estudio y determinar si son aplicables para otros estudios de la misma índole.

2.2 Objetivos específicos

- Obtención de las características geomorfológicas de la cuenca mediante Sistemas de Información Geográfica.
- Generar una serie de datos climatológicos actual y continua para estudios posteriores.
- Determinar los escurrimientos superficiales mediante la modelación Precipitación-escurrimiento de la cuenca con base en la serie de datos elaborada.
- Calibrar el modelo de evaluación hídrica y el modelo de gestión.
- Lograr tener un modelo de restitución a régimen natural de la Cuenca.
- Obtener los índices de alteración hidrológica en los Ríos Grande y Queréndaro.
- Análisis de las metodologías aplicadas.
- Desarrollo de criterios para estudios hidrológicos posteriores.

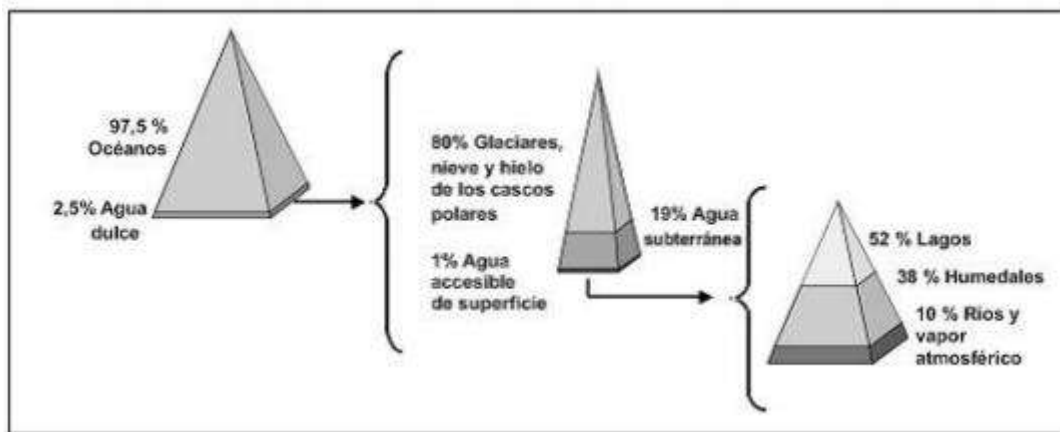
3. ANTECEDENTES

3.1 El agua y su distribución en la hidrosfera

El agua es esencial para el desarrollo y subsistencia de la vida, así como para el desarrollo de las sociedades. Es un recurso que posee propiedades únicas que, a pesar de ser abundante en el mundo, no toda se puede emplear para el consumo humano y el desconocimiento de su distribución en el planeta nos hace creer que caemos en un superávit de agua universal. Dicho recurso es renovable; no obstante, es finito y esto aunado al crecimiento poblacional y los factores antrópicos que intervienen en su ciclo hace que el agua se considere como un recurso insuficiente.

La Tierra está cubierta en su superficie por más del 70% de agua, el cual se encuentra distribuida en océanos, lagos, ríos; en el aire, en el suelo. De un 100% de agua en la tierra, los océanos abarcan un 97.5%. Únicamente un 2,5% es agua dulce. Los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares representan casi el 80% del agua dulce, el agua subterránea 19% y el agua de superficie accesible rápidamente sólo el 1%. Esta baja cantidad de agua de superficie fácilmente accesible, se encuentra principalmente en lagos (52%) y humedales (38%); ríos y vapor atmosférico (10%) (figura 1).

Figura 1. Distribución del agua en el planeta Tierra.



Fuente: Fernández Cirelli A., El agua: un recurso esencial (2012)

El ser humano emplea el agua para diversos fines tales como satisfacer las necesidades básicas particulares, fines recreativos, ganadería y agricultura, para procesos de manufactura y para la transformación de energía, es por esto que resulta de suma importancia



la adecuada utilización y distribución de este recurso y generar un desarrollo sustentable del agua.

3.1.1 Usos del agua

Se define al uso como la aplicación del agua a una actividad (CNA, 2010). El agua tiene diversos usos y se puede clasificar en función del área que la esté analizando. Desde el punto de vista hidrológico, existen dos tipos de uso de agua: consuntivos y no consuntivos. El Uso consuntivo es aquel en el que por características del proceso existen pérdidas volumétricas de agua, misma que se determina por la diferencia del volumen de una cantidad determinada que se extrae menos una que se descarga y que se señala en el título –concesión o asignación- respectivo. Mientras que el uso no consuntivo es aquel en el que no existe pérdida de agua, ya que la cantidad que entra es la misma o aproximadamente la misma que termina con el proceso (Castelán, 2001).

Tabla 1. Clasificación de los principales usos del agua.

Usos consuntivos	Usos no consuntivos
Agrícola ^a	Energía eléctrica (hidroeléctricas)
Abastecimiento público ^b	Acuacultura
Industria autoabastecida ^c	Actividades recreativas
Termoeléctricas	Navegación
	Transporte

Nota.

^a Incluye los rubros agrícola, pecuario, acuacultura, múltiples y otros de la clasificación del REPDA. Incluye asimismo 1.30 km³ de agua correspondientes a Distritos de Riego pendientes de inscripción.

^b Incluye los rubros público urbano y doméstico de la clasificación del REPDA.

^c Incluye los rubros industrial, agroindustrial, servicios y comercio de la clasificación del REPDA.

Fuente: CONAGUA. Subdirección General de Administración del Agua.

En los usos consuntivos que son los que interesan para el presente estudio, se definen de la siguiente manera:



1. **Uso agrícola.** El principal uso del agua en México es el agrícola, el cual en términos de uso de aguas nacionales se refiere principalmente al agua utilizada para el riego de cultivos (CNA, 2010).
2. **Abastecimiento público.** El uso para abastecimiento público incluye la totalidad del agua entregada a través de las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos (domicilios), así como a las diversas industrias y servicios conectados a dichas redes. El disponer de agua en cantidad y calidad suficiente para el consumo humano es una de las demandas básicas de la población, pues incide directamente en su salud y bienestar en general (CNA, 2010).
3. **Industria autoabastecida.** En este rubro se incluye la industria que toma el agua que requiere directamente de los ríos, arroyos, lagos o acuíferos del país. Conforme al Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) las actividades secundarias, conocidas tradicionalmente como “la industria”, están conformadas por los sectores minería, electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final, así como la construcción e industrias manufactureras. Cabe destacar que la clasificación de usos del REPDA no sigue precisamente esta clasificación, sin embargo, se considera que existe un razonable nivel de correlación (CNA, 2010).
4. **Termoeléctricas.** El agua incluida en este rubro se refiere a la utilizada en centrales de vapor duales, carboeléctricas, de ciclo combinado, de turbogas y de combustión interna (CNA, 2010).

3.2 Movimiento del agua en la naturaleza

Cuando la energía procedente de la radiación solar actúa sobre la superficie de las masas de agua en estado sólido, líquido o sobre el suelo húmedo, el agua pasa a estado



gaseoso mediante los procesos de sublimación (paso hielo a vapor) y evaporación (paso líquido a vapor). Ambos términos en hidrología se consideran como evaporación. El vapor de agua asciende en la atmósfera y se enfría, lo que da lugar, por condensación, a la formación de las pequeñas partículas de agua que originan las nubes, éstas son arrastradas hacia el continente donde como consecuencia de un proceso termodinámico, en parte adiabático y en parte no adiabático, las pequeñas partículas de agua aumentan considerablemente su tamaño. Cuando este es suficiente para vencer la resistencia del aire, caen hacia la superficie de la tierra atraídas por la fuerza de la gravedad. Es lo que se conoce con el nombre de precipitación. Según la magnitud y la velocidad del cambio de presión y temperatura durante el proceso termodinámico, la precipitación puede ser en forma líquida o en forma sólida cristalizada o amorfa (Martínez et al., 2006).

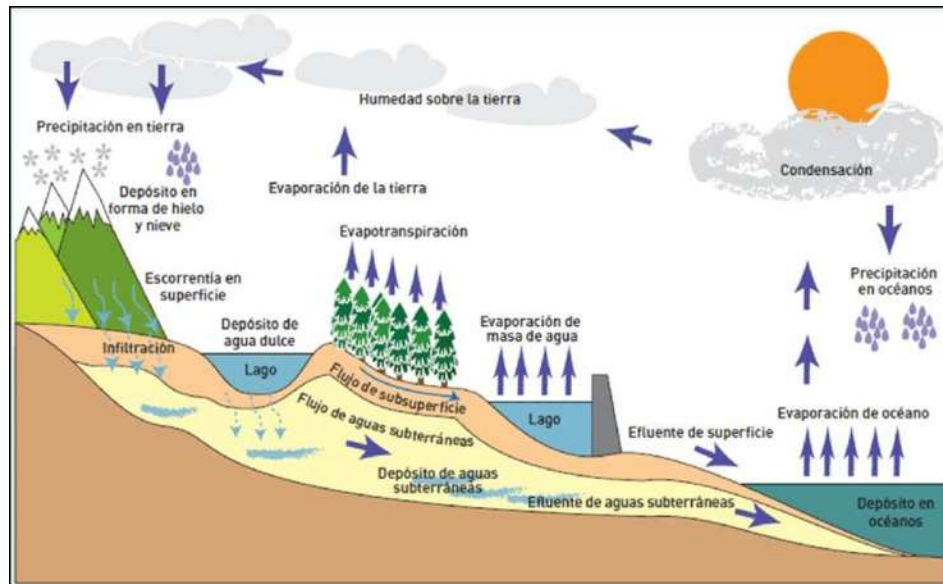
En este proceso, parte de la precipitación no llega hasta el suelo por la intervención de algún obstáculo (árboles, construcciones, etc.) y se evapora para regresar a la atmósfera.

El agua que llega hasta la superficie de la Tierra y logra atravesar hasta el subsuelo se le denomina infiltración, por otra parte, debido a la permeabilidad del suelo en función de sus características del material por el cual esté compuesto, puede resbalarse a través de acantilados o collados que pueden desembocar en arroyos, ríos, lagos, presas o en el mar, a esto se le llama escorrentía o escurrimiento superficial.

Dependiendo del tipo de suelo existente, el agua puede entrar de primer instante a una zona no saturada del suelo donde la vegetación saca provecho y regresarán esa agua a la atmósfera mediante transpiración y el mismo suelo la evaporará en caso de no existir vegetación, si el agua continua descendiendo llegará a una zona saturada por la cual también existe un movimiento y que se logra almacenar o moverse hasta llegar a manantiales o el mar, a esto se le conoce como escurrimiento subterráneo.

El agua en la naturaleza está en continuo movimiento accionada por la energía solar y por la fuerza de la gravedad, describiendo un ciclo, ciclo hidrológico (figura 2) que suele explicarse considerando que empieza y termina en el mar (Martínez et al., 2006).

Figura 2. Ciclo hidrológico del agua.



El ciclo hidrológico del agua se ha visto alterado debido a las actividades que realiza el ser humano y al cambio climático, además también de que su “purificación” natural en ocasiones no se puede llevar a cabo de manera total, ya que factores como el dióxido de carbono producto de la quema de combustibles fósiles o los gases emitidos por fábricas, logran mezclarse en la etapa de la condensación y produce lluvia ácida la cual está formada por óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre o trióxido de azufre.

3.3 Hidrología

Hay diversas definiciones acerca de esta rama de la ingeniería, pero la más aceptada es la siguiente. Según Chow (1964):

“Hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo los seres vivos.”

La hidrología se apoya de otras ciencias para obtener un correcto análisis ya que la circulación del agua es por diferentes medios, para esto las principales ciencias son básicamente la hidráulica, geología, meteorología, matemáticas, estadística, geografía física, química, física y la biología.



En la Ingeniería Civil cuando se diseña, se construye o supervisa algún proyecto, se requiere realizar un análisis hidrológico cuantitativo que nos permita conocer como impacta una avenida de agua, que a diferencia de otros estudios que solamente son aproximados, este debe ser muy exhaustivo y exacto. El objetivo de la hidrología es determinar dichos eventos y a su vez pronosticarlos para lograr la seguridad de la obra o en el caso de las presas y sistemas de captación de agua, que tengan la capacidad suficiente para su almacenamiento.

Un análisis hidrológico involucra variaciones espaciales y temporales de precipitación, temperatura y escurrimientos, dichas variables conforman un conjunto de datos bastante extenso que requiere de su compilación y de su análisis estadístico y probabilístico para observar si dichos datos son relevantes y representativos de la zona de estudio. En ocasiones existe la problemática de no existir la cantidad de datos históricos suficientes, para esto existen organismos gubernamentales que facilitan la obtención de estos datos. Algunos organismos que se encargan de la recolección y captura de esta información en México son la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Base de Datos Climatológica Nacional (CLICOM) y el Sistema Meteorológico Nacional (SMN), entre otros.

Actualmente el constante avance tecnológico ha permitido el desarrollo de softwares que hacen del análisis de datos climatológicos una labor más sencilla que en el pasado, sin embargo, si no se tiene el criterio adecuado, se puede caer en el error de no interpretar adecuadamente la información ingresada y obtener resultados ilógicos, es por esto que el conocimiento de las bases y principios fundamentales de la hidrología es de vital importancia.

3.4 Definición de Cuenca y sus características geomorfológicas

Una cuenca es un espacio territorial definido por una línea imaginaria que une los puntos más altos de la topografía llamada parteaguas donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos/ríos) y son drenados por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida que es el punto más bajo.

En función del punto de salida se puede definir el tipo de cuenca, fundamentalmente hay dos tipos de cuencas (figura 3): endorreicas, las cuales el punto de salida está dentro de

los márgenes de la cuenca y que por lo general son lagos; y exorreicas, donde el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y desembocan en otra corriente de mayor orden o en el mar. Existe un tercer tipo de cuencas, estas a diferencia de las anteriores, no tiene salida hacia el mar ni tampoco drena hacia un cuerpo de agua colector observable, sino que sus únicas salidas son por medio de evaporación o infiltración.

Figura 3. Tipos de cuencas.



La cantidad de agua que escurre, que se infiltra y que se evapotranspira; el tiempo que tarda en llegar desde el punto más alto hasta su punto de salida en la cuenca, son factores que se ven afectados por procesos que intervienen por la geomorfología de la cuenca en la que la climatología es uno de los factores más importantes, el tipo y uso de suelo y la topografía de la zona de estudio.

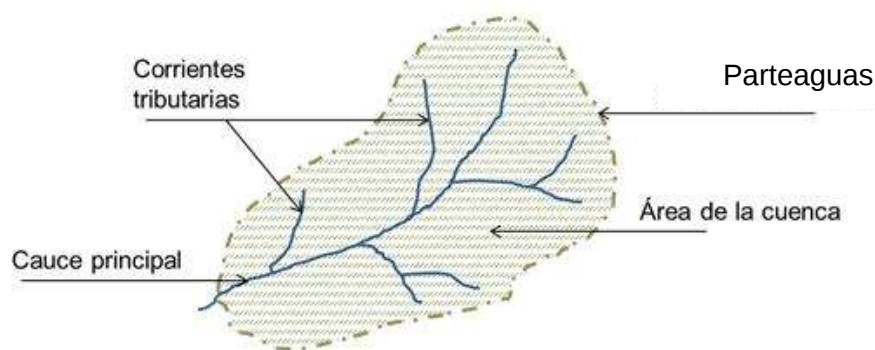
Las principales características geomorfológicas (figura 4) de la cuenca son las siguientes:

- **Área de la cuenca.** Se define como la superficie en proyección horizontal que está delimitada por el parteaguas.
- **Perímetro.** Es la longitud del parteaguas y que permite definir si la cuenca es alargada o redondeada.
- **Forma de la cuenca.** Se determina en función del área de la cuenca, el perímetro, o la longitud del cauce principal.
- **Corriente principal.** Es la corriente que va desde el punto de salida hasta el punto más alejado aguas arriba de la misma, esto sólo aplica cuando se trata

de una cuenca exorreica. Las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan corrientes tributarias. Toda cuenca tiene solamente una corriente principal. Las cuencas correspondientes a las corrientes tributarias o a los puntos de salida se les llama subcuencas. A mayor número de corrientes tributarias, más rápida será su respuesta a la precipitación (Aparicio, 1997).

- **Sistema de drenaje.** Está conformado por el cauce principal y sus corrientes tributarias, existen parámetros más representativos como el orden de corrientes y la razón de bifurcación. Un orden de corrientes alto refleja una cuenca que responde rápidamente a una tormenta.
- **Pendiente media de la cuenca.** Es uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca. Dado que la pendiente va variando a lo largo del cauce, es necesario definir una pendiente media y para esto a varios métodos de obtención, los cuales son elegidos a criterio del calculista.

Figura 4. Características de la cuenca y los cauces.



Dentro de estos factores también es importante mencionar la geología, el tipo de suelo y la cobertura vegetal ya que determinan la permeabilidad de la superficie de la cuenca.

Campos Aranda (1992) nos dice que el suelo influye especialmente sobre el régimen hidrológico de la corriente y su transporte de material sólido, ya que sus características físicas determinan la naturaleza y desarrollo de la vegetación y por lo tanto la evapotranspiración, la erosión y arrastre de sólidos son función del tipo de suelos de la cuenca. Concretamente



en relación a los suelos será conveniente estimar su capacidad de infiltración, su capacidad de retención (texturas) y la magnitud de las pérdidas iniciales de una tormenta. (p. 2-16)

La vegetación influye a la geología de la cuenca para condicionar la retención, la evaporación y el escurrimiento, ya que la vegetación controla la acción y el movimiento del agua: intercepción, infiltración, almacenamiento, evapotranspiración y erosión (López y Blanco, 1976).

3.5 Precipitación

El agua en la atmosfera se presenta en sus tres estados, líquido, sólido y gaseoso. En hidrología se analiza el escurrimiento provocado por los tres estados, pero muy especialmente al fenómeno de condensación en el cual el vapor de agua asciende y satura la atmósfera de tal manera que cae por la diferencia de densidades hacia la superficie de la tierra y que no se evapora durante su descenso.

La precipitación es quizás, el componente más importante del ciclo hidrológico y es el responsable de que en el planeta exista agua dulce de manera natural. En cualquier estudio hidrológico la precipitación es la primera parte a analizar una vez definida la zona de estudio.

Existen varias clases de precipitación que están en función de las características de la ascendencia y temperatura del aire debajo de las nubes, básicamente estas clases son la llovizna, la lluvia, la nieve y el granizo.

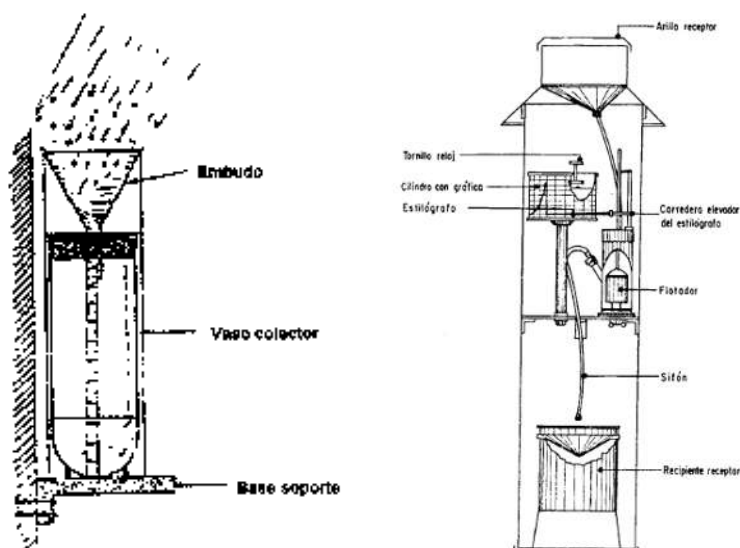
Para poder conocer cuanta precipitación cae sobre la superficie de la Tierra, se requieren aparatos destinados a medirla, los cuales son llamados “pluviómetros” (figura 5) y existen varios tipos.

Según el intervalo de tiempo que se considere hay:

- **Pluviómetros no registradores.** Registran la precipitación caída en un punto durante un intervalo de tiempo generalmente diario. Proporcionan el volumen total de agua precipitada pero no dan información sobre la distribución de la precipitación en el intervalo de tiempo considerado.

- **Pluviómetros registradores o pluviógrafos.** Proporcionan una gráfica llamada pluviograma, que es una curva continua de precipitación acumulada a lo largo del intervalo de tiempo que se considere. De un pluviograma puede obtenerse la siguiente información:
 - Volumen total de agua precipitada.
 - Hora de comienzo y fin de cada aguacero.
 - Intensidad máxima de precipitación (volumen máximo de agua caída en la unidad de tiempo). Coincide con la máxima pendiente del pluviograma.
 - Curvas de intensidad-duración-frecuencia, que se utilizan para el cálculo de periodos de retorno de duración de aguaceros de diferentes intensidades.
- **Pluviómetros totalizadores.** Son pluviómetros no registradores de gran capacidad que se instalan en lugares de difícil acceso, por ejemplo, en lugares que van a estar aislados por la nieve durante largos periodos de tiempo. Se les suele añadir un fundente, para evitar la congelación del agua recogida y facilitar la fusión de la nieve, y una pequeña cantidad de aceite, que al flotar por encima del agua recogida evita su evaporización.

Figura 5. Tipos de Pluviómetros.



a) no registrador.

b) registrador de sistema Hellmann.



Las medidas de precipitación, que han de referirse a un intervalo de tiempo concreto, suelen expresarse en unidades de altura de agua sobre una superficie plana horizontal, generalmente milímetros o centímetros, y más raramente en metros. Un milímetro es la altura que alcanza un litro de agua sobre una superficie de un metro cuadrado, por lo tanto, un milímetro de lluvia equivale a 1 L/m^2 .

Al ser la precipitación una variable discontinua en el espacio y en el tiempo, los valores medidos en una estación sólo son representativos para el punto de medida y su entorno. Es por esto por lo que para caracterizar la precipitación de una zona es necesario contar con una red de pluviómetros. La densidad de la red pluviométrica depende de la orografía. La Organización Meteorológica Mundial recomienda un pluviómetro cada 250 km^2 en zonas de topografía suave (Martínez et al., 2006).

3.6 Evapotranspiración

La precipitación una vez que llega al suelo tiene dos medios de continuidad dentro del ciclo hidrológico, por los escurrimientos o el ser retenida por el suelo y absorbida por las plantas, aquí se presenta otra variable de análisis, la evapotranspiración (EVT), la cual se forma por dos fenómenos:

La evaporación, la cual es el proceso donde el agua pasa de su estado líquido a un estado gaseoso producto la radiación solar y asciende hasta la atmósfera, esta evaporación resulta del agua que se almacena en lagos, presas o grandes depósitos y también la que es retenida por el suelo en su zona no saturada.

La transpiración, es el fenómeno biológico donde el agua es absorbida por las plantas y no la requieren para su crecimiento, entonces estas la pierden a través de sus hojas.

Resulta complicado medir ambas por separado, es por esto que se combinan y forman la evapotranspiración. El cálculo de la EVT está en función de factores que están ligados a la meteorología, la vegetación y al tipo de suelo.

Según Thornthwaite (1948) distingue entre evapotranspiración potencial (EVT_p) y evapotranspiración real (EVT_R). La primera es el volumen de agua que pasaría a la atmosfera



en forma de vapor como consecuencia de la evaporación directa y de la transpiración de las plantas en el supuesto caso de que siempre hubiese la cantidad de agua necesaria disponible a tales efectos. No depende por lo tanto del valor de la precipitación ni de la cantidad de agua contenida en el suelo a disposición de las plantas; la segunda es el volumen de agua que pasa a la atmósfera en forma de vapor como consecuencia de la evaporación directa y de la transpiración de las plantas en función del volumen de agua disponible, por lo tanto, se puede decir que la EVT_P siempre será mayor que la EVT_R (Martínez et al., 2006).

3.7 Esguerrimiento

El esguerrimiento se puede definir como la precipitación que circula por los cauces, ríos o por el subsuelo y que llega a una corriente para finalmente ser drenada en el punto de salida de la cuenca. Se clasifican en tres tipos de esguerrimiento: superficial, subsuperficial y subterráneo.

La precipitación que cae sobre el suelo y satura sus capas superiores se puede denominar como flujo superficial, este es el esguerrimiento que llega más rápido hasta la salida de la cuenca y sus volúmenes se pueden definir en función del tiempo como caudales instantáneos cuando su duración es mínima (cuestión de segundos) y se miden en metros cúbicos. Para intervalos de tiempos mayores (días, semanas o meses) se les puede llamar aportaciones y se expresan comúnmente en hectómetros cúbicos.

La parte del agua precipitada que se infiltra a las capas superiores del suelo y que esguerra de manera casi paralela al esguerrimiento superficial se le denomina esguerrimiento subsuperficial; la parte del agua que se infiltra hasta los niveles inferiores al manto freático se considera ya como esguerrimiento subterráneo y es el que llega más lento hasta la salida de la cuenca.

La medición del esguerrimiento superficial en México es mediante estaciones hidrométricas que se colocan en sitios adecuados para medir los gastos que están transitando por las corrientes. Se deben colocar en lugares que sean de fácil acceso en cualquier tiempo y bajo cualquier condición, especialmente durante fuertes avenidas, también, que tenga la capacidad de cubrir todo el rango de gastos que sean probables de ocurrir.



Una condicionante de las estaciones hidrométricas es que deben ser colocadas en una zona donde el flujo del escurrimiento sea estable que generalmente son en tramos rectos, de tal manera que las variaciones que tenga la curva elevaciones-gastos sean muy pequeñas.

En México existe una base de datos con la información de las estaciones hidrométricas que tiene el país llamada Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que está monitoreada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

3.8 Infiltración

Se puede definir como el proceso por el cual el agua penetra las capas del suelo, producto de la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares. En una primera etapa se deben saturar las capas superiores del suelo para que posteriormente ya saturadas pasen el nivel freático y puedan formar parte del agua subterránea.

La diferencia entre la cantidad de agua que se precipita y la que es drenada al punto de salida se le denomina pérdidas, estas están conformadas por los volúmenes de agua que se evapotranspiran, se infiltran, se retienen en charcos o depresiones y los que son interceptados por el follaje de las plantas o las construcciones. En la práctica es difícil separar estos factores, sin embargo, las pérdidas más significativas son por la infiltración, es por esto que se acostumbra a calcularlas de manera conjunta bajo el término ya mencionado de pérdidas.

En la práctica profesional la medición de la infiltración resulta complicada ya que no existen instrumentos que la puedan medir de manera adecuada y precisa debido a que el cambio entre el tipo de permeabilidad de los suelos varía de manera drástica, para esto se necesitaría limitarse a analizar áreas muy pequeñas.

La infiltración es afectada por varios factores, de los cuales los principales son la textura de suelo; el contenido de humedad inicial y de saturación; la cobertura vegetal; el uso y tipo de suelo; el aire atrapado; el lavado de material fino; la compactación; la temperatura, sus cambios y diferencias.



3.9 Balance hidrológico

Martínez et al. (2006) considera que, para efectos prácticos, la única fuente de agua en la naturaleza es la precipitación y debe de cumplirse para cualquier cuenca cerrada y para un intervalo de tiempo determinado, el principio de la masa (figura 6):

Figura 6. Balance hidrológico en una cuenca cerrada para un intervalo de tiempo determinado (*Ley de la Conservación de la Masa*).



Si las condiciones hídricas en la cuenca son las mismas al inicio y al final del intervalo de tiempo, la variación en el almacenamiento es cero y ha de cumplirse:

$$\text{PRECIPITACIÓN} = \text{ESCURRIMIENTO} + \text{EVAPOTRANSPIRACIÓN}$$

El término escurrimiento incluye, en ambos casos, tanto la superficial como la subterránea.

A la expresión de la figura 6 se le conoce con el nombre de balance hidrológico de una cuenca, y es fiel reflejo del principio de la conservación de la masa:

$$\text{ENTRADAS} - \text{SALIDAS} = \text{VARIACIÓN EN EL ALMACENAMIENTO}$$

La expresión puede complicarse si la cuenca no es cerrada, es decir, si hay intercambio de agua de manera natural o artificial con otras cuencas más o menos lejanas. Un aspecto que siempre ha de quedar claro a la hora de plantear un balance hidrológico es un lugar para el que se realiza y el intervalo de tiempo que se considera. El balance sólo es válido para esas condiciones de espacio y tiempo.



4. ZONA DE ESTUDIO

4.1 Caracterización de la zona de estudio

El Lago De Cuitzeo es uno de los lagos más antiguos (4 a 6 millones de años) y es el segundo cuerpo de agua más grande en toda la República Mexicana y uno de los más importantes debido a su superficie que abarca alrededor de 300 a 400 kilómetros cuadrados que varía en función de la temporada del año, así como su profundidad promedio.

Es un factor importante para la región de la ribera del lago ya que ayuda a regular el clima, además de que es sustento y hábitat de diferentes especies acuáticas y de aves. Forma parte de la red de reservas para aves playeras como sitio de categoría regional. Aporta de manera considerable al desarrollo económico de las comunidades vecinas al lago ya que las principales actividades que realizan son la pesca del charal (*Chirostoma spp.*), la carpa (*Cyprinus carpio*), chegua (*Alloophorus robustus*, *Xenotoca variata*, *Skiffia bilineata*), tilapias (*Oreochromis spp.*), mosco (*Ephydra spp.*) y ranas (*Rana spp.*) (Diario oficial de la nación, 2004).

A través de los años se han construido obras de infraestructura para almacenamiento y obras civiles que han afectado de manera considerable los patrones de flujo que mantenía el Lago, tales como los escurrimientos (ríos, arroyos, cauces), el flujo y la uniformidad en el arrastre de sedimentos, esto aunado al cambio climático han provocado un desorden hidrológico en toda la cuenca.

Existe una problemática que es resultado de este desorden hidrológico, la cual es que en Lago se produce por periodos intermitentes y de duración variable, sequias que han venido afectando su superficie y que de seguir sucediendo tendrá como resultado la lenta extinción del lago hasta perder todo su recurso hídrico superficial.

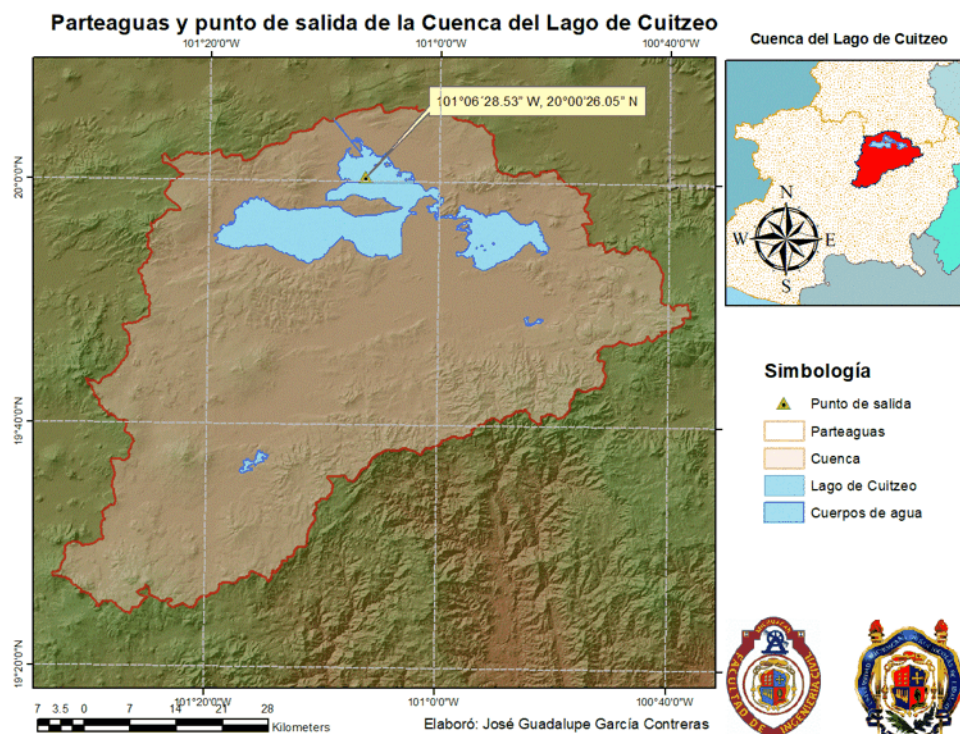
Actualmente existen líneas de investigación en diferentes áreas en las que se están analizando posibles soluciones a largo plazo para el rescate y conservación del lago, sin embargo, se requiere que se trabaje en conjunto investigadores, gobierno y sociedad civil para llevar a cabo cualquier plan o actividad que sea benéfica para la zona.

4.2 Localización

El lago de Cuitzeo está ubicado en la parte norte de Michoacán y en una pequeña fracción en el estado de Guanajuato, se localiza entre los paralelos $19^{\circ}53'15''$ y $20^{\circ}04'30''$ de latitud norte y los meridianos $100^{\circ}50'20''$ y $101^{\circ}19'30''$ de longitud oeste, a una altitud aproximada de 1,830 msnm.

La Cuenca del Lago de Cuitzeo (figura 7 y 8) abarca una superficie de 4000 km² aproximadamente y es de tipo endorreico, lo cual significa que sus únicas salidas son por medio de evaporación o infiltración hacia el subsuelo. Pertenecce a la Región Hidrológica 12 (RH-12) Lerma-Santiago (figura 9) y a la subregión hidrológica Alto-Lerma (figura 10). Su punto de salida está ubicado dentro del Lago de Cuitzeo donde se acumula el drenaje superficial.

Figura 7. Cuenca del Lago de Cuitzeo.





Evaluación de los recursos hídricos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo

Figura 8. Macro y microlocalización de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

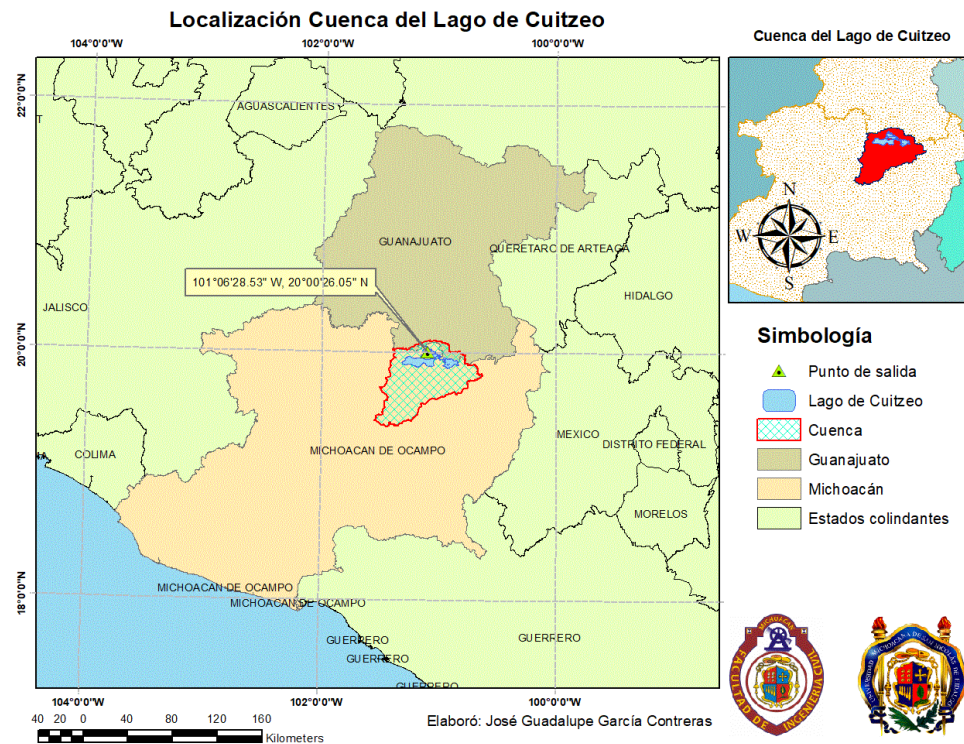
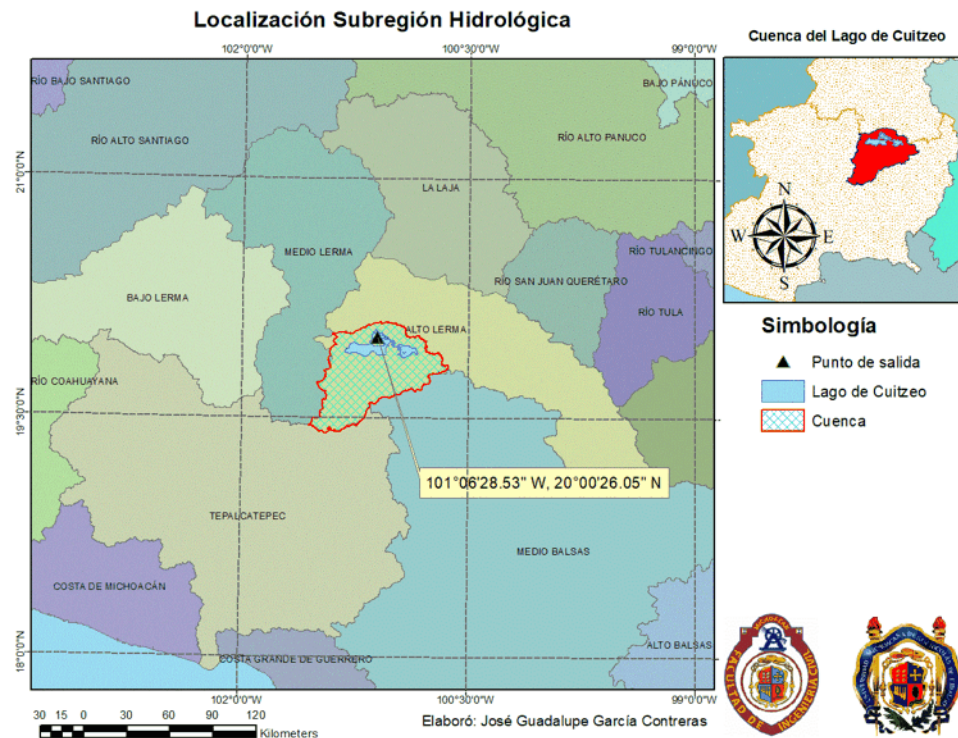


Figura 9. Ubicación en Región Hidrológica.





Figura 10. Ubicación en Subregión Hidrológica.



La Cuenca del Lago de Cuitzeo abarca 23 municipios (figura 11) en el estado de Michoacán y 5 en el estado de Guanajuato, los cuales se muestran a continuación en la siguiente tabla:

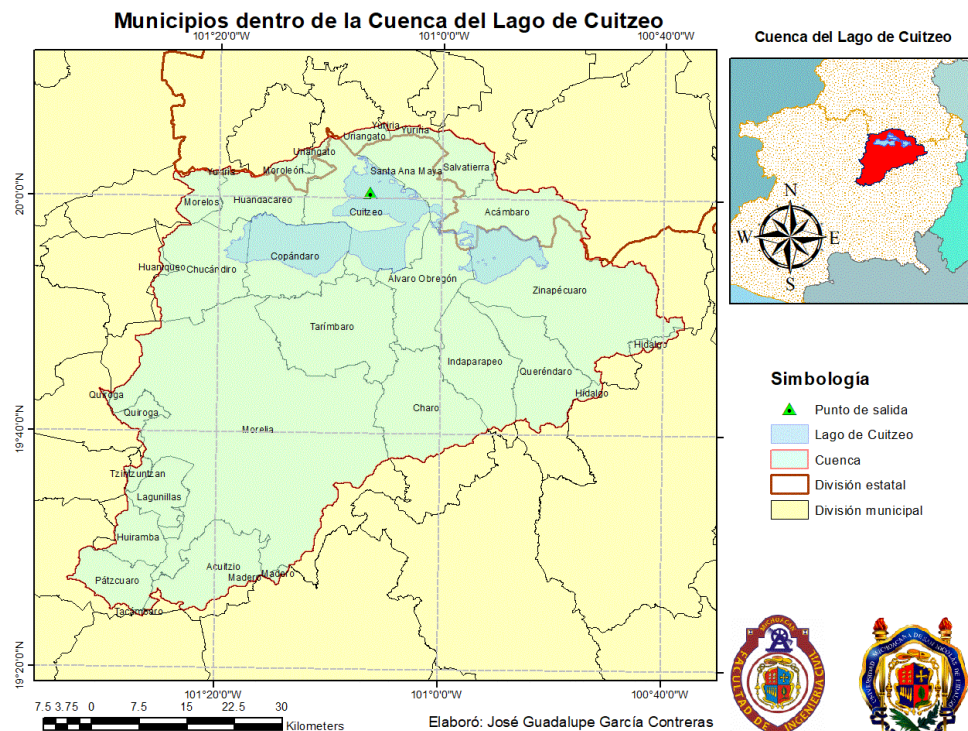
Tabla 2. Municipios que abarca la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Entidad	Clave Municipio	Nombre Municipio	Área (Km ²)	% de área de la Cuenca
Mich.	082	Tacámbaro	1.09	0.03
Mich.	049	Madero	5.01	0.13
Mich.	001	Acuitzio	142.86	3.59
Mich.	039	Huiramba	62.22	1.57
Mich.	066	Pátzcuaro	81.27	2.04
Mich.	048	Lagunillas	72.19	1.82
Mich.	100	Tzintzuntzan	13.41	0.34
Mich.	073	Quiroga	27.14	0.68
Mich.	022	Charo	203.37	5.12
Mich.	072	Queréndaro	162.96	4.10



Entidad	Clave Municipio	Nombre Municipio	Área (Km ²)	% de área de la Cuenca
Mich.	053	Morelia	1055.26	26.55
Mich.	034	Hidalgo	19.69	0.50
Mich.	040	Indaparapeo	167.43	4.21
Mich.	088	Tarímbaro	254.15	6.39
Mich.	110	Zinapécuaro	423.80	10.66
Mich.	037	Huaniqueo	5.48	0.14
Mich.	003	Álvaro Obregón	158.42	3.99
Mich.	027	Chucándiro	179.29	4.51
Mich.	018	Copándaro	172.07	4.33
Mich.	036	Huandacareo	94.33	2.37
Mich.	054	Morelos	43.31	1.09
Mich.	020	Cuitzeo	251.63	6.33
Mich.	078	Santa Ana Maya	103.34	2.60
Gto.	041	Uriangato	27.64	0.70
Gto.	028	Salvatierra	61.91	1.56
Gto.	046	Yuriria	13.19	0.33
Gto.	002	Acámbaro	142.38	3.58
Gto.	021	Moroleón	29.99	0.75

Figura 11. Municipios abarcados por la Cuenca.



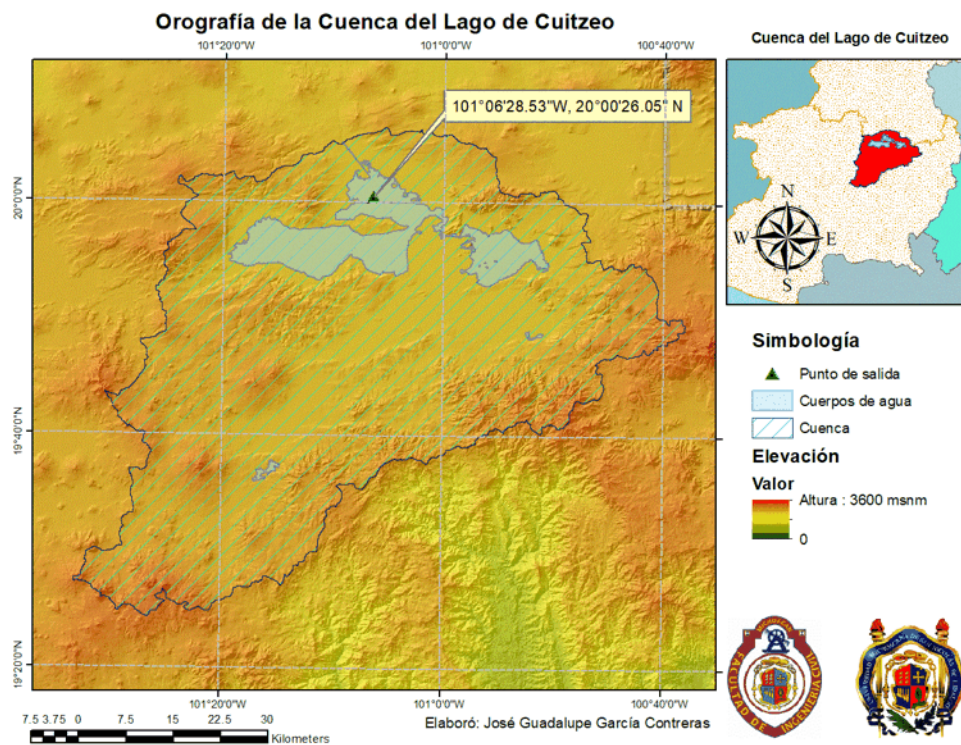
4.3 Orografía

La zona de estudio forma parte de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, el cual abarca el 45.74% del territorio estatal, por lo que su relieve es muy accidentado (figura 12).

El lago está rodeado de montañas con una elevación regular las principales son: cerro de Tarimoro, Chambécuaro, Yutatiro, La Piedra Negra y Cerro de San Agustín del Pulque, la de mayor altura es llamada Cerro de Manuna, del cual una parte de este cerro penetró en el lago y forma una especie de península.

Dentro de la cuenca podemos observar que se encuentran diversas montañas que forman la sierra de Oztumatlán de los cuales destacan el Cerro de "El Zacatón" (2960 msnm), el cerro "Zurumutal" (2840 msnm), el cerro "Peña Blanca" (2760 msnm) y el "Punhuato" (2320 msnm), que marca el límite oriental de la ciudad de Morelia, así como el cerro "Azul" (2625 msnm) y el cerro "Verde" (2600 msnm) y el Pico del "Quinceo" (2787 msnm).

Figura 12. Orografía de la zona de estudio.

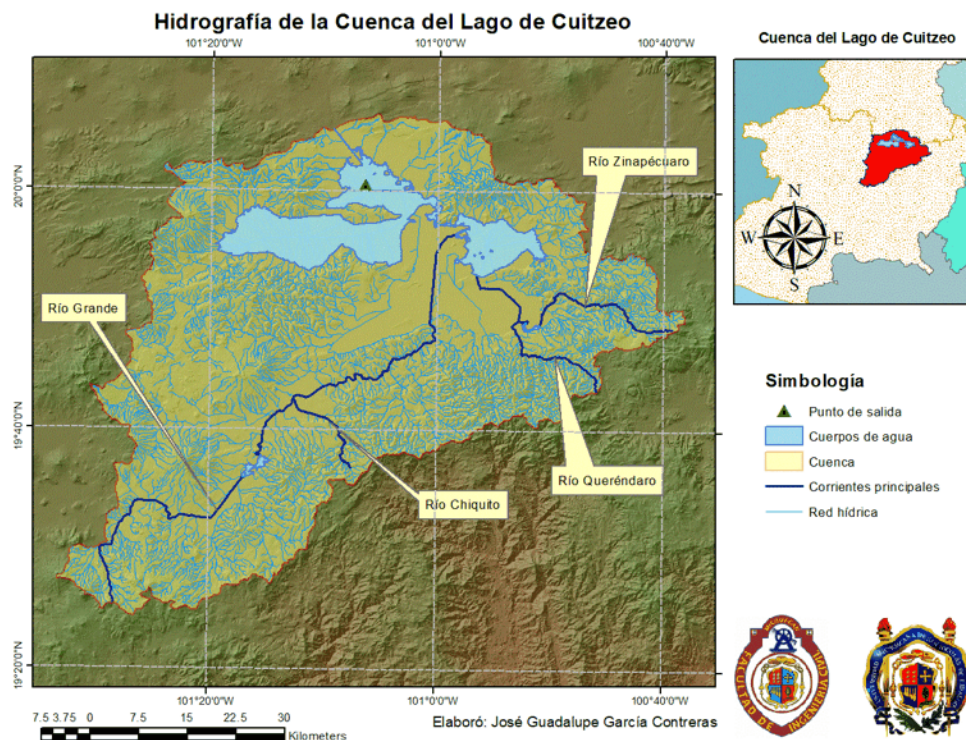


4.4 Hidrografía

La Cuenca del Lago de Cuitzeo es alimentada principalmente por los afluentes permanentes (figura 13) que son el Río Grande de Morelia que es el más importante de la zona, escurre de SW a NE hasta justo antes de la zona de riego agrícola donde se rectifica para convertirse en un canal destinado al riego; al cual se le une el Río Chiquito de Morelia, el mismo en la estación El Plan se divide en dos el Viejo y el Rectificado, el arroyo San Marcos de Chiquimitío se une al río Viejo de Morelia por el lado oeste después de cruzar el valle de Tarímbaro, en tanto que el río Queréndaro primero da origen a la presa de Malpaís y después desemboca en el lago por la parte sur al igual que el río Zinapécuaro (García, 2011). Cuitzeo además cuenta con las aportaciones de gran cantidad de ríos y arroyos de efímeros y al menos 30 fuentes termales que se localizan en lomeríos de la parte baja de la cuenca del lago (Bocco, 2012).

Además del Lago de Cuitzeo se pueden observar otros cuerpos de agua como lo son las presas de Cointzio, Malpaís; la laguna de Queréndaro y algunos manantiales que se forman eventualmente cuando se presentan grandes avenidas.

Figura 13. Red hidrográfica de la zona de estudio.

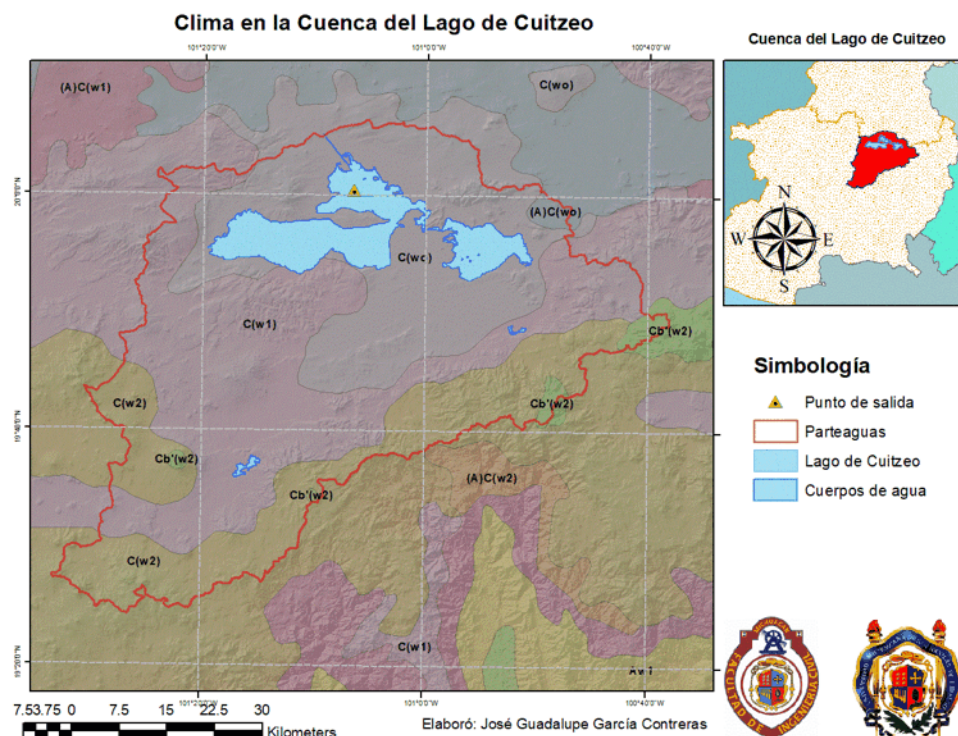


4.5 Clima

El clima general de la cuenca es templado con lluvias en verano (Cb), donde su régimen de lluvias se caracteriza por presentar diez veces más lluvia en el mes húmedo (julio), de la mitad caliente del año que en el mes más seco (febrero); la temperatura media de un mes por lo menos, desciende por debajo de los 18° C, el régimen térmico indica que la temperatura media de cuatro meses o más es superior a 10° C (w) y la temperatura media del mes más cálido inferior a 22° C y el verano es templado, su rango de oscilación entre 5 y 7° C, respectivamente (Allende y Mendoza, 2007).

De acuerdo con los datos de los climogramas, todas las estaciones registran las temperaturas más altas durante los meses de abril, mayo y junio (20 a 22° C); mientras que las precipitaciones se concentran en julio y agosto.

Figura 14. Clima presente en la zona de estudio.



Abreviaturas:

*C(w0) = Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura mes más frío entre 3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.



Evaluación de los recursos hídricos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo

**C(w2) = Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.*

**Cb(w2) = Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C.*

**C(w1) = Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.*

**(A)C(wo) = Semicálido, subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.*

4.6 Edafología

La edafología de la zona de estudio (figura 15) se muestra en la siguiente tabla con los porcentajes respectivos a cada descripción de suelo, presentándose el suelo vertisol pélico como suelo dominante con un 35.03% y siendo el menor suelo presente un regosol eútrico.

Figura 15. Edafología de la zona de estudio.

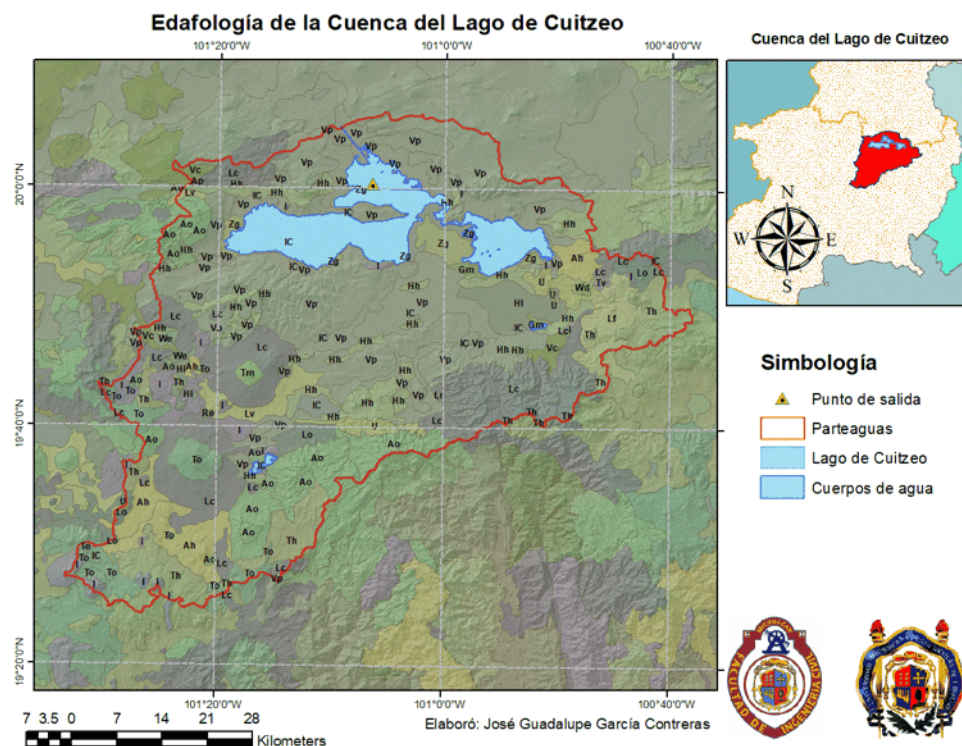




Tabla 3. Porcentajes de las áreas de los suelos presentes en la zona de estudio.

CLAVE	DESCRIPCIÓN	ÁREA (m ²)	% DE ÁREA
Vp	VERTISOL PELICO	1322.79	35.0314
Lc	LUVISOL CROMICO	602.49	15.9557
IC	CUERPOS DE AGUA	342.63	3.0546
Ao	ACRISOL ORTICO	296.76	7.8592
Th	ANDOSOL HUMICO	265.48	7.0306
Hh	FEOZEM HAPLICO	246.23	6.5210
Ah	ACRISOL HUMICO	171.94	4.5535
To	ANDOSOL OCRICO	121.66	3.2219
I	LITOSOL	119.84	3.1737
HI	FEOZEM LUVICO	88.29	2.3382
Zg	SOLOCHAK GLEICO	86.10	2.2802
Lf	LUVISOL FERRICO	81.11	2.1481
U	RANKER	62.65	1.6590
Lv	LUVISOL VERTICO	58.13	1.5394
Lo	LUVISOL ORTICO	54.52	1.4438
Vc	VERTISOL CROMICO	34.27	0.9074
Gm	GLEYSOL MOLICO	13.90	0.3680
Tm	ANDOSOL MOLICO	11.17	0.2959
We	PLANOSOL EUTRICO	9.64	0.2553
Wd	PLANOSOL DISTRICO	6.54	0.1731
Tv	ANDOSOL VITRICO	3.35	0.0886
Ap	ACRISOL PLINTICO	2.06	0.0545
Re	REGOSOL EUTRICO	1.77	0.0469
TOTAL =		4003.30	100

4.7 Uso de suelo

El uso de suelo de la zona de estudio (figura 16) se muestra en la siguiente tabla con los porcentajes respectivos a cada descripción de uso de suelo, presentándose en su mayoría un uso de suelo agrícola de temporal anual con un 23.30% y siendo el menos presente un agrícola de temporal anual y permanente con un 0.0002%.



Figura 16. Uso de suelo de la zona de estudio.

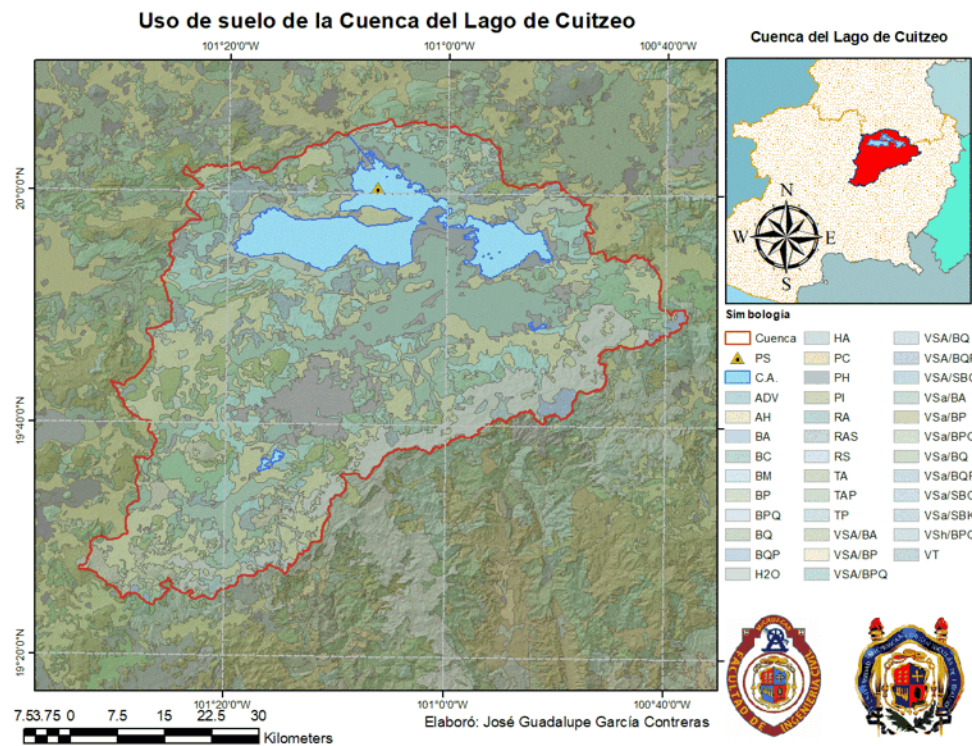




Tabla 4. Porcentajes de las áreas de los suelos presentes en la zona de estudio.

CLAVE	DESCRIPCIÓN	ÁREA (m²)	% DE ÁREA
TA	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	932.95	23.3045
RA	AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	400.64	10.0077
VSa/SBC	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	368.67	9.2091
PI	PASTIZAL INDUCIDO	347.20	8.6729
H2O	AGUA	338.12	8.4459
BP	BOSQUE DE PINO	306.81	7.6638
AH	URBANO CONSTRUIDO	239.01	5.9704
BQ	BOSQUE DE ENCINO	166.92	4.1697
VSa/BQ	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	160.72	4.0148
VSA/SBC	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	129.35	3.2311
VSa/BPQ	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	99.22	2.4785
RAS	AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	94.60	2.3629
BPQ	BOSQUE DE PINO-ENCINO	94.16	2.3522
VT	TULAR	67.16	1.6776
HA	AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL	58.19	1.4534
BA	BOSQUE DE OYAMEL	32.73	0.8177
BC	BOSQUE CULTIVADO	32.08	0.8013
BQP	BOSQUE DE ENCINO-PINO	31.38	0.7838
PH	PASTIZAL HALÓFILO	24.64	0.6154
VSa/BQP	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	18.60	0.4647
TP	AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE	17.79	0.4445
BM	BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	11.34	0.2833
RS	AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE	10.25	0.2560
VSA/BA	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE OYAMEL	5.35	0.1337
VSa/BP	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO	4.66	0.1163
VSa/BA	VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE OYAMEL	4.62	0.1154
PC	PASTIZAL CULTIVADO	2.68	0.0669
VSA/BQP	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	1.05	0.0262
ADV	ÁREA DESPROVISTA DE VEGETACIÓN	0.94	0.0234
VSa/SBK	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA	0.82	0.0204
VSh/BPQ	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	0.64	0.0160
TAP	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	0.01	0.0002
TOTAL =		4003.30	100

4.8 Geología

El paisaje de la Cuenca de Cuitzeo forma parte de un conjunto de depresiones lacustres que se encuentran a lo largo de una franja E–W del centro de México y que están infrayacidas por la sucesión oligomiocénica de Mil Cumbres, y cubiertas por el vulcanismo de la Faja Volcánica Mexicana (FVM). En la cuenca se observan lomas alargadas que forman parte de un sistema regional de fallas E–W potencialmente sísmicas. Las lomas presentan un



hundimiento hacia el norte y un basculamiento de 5° a 30° hacia el sur, con saltos de falla de más de 200 m en la zona sur de la ciudad de Morelia (Falla La Paloma).

Estructuralmente, la Falla de Tzitzio – Valle de Santiago es importante, ya que en ella se observa un desplazamiento lateral derecho en el lago en los sectores oriente y poniente. Al este conforma un graben tendiente a simétrico, mientras que al oeste conforma un semigraben con bloques basculados hacia el sur.

Las secuencias más antiguas conforman rocas andesíticas muy fracturadas, correspondientes al vulcanismo del Complejo de Mil Cumbres de edad oligomiocénica, en que se observan estratovolcanes y calderas de composición andesítica, dacítica y riolítica, como la denominada "cantera de Morelia". Estas rocas se encuentran sobreyacidas por flujos piroclásticos color rosa (al norte de Morelia, en Tarímbaro–Copándaro, Álvaro Obregón, y en Peña del Panal). Éstos, a su vez, son cubiertos por secuencias de terrígenos de origen lacustre o fluviolacustre pertenecientes al Mioceno–Pleistoceno. El vulcanismo corona esta secuencia con una emisión de pómez que termina con el antiguo lago de Cuitzeo. Los afloramientos de flujos piroclásticos mal consolidados, con depósitos aluviales, son comunes en los tiraderos de Álvaro Obregón, Téjaro, Cuitzeo y Santa Ana Maya.

Hacia el oeste y norte del Lago de Cuitzeo y hacia el oeste de Morelia aflora el vulcanismo de la FVM. Destacan los volcanes en semi-escudo de El Águila y Quinceo–Las Tetillas, los cuales están conformados por un ciclo eruptivo compuesto por alternancias de productos efusivos y explosivos. Sus bases van más allá de una decena de kilómetros y sus pendientes son muy suaves. Sobre el edificio descansan conos parásitos andesítico–basálticos de tipo estromboliano (Israde et al., 2008).



5. MATERIALES

Para llevar a cabo el presente estudio se recurrió a bases de datos climatológicos, geográficos e hidrométricos con un registro histórico de 25 años, además de softwares para su adecuado manejo y así lograr la elaboración de modelos de evaluación y gestión de los recursos hídricos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

5.1 Bases de datos

Se llama base de datos, o también banco de datos, a un conjunto de información perteneciente a un mismo contexto, ordenada de modo sistemático para su posterior recuperación, análisis y/o transmisión. Existen actualmente muchas formas de bases de datos, que van desde una biblioteca hasta los vastos conjuntos de datos que puede recopilar un sistema de informático en un país o en el mundo (Raffino, 2021).

En este estudio se requieren datos con información climatológica, geográfica e hidrométrica de la zona de estudio, los cuales son capturados por organismos de gobierno y son facilitados en sus respectivas plataformas.

Los organismos de gobierno en México que contienen esta información son el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) con su plataforma CLICOM y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) con su plataforma del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).

5.1.1 Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)

Es un organismo público autónomo responsable de normar y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, así como de captar y difundir información de México en cuanto al territorio, los recursos, la población y economía, que permita dar a conocer las características de nuestro país y ayudar a la toma de decisiones (INEGI, 2021).



En su plataforma podemos encontrar información sobre la tasa de población del país, así como de sus actividades económicas además de mapas de topografía, relieve continental y marino, recursos naturales, geodesia, entre otros.

Para la modelación geográfica de este estudio se requiere la descarga de mapas de relieve continental e insular permiten representar de manera simplificada las formas que adquiere o tiene la corteza terrestre en su parte superficial como son las montañas, mesetas, valles, planicies, depresiones, terrazas, mesetas, entre las principales, con el fin de modelar los espacios geográficos para conocer aspectos tales como alturas, pendientes, secciones, desniveles, áreas sujetas a inundación, delimitación de cuencas, entre otros. Estos datos del relieve se generan con el fin de coadyuvar al desarrollo de México y a la generación del conocimiento y estudio de las formas del terreno como un factor determinante en las condiciones físico ambientales, recursos naturales, diseño de infraestructura y, en su caso, atender emergencias o catástrofes originadas por desastres naturales.

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía, en su componente geográfico del Subsistema Nacional de Información Geográfica y del Medio Ambiente, genera entre otros, datos topográficos del relieve continental e insular para conformar la Infraestructura de Datos Espaciales de México.

En el INEGI se produce la Cubierta de Altimetría a partir del uso de Modelos Digitales de Elevación de tipo Terreno, que se traducen en la generación de archivos vectoriales de curvas de nivel y puntos acotados en formato cartográfico en escala 1:20 000. Está cubierta de altimetría compone el relieve del terreno continental y es ensamblada a los datos topográficos extraídos digitalmente a través de las ortoimágenes para integrar la cartografía topográfica.

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son los que se utilizan para poder hacer la delimitación de la zona de estudio ya que nos indican las cotas del terreno. Los MDE son la estructura numérica de los valores de altura de las formas del relieve terrestre con respecto a un nivel de referencia o nivel medio del mar en la cual también se incluyen los valores de los objetos presentes sobre el relieve como pueden ser los referentes a la vegetación, edificaciones e infraestructura.



En general, los modelos digitales de superficie interesan para conocer aspectos del relieve tales como: la elevación de cualquier punto, la pendiente, los desniveles, las áreas factibles de inundación, los puntos de visión, cálculos de volúmenes de tierra, estudios de cuencas y subcuencas, entre otros, por lo que se convierten en una fuente de información de gran utilidad en estudios del medio ambiente, como, hidrológicos, de agricultura, forestales, de energía, de zonas de riesgo, de telecomunicaciones, de infraestructura, entre los más importantes.

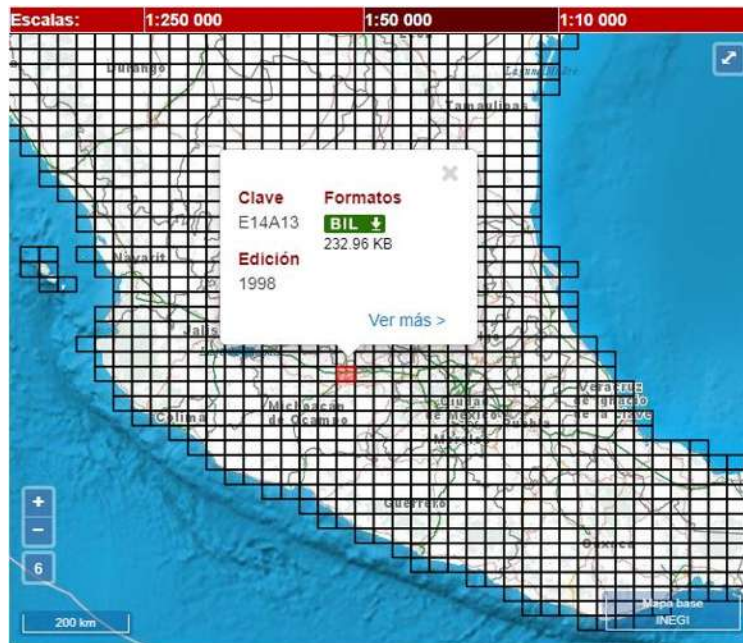
Estos modelos pueden visualizarse y procesarse en aplicaciones informáticas tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el uso de los modelos digitales de elevación, junto con otros datos, permiten el modelado y la creación de escenarios en tres dimensiones que facilitan la toma de decisiones fundamentadas.

Son archivos de mapa bits raster, en formato digital de intercambio. En este modelo de información, el espacio queda dividido en una rejilla con forma regular en la que cada celda asume valores para la variable que representa la elevación (figura 17). Este tipo de archivo fue seleccionado por su versatilidad de exportación a otros formatos y permite su total incorporación a formatos CAD, y ofrece un amplio potencial para manejar grandes bases de datos por su reducido peso en bytes.

Se necesita un equipo de cómputo personal con características de alta eficiencia y rendimiento para el uso y despliegue de información digital, así como capacidad de almacenamiento, compatible con aplicaciones informáticas especializadas. Estos modelos pueden visualizarse y procesarse en aplicaciones informáticas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El uso de los modelos digitales de elevación junto con otros datos permite el modelado y la creación de escenarios en tres dimensiones.

Se manejan diferentes escalas para los MDE dependiendo de la dimensión de la superficie a estudiar, van desde la escala 1:10 000 hasta la escala 1:250 000, considerando que a mayor escala es menor la cantidad de información en pixeles del relieve del terreno. En el caso del presente estudio se utilizaron 33 Modelos Digitales de Elevación a escala 1:50 000 (figura 17).

Figura 17. *Rejilla de los MDE en escala 1:50 000.*



5.1.1.1 Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrológicas (SIATL).

Es una aplicación web geoespacial que se accede a través del apartado Geográfico en el portal de internet del Instituto Nacional de Estadística y Geografía diseñada para el estudio de cuencas y cálculo de caudales en ríos y arroyos, que integra diversas capas de información y funciones que facilitan la diseminación del conocimiento del territorio, en apoyo al desarrollo sustentable de México (SIATL, 2021).

Fue desarrollado para facilitar el estudio del comportamiento del recurso hídrico superficial en las cuencas de México, orientado a la simulación con métodos de redes geométricas y funciones para análisis hidrológico.

Se llama SIATL por las siglas SI-Simulador y ATL-Agua en Náhuatl y es un servicio para los investigadores y estudiosos de cuencas hidrológicas, como apoyo a las diversas aristas en las que se estudia el agua como la sustentabilidad del agua, contaminación, generación de energía eléctrica, captación y distribución, actividades agrícolas y forestales, protección civil, ordenamiento territorial, entre otras.



5.1.2 Sistema CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLImate COMputing project. Las observaciones son diarias del CLICOM representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM. Cada una de las diferentes estaciones del país contiene diferentes periodos de información, pero se pueden encontrar datos de 1920 a 2012.

El propósito de esta plataforma es dar a conocer una herramienta web que se desarrolló en CICESE para procesar y visualizar los datos diarios del CLICOM en su formato original de estaciones puntuales (CLICOM Estaciones) y en un formato de malla (CLICOM en Malla).

La plataforma de CLICOM clasifica la información de las estaciones climatológicas en mayores y menores a 25 años de datos efectivos, esto es a que existen estaciones antiguas con gran cantidad de información y otras que son más recientes con una menor cantidad de datos, para este estudio se utilizaron estaciones con ambos registros.

La herramienta CLICOM Estaciones permite hacer gráficas (ciclo anual y series de tiempo de temperaturas, precipitación, evaporación y unidades de calor) y descargarlas, así como los datos de las gráficas en texto.

5.1.3 Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS-CONAGUA)

El manejo digital de la información hidrométrica es de suma importancia para la gestión del recurso hídrico del país. Por ello, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha venido actualizando el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. En esta red se registra el nivel de agua (escalas) y la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en los principales ríos de la República Mexicana.

Cuenta con los datos de 2,070 estaciones hidrométricas, las cuales son el resultado de una depuración al catálogo BANDAS hecho en 2008 por la CONAGUA y el IMTA.



Aproximadamente 480 estaciones fueron actualizadas hasta el año 2006 y tiene registradas aproximadamente 180 presas.

Entre la información del BANDAS que han integrado la Subdirección General Técnica y la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos de la CONAGUA, se puede encontrar para cada estación hidrométrica:

- Valores diarios: Gasto medio diario (m^3/s) día 1 a día 29-31.
- Valores mensuales: Se incluyen la hora y el día del gasto máximo y el gasto mínimo (m^3/s). Además de la lectura de volumen máximo y medio de escurrimientos (miles de m^3), sedimentos (miles de m^3) y la lectura del día y hora de las escalas para el gasto mínimo, medio y máximo.
- Valores anuales: Menciona el mes, día y hora en que ocurre el gasto máximo y gasto mínimo (m^3/s). La lectura de escala para el gasto máximo y mínimo (m), además del volumen anual de escurrimientos (miles de m^3), gasto medio anual (m^3/s) y volumen anual de sedimentos (miles de m^3).
- Hidrograma: Incluye la fecha en que ocurre el gasto, Hora en que ocurre el gasto y Gasto instantáneo (m^3/s).
- Limnigrama: Muestra la fecha de lectura, hora de lectura y lectura de escala (m).
- Sedimentos: Se incluye la fecha de lectura, hora de lectura y porcentaje de sedimento.

5.2 Softwares de análisis de datos.

5.2.1 *GESTAD (GESTion de STADística de datos Climatológicos).*

GESTAD es un software desarrollado por la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos (MIRH) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) para facilitar el análisis, validación, selección y llenado de datos de precipitación históricos obtenidos de estaciones climatológicas descargadas de la plataforma CLICOM en formato Mat. GESTAD tiene como base el programa Matlab, pero es ejecutable en cualquier



computadora que cuente con sistema operativo Windows sin necesidad de tener instalado Matlab.

El software se divide en varios módulos los cuales son:

- Cargado de datos.
- Criterios de discriminación de datos.
- Análisis y validación de datos.
- Selección de estaciones principales.
- Llenado de datos faltantes.
- Validación de datos post-llenado.

GESTAD es una herramienta que nos permite un manejo más sencillo y rápido de los datos de precipitación, integra procesos de validación que permiten reducir la incertidumbre en la medida de lo posible los datos ingresados.

A los datos de entrada en GESTAD se les realizan pruebas estadísticas de Homogeneidad, Tendencia y Persistencia en el módulo de criterios de discriminación para posteriormente ser seleccionados y empleados para que describan una serie de precipitaciones históricas confiable.

5.2.2 JMP Statistical Discovery.TM From SAS.

JMP (pronunciado jump) es una herramienta potente e interactiva de visualización de datos y análisis estadísticos. En la plataforma de JMP se puede aprender más acerca de los datos ingresados realizando análisis e interactuando con los datos mediante tablas de datos, gráficos, diagramas e informes.

Este software fue creado en 1989 por la empresa multinacional SAS Institute, la cual se dedica a la analítica, inteligencia artificial y gestión de datos.

JMP permite a los investigadores crear una amplia variedad de análisis estadísticos y modelizaciones. También resulta útil para los analistas de negocio que deseen descubrir rápidamente tendencias y patrones presentes en datos. Con JMP no es necesario ser un experto en estadística para obtener información a partir de datos (SAS Institute, 2021).



El software JMP se puede utilizar para:

- Crear diagramas y gráficos interactivos para explorar datos y descubrir relaciones.
- Descubrir patrones de variación con múltiples variables a la vez.
- Explorar y resumir grandes cantidades de datos.
- Desarrollar modelos estadísticos potentes para predecir el futuro.

5.3 Software de Modelación Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es un conjunto de herramientas compuestos por hardware, software, datos y usuarios, que permite capturar, almacenar, administrar y analizar información digital, así como realizar gráficos y mapas, y representar datos alfanuméricos (López, 2015), esto es, poder crear, aplicar y compartir información útil basada en datos geográficos y mapas.

Una modelación geográfica nos permite almacenar, recuperar, analizar, modelar y representar amplias extensiones de terreno con enormes volúmenes de datos espaciales y lo hace a través de una serie de mapas de la misma porción de territorio donde la localización de un punto tiene las mismas coordenadas en todos los mapas incluidos en el sistema. De esta forma, es posible analizar sus características temáticas y espaciales para obtener un mejor conocimiento de la zona.

5.3.1 *ArcGIS*

ArcGIS Desktop (ArcGIS) es el principal componente de la suite de aplicaciones ArcGIS de ESRI (Environmental Systems Research Institute), y el software que contiene las funcionalidades clásicas del SIG de escritorio. ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica., y que cuenta con una arquitectura extensible mediante la que pueden añadirse nuevas funcionalidades (Olaya, 2012).

Los mapas constituyen una forma muy efectiva de organizar, comprender y proporcionar grandes cantidades de información de un modo comprensible universalmente.



ArcGIS permite crear una amplia variedad de mapas, entre ellos, mapas Web accesibles en navegadores y dispositivos móviles, diseños de mapa impresos de gran formato, mapas incluidos en informes y presentaciones, libros de mapa, atlas, mapas integrados en aplicaciones, etc. Independientemente de cómo se publica, un mapa de ArcGIS es un mapa inteligente que muestra, integra y sintetiza completas capas de información geográfica y descriptiva de diversas fuentes.

ArcGIS permite:

- Crear, compartir y utilizar mapas inteligentes.
- Compilar información geográfica.
- Crear y administrar bases de datos geográficas.
- Resolver problemas con el análisis espacial.
- Crear aplicaciones basadas en mapas.
- Dar a conocer y compartir información mediante la geografía y la visualización.

ArcGIS permite sintetizar datos de diversas fuentes en una misma vista geográfica unificada. Estas fuentes de datos incluyen información de bases de datos geográficas, datos tabulares de sistemas de administración de bases de datos (DBMS) y otros sistemas empresariales, archivos, hojas de cálculo, vídeos y fotos con geoetiquetas, KML, CAD Data, fuentes en directo de sensores, imágenes aéreas y de satélite, etc. De hecho, cualquier registro de información con una referencia geográfica, como una dirección de calle, el nombre de una ciudad, un identificador de parcela de tierra, coordenadas GPS, etc., puede localizarse y estar disponible en un mapa. También se pueden incluir datos geográficos fidedignos proporcionados por ESRI, proveedores de datos y miles de agencias y organizaciones de SIG de todo el mundo (ESRI, 2021).

5.4 Softwares de Modelación Matemática en la Gestión de los Recursos Hídricos

La modelación hidrológica se define como la descripción matemática de la respuesta de una cuenca ante la ocurrencia de una serie de eventos de precipitación. Estos modelos



permiten la generación de hidrogramas en sitios en que no hay estaciones fluviográficas (Viessman, Knapp y Lewis, 1989).

Tradicionalmente, los modelos hidrológicos se agrupan en modelos basados en procesos físicos y modelos conceptuales (Bergström, 1991). Los modelos conceptuales son aquellos que manifiestan el entendimiento de un proceso; este modelo puede ser representado por un modelo matemático o físico. Los modelos físicos describen el sistema natural con base en la elaboración de un prototipo, que puede tener una representación matemática utilizando las leyes de conservación de masa, momento y varias formas de energía. Desde el punto de vista matemático, los modelos pueden ser empíricos y teóricos, y con solución analógica o numérica. Si las variables presentan un comportamiento aleatorio o no, pueden ser clasificados como estocásticos o determinísticos (Brooks, 1992).

En los modelos determinísticos, las variables son determinadas mediante leyes de la física, las cuales se pueden considerar como exactas; por otro lado, en los modelos probabilísticos, las variables se determinan por las leyes del azar, por lo que son modelos caracterizados en términos de probabilidad. Los modelos probabilísticos son de dos tipos: (1) estadísticos, y (2) estocásticos. Los modelos estadísticos tratan con ejemplos observados, mientras que los modelos estocásticos con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales, por ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas de tamaño medio. El desarrollo de modelos estadísticos requiere invariablemente el uso de datos; los modelos estocásticos enfatizan sobre las características estocásticas de los procesos hidrológicos (Singh, 1995).

La gestión de los sistemas hídricos puede llegar a ser extremadamente compleja, sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto, pueden representarse en forma simplificada mediante el uso de simulaciones matemáticas. El objetivo de estas simulaciones es estudiar la operación de los sistemas y predecir sus respuestas o salidas a un determinado impulso ingresado en el mismo. Un modelo de un sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas medibles y su estructura es un conjunto de ecuaciones (en el caso de un modelo matemático) que conectan las entradas y las salidas (Pardo, 2016).



Existen muchos paquetes informáticos específicos para la modelación de sistemas de recursos hídricos. Estas herramientas de modelación pueden clasificarse en función de diferentes criterios como pueden ser: programas para optimizar o simular, redes de flujo u otro tipo de programación matemática, programas específicos o herramientas para la modelación de cualquier sistema, programas o sistemas de soporte a la decisión. A continuación, se muestran los empleados en el presente estudio:

AQUATOOL es un sistema de soporte a la decisión para la modelación de sistemas de recursos hídricos en diferentes aspectos como son la optimización, simulación, aguas subterráneas, calidad de aguas, etc. Todos los módulos están gestionados mediante una única interfaz con capacidades gráficas que permiten crear, editar y visualizar resultados de los modelos de una forma sencilla y amigable. Los módulos principales son los modelos de simulación y optimización de sistemas de recursos hídricos. En el entorno de AQUATOOL existen los modelos EVALIS, OPTIGES, AQUIVAL y SIMGES.

5.4.1 El modelo EVALHID

El modelo EVALHID (EVALuación de los recursos HÍDricos) permite el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía (MPE) en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semidistribuida. Este programa está integrado dentro del Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL para el desarrollo de modelos relativos a la planificación y gestión de recursos hídricos (Andreu et al., 2021).

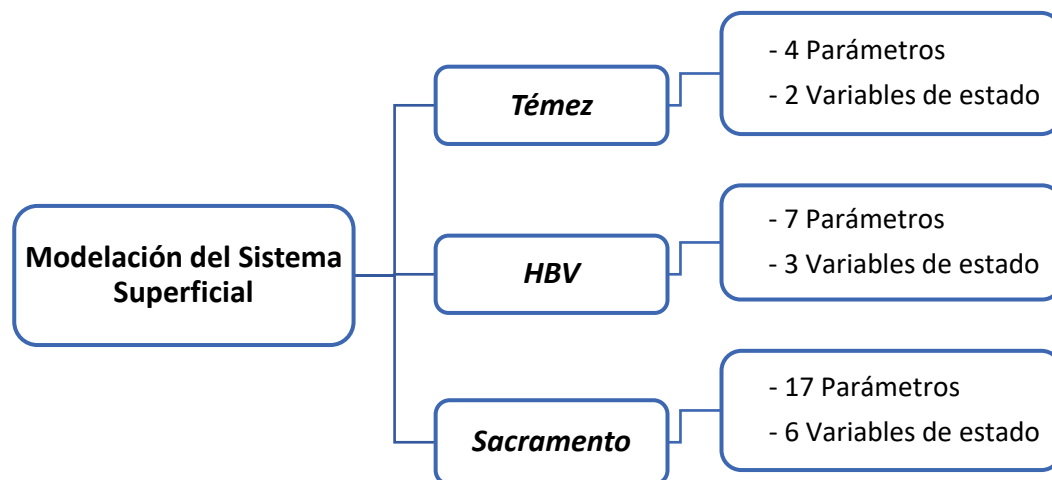
Como se ha comentado el modelo que se plantea es conceptual agregado de aplicación semidistribuida. Esto quiere decir que una cuenca que quiera ser modelada se subdivide en subcuencas y en cada subcuenca se plantea uno de los modelos disponibles en el programa. Para cada subcuenca a modelar es necesario datos de series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y la superficie de la subcuenca.

En resumen, las características principales del programa son las siguientes:

- Disponibilidad de diferentes MPE aplicables según diferentes factores.
- También cuenta con varios modelos para estimar la escorrentía nival.
- Permite el desarrollo de modelos para grandes cuencas y sistemas complejos.
- Escala temporal configurable y definida por el usuario.
- Posibilidad de modelar, para las subcuencas seleccionadas, exclusivamente la parte
- superficial estimando la infiltración como una salida del programa.
- Acople con el modelo de simulación de la gestión SIMGES y uso del mismo para la modelación de la parte subterránea.

Los MPE disponibles en EVALHID inicialmente fueron Témez, HBV, y Sacramento (figura 18), en este estudio se implementó el modelo de Témez. Los tres presentan diferentes niveles de complejidad en la modelación hidrológica y han sido ampliamente aplicados.

Figura 18. Modelos de Precipitación-Escorrentía disponibles en EvalHID.



5.4.1.1 Modelo Precipitación-Escorrentía de Témez.

El modelo de Témez (Témez,1977) pertenece al grupo de los denominados modelos agregados de simulación de cuencas (Estrela, 1992). El modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos de transporte de agua que tienen lugar en un sistema



hidrológico durante las diferentes fases del ciclo hidrológico. Todo el proceso está gobernado por el principio de continuidad y de balance de masas, y regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance.

El modelo realiza una valoración global, se limita su aplicación a cuencas pequeñas o intermedias en las que existe cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica. Para su aplicación en cuencas de mayor tamaño es necesario realizar una subdivisión en cuencas más pequeñas, por lo que el modelo puede funcionar como modelo semiagregado.

El intervalo temporal más empleado es el mensual, aunque como el desarrollo teórico del modelo es de índole general, en principio éste puede aplicarse a cualquier intervalo de tiempo (horario, diario, mensual, anual), debiéndose verificar que los períodos temporales empleados proporcionen una respuesta coherente con la realidad física del sistema.

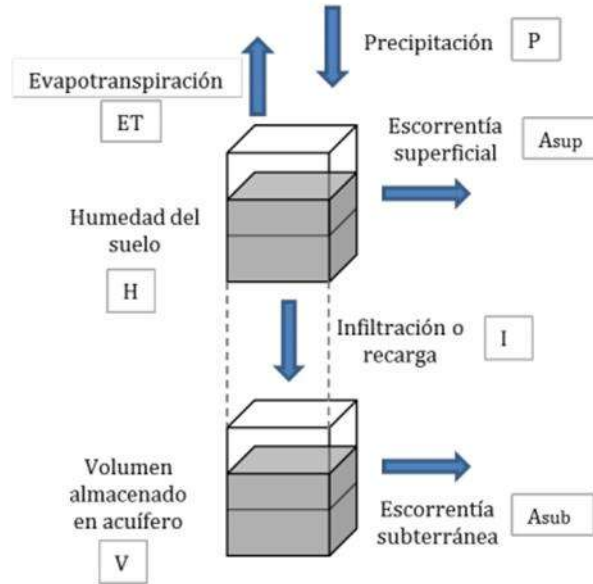
El límite de aplicación de este método está impuesto por el Tiempo de Concentración y la Superficie de la cuenca a estudio.

El modelo considera el terreno dividido en dos zonas:

- Una zona superior, no saturada, en cuyos poros coexisten agua y aire, y su contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo.
- Una zona inferior o acuífero, la cual se encuentra saturada y funciona como un almacenamiento subterráneo que desagua a la red de drenaje superficial.

El balance de humedad que realiza el modelo está constituido por el flujo entrante de precipitación (P_i), el cual se reparte entre una serie de flujos salientes, de flujos intermedios y de almacenamientos intermedios (figura 19).

Figura 19. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo de Témez.



- Flujos de entrada: la precipitación (P).
- Flujos de salida: la evapotranspiración real (E), la aportación superficial (Asup) y la aportación de origen subterráneo (Asub).
- Flujos intermedios: únicamente la infiltración (I), agua que pasa de la parte superior del suelo a la zona inferior o acuífero, donde se considera que el tiempo de paso de este flujo por el suelo es inferior al tiempo de simulación (el mes), por lo que la infiltración se identifica con la recarga al acuífero durante el mes “t” (Rt).
- Almacenamientos intermedios: la humedad del suelo (Ht), y el volumen almacenado en el acuífero (Vt).

En el modelo de Témez, el agua que procede de la precipitación (P) se distribuye de tres formas diferentes:

- El excedente (T), que a su vez se descompone en un flujo de infiltración al acuífero desde la zona superior del suelo (It), y en un flujo que discurre superficialmente (Asup). Este flujo superficial se evacua a través del cauce dentro del período presente de simulación. Parte del agua almacenada en la zona inferior o acuífero desagua en el intervalo de tiempo presente (Asubt) y



la otra parte permanece dicho almacenamiento subterráneo para salir en meses posteriores.

- La evapotranspiración real (E_t) de una parte o de toda la humedad almacenada en la zona superior del suelo (H_t).
- La humedad del suelo (H_t) que se almacena en la zona superior del suelo, cuyo límite es la capacidad máxima de almacenamiento hídrico del (H_{max}).

5.4.1.2 Cálculo del excedente.

Se considera que una fracción del agua que precipita sobre el terreno (P_t) es almacenada en la zona superior del suelo (H_t), y que el resto, el excedente (T_t), se distribuye entre la aportación de origen superficial (A_{supt}) y la infiltración hacia el acuífero (I_t) o recarga (R_t). El excedente total (T_t) se calcula según la siguiente ley:

$$T_t = 0 \quad \text{si } P_t \leq P_0$$
$$T_t = \frac{(P_t - P_0)^2}{P_t - \delta_t - 2P_0} \quad \text{si } P_t > P_0$$

donde:

$$\delta = H_{max} - H_{t-1} + EPT_t$$
$$P_0 = C (H_{max} - H_{t-1})$$

Siendo:

- H_{max} la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm).
- H_{t-1} el almacenamiento de agua en el suelo (mm) en el instante $t-1$
- EPT_t la evapotranspiración potencial (mm) en el intervalo de tiempo t . Es la máxima evapotranspiración que se produciría en condiciones óptimas de humedad.
- C el coeficiente de inicio de excedente. Un factor adimensional, que toma valores en torno a 0.30 (Témez, 1977) y define el inicio de la esorrentía antes de que se alcance el máximo de humedad en el suelo H_{max} .



De este modo, cuando la cantidad de lluvia es inferior a P_{0t} toda el agua de lluvia se almacena como humedad del suelo, siendo susceptible de convertirse en evapotranspiración, y el excedente total es nulo. A partir del valor de P_{0t} , la precipitación incrementa simultáneamente el excedente y la componente de humedad del suelo.

5.4.1.3 Cálculo del almacenamiento superficial e infiltración.

Una vez estimado el excedente (T_t), la humedad en el suelo al final de cada mes se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$H_t = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t \end{array} \right.$$

Que representa el cierre del balance entre el agua que queda en el suelo y la ETP. Si el resultado es negativo la humedad del suelo al final del periodo es nula, y la evapotranspiración potencial no se habrá desarrollado en su totalidad.

La evapotranspiración real que se produce (ET_t) obtiene mediante la siguiente expresión.

$$ET_t = \min \left\{ \begin{array}{l} H_{t-1} + P_t - T_t \\ ETP_t \end{array} \right.$$

Siempre que exista suficiente agua en el suelo, la evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la evapotranspiración potencial. En caso de no haberla, la humedad en el suelo al final de mes será nula.

La infiltración al acuífero es función del excedente y del parámetro denominado infiltración máxima (I_{max}), que expresa la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en el terreno en un mes, a través de la siguiente expresión empírica.

$$I_t = I_{max} \cdot \frac{T_t}{T_t + I_{max}}$$

De la anterior expresión se deduce que a medida que el excedente aumenta también lo hace la infiltración y que ésta tiende asintóticamente a su máximo, I_{max} . Además, si el



excedente es nulo, la infiltración también lo es. La infiltración máxima ($I_{\max}$) no depende exclusivamente de las propiedades del terreno, sino también de la intensidad y concentración de las precipitaciones. Suele tomar valores comprendidos entre 100 mm/mes y 400 mm/mes dependiendo de que la lluvia sea esporádica o persistente (Témez, 1977) aunque estos no deben considerarse como límites para calibrar un modelo.

5.4.1.4 Cálculo de la aportación superficial.

La parte del excedente que no infiltra al acuífero se convierte en escorrentía superficial al final del mes “t”, según la siguiente expresión.

$$Asup_t = T_t - I_t$$

5.4.1.5 Cálculo de la aportación subterránea.

La aportación subterránea producida durante el mes “t” ($Asub_t$) está formada por el drenaje del agua almacenada en el acuífero (V_t).

El caudal cedido a la red superficial (Q_t) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_t = \alpha \cdot V_t$$

$$I_t - Q_t = \frac{dV_t}{dt}$$

Donde:

$I(t)$ son las entradas al acuífero en el tiempo t (recargas)

$O(t)$ son las salidas del acuífero en el tiempo t (extracciones)

$V(t)$ es el volumen almacenado en el acuífero en el tiempo t.



Sustituyendo la primera ecuación en la segunda y considerando $R(t)$ como el caudal de recarga neta al acuífero en el tiempo t se tiene:

$$R_t - \alpha \cdot V_t = \frac{dV_t}{dt}$$

$$V_t = V_0 e^{-\alpha \cdot t} + \frac{R}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t})$$

Expresando el volumen como una función del caudal y haciendo $R=0$ se obtiene una expresión que representa la curva de agotamiento del acuífero.

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

La recarga, R se puede expresar como $R = S \cdot I_t$ (siendo S la superficie de la cuenca), ya que está constituida por la cantidad de agua infiltrada al acuífero. De esta forma, la ecuación que determina el volumen en el acuífero en el mes t sería la siguiente.

$$V_t = V_{t-1} e^{-\alpha \cdot \Delta t} + \frac{S \cdot I_t}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \Delta t})$$

Este modelo subterráneo presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo, pero la desventaja de que supone una simplificación excesiva del sistema. Por ejemplo, no es válido para modelar acuíferos cársticos, donde se han identificado más de una rama de descarga en el agotamiento del acuífero.

En resumen, el modelo de Témez contempla el ajuste de cuatro parámetros: H_{max} , C , I_{max} y α . Los parámetros H_{max} y C regulan el almacenamiento de agua en el suelo, I_{max} separa la escorrentía superficial de la subterránea y el parámetro α regula el drenaje subterráneo. Es también necesaria la definición de las condiciones iniciales de simulación, es decir, la determinación de la humedad inicial del suelo (H_0) y del almacenamiento inicial en el acuífero (que podría aproximarse por $V_0 = Q_0 / \alpha$). El efecto de los valores iniciales se reduce a medida que transcurre el tiempo, por lo que estos resultan, en la mayoría de los casos, poco significativos.



La siguiente tabla muestra un resumen de los parámetros del modelo y los rangos orientativos entre los que éstos pueden oscilar. Aunque su valor finalmente calibrado puede superar estos límites.

Tabla 5. Rangos de los parámetros del modelo de Témez.

	Hmax (mm)	C	I _{max} (mm)	Alfa (mes ⁻¹)
Min	50	0.2	10	0.001
Max	250	1	150	0.9

Tabla 6. Valores aproximados de H_{max} según usos del suelo (Estrela et al., 1999).

Uso del suelo	H _{max} (mm)
Superficies artificiales	40
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor en secano	155
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetación arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosques de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300



Tabla 7. Valores aproximados de I_{max} según la litología del terreno (Estrela et al., 1999).

Litología	I_{max} (mm)
Mat. aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo-arenosos	500
Calcarenitas (Macigno)	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gneiss	55
Pizarras	4
Rocas volcánicas	275

5.4.2 El modelo SIMGES

El modelo SIMGES es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial (Andreu et al., 2021).

El modelo admite cualquier configuración dentro de unos límites impuestos únicamente por capacidades de hardware, y por tanto es utilizable para cualquier esquema de recursos hidráulicos.

La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce con el detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance. Los acuíferos y las relaciones río-acuífero se simulan con modelos unicelulares, con modelos pluricelulares, o utilizando el



método de los autovalores mediante modelos distribuidos en los que se considera la variación espacial de las propiedades hidrodinámicas de los acuíferos.

El modelo SIMGES también considera los retornos a las aguas superficiales y los que se infiltran en los acuíferos y tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

La gestión de los recursos hidráulicos se simula mediante reglas de operación tendentes a mantener un nivel similar de llenado en los embalses a partir de unas curvas de zonado de embalse. Dichas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo. Se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficits, y de máxima adaptación a las curvas de volumen objetivo de embalse y objetivos de producción hidroeléctrica.

Además, esta optimización se completa con un proceso iterativo de llamadas al algoritmo de optimización lineal, lo que permite mejorar la calidad de la simulación en procesos no lineales como filtraciones, evaporaciones y relaciones entre aguas superficiales y subterráneas.

Los resultados del modelo incluyen la evolución de todas las variables de interés a nivel mensual, a nivel anual, valores medios del período de simulación, así como garantías. Todo ello permite que el modelo pueda ser utilizado, entre otras finalidades para:

- Determinar las garantías que se obtienen para distintas hipótesis de infraestructura y de evolución de demandas, así como para distintas reglas de explotación de la cuenca.
- Determinación de reglas de explotación más adecuadas para unos niveles exigidos de garantías.



- Determinación de beneficios o perjuicios derivados de la alteración de prioridades de usos del agua.
- Determinación de capacidades de embalse, de conducciones, y de instalaciones de bombeo para unos niveles de demanda y de garantía dados.

6. MÉTODOS

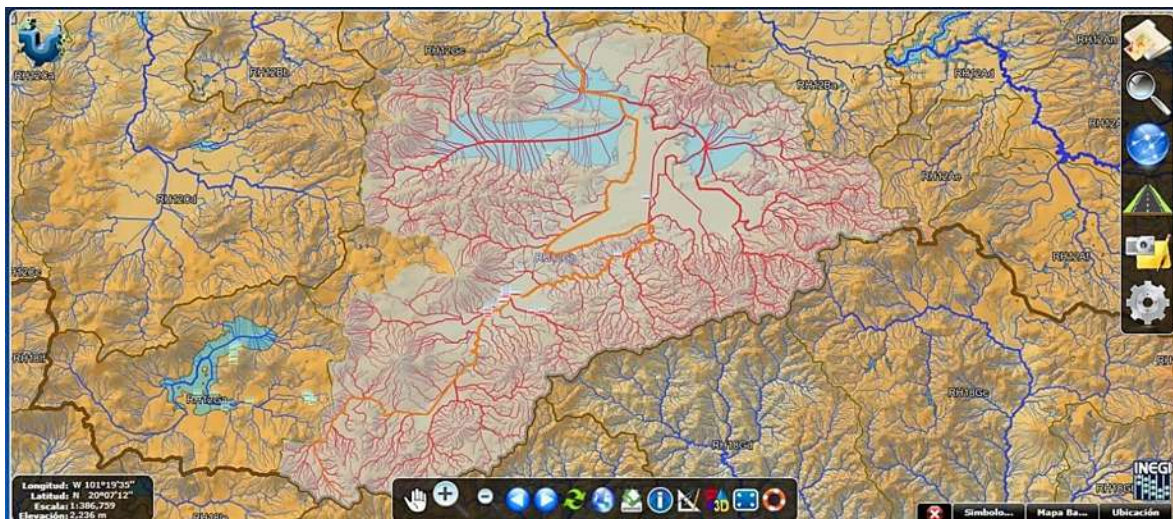
6.1 Delimitación del área de estudio mediante los Sistemas de Información Geográfica

Lograr el estudio de la Cuenca del Lago de Cuitzeo implica llevar un proceso ordenado desde la obtención de los datos climatológicos y el manejo de información geográfica hasta tener terminados los modelos de precipitación-escorrentía y la restitución a régimen natural.

Es importante mencionar que la información con la que se disponga sea lo más completa, actual y confiable para que los resultados obtenidos también lo sean. En México actualmente se carece de información climatológica reciente y completa, lo cual puede repercutir en los resultados finales. Los datos requeridos para el estudio son las precipitaciones y temperaturas de las estaciones climatológicas que están ubicadas en toda la superficie de la cuenca, de las cuales se debe validar su información de manera particular para saber si son utilizables o no y también la los datos de escurrimiento de las estaciones hidrométricas ubicadas en los ríos Grande y Queréndaro.

Para lograr trazar la zona de estudio en ArcGIS se parte de la referencia tomada del SIATL (figura 20) seleccionando una corriente principal dentro del lago la cual es donde confluyen el Río Grande de Morelia y el Río Queréndaro y apoyándose en la elevación mostrada se ubica el punto de salida con coordenadas $101^{\circ}06'28.53''$ W, $20^{\circ}00'26.05''$ N.

Figura 20. Cuenca del Lago de Cuitzeo en la plataforma del SIATL.



Una vez teniendo la forma de la cuenca se procede a la obtención de información geográfica la cual consiste en la descarga de Modelos Digitales de Elevación de la plataforma de INEGI que cubran toda la superficie de estudio, siendo un total de 33 MDE's los que se descargaron y posteriormente se procesaron en ArcGIS para trazar el parteaguas (figura 21) con base en los datos de altura y pendientes, teniendo como resultado un total de 4003 Km² y los datos que se muestran en la tabla 8.

Figura 21. Delimitación de la zona de estudio.

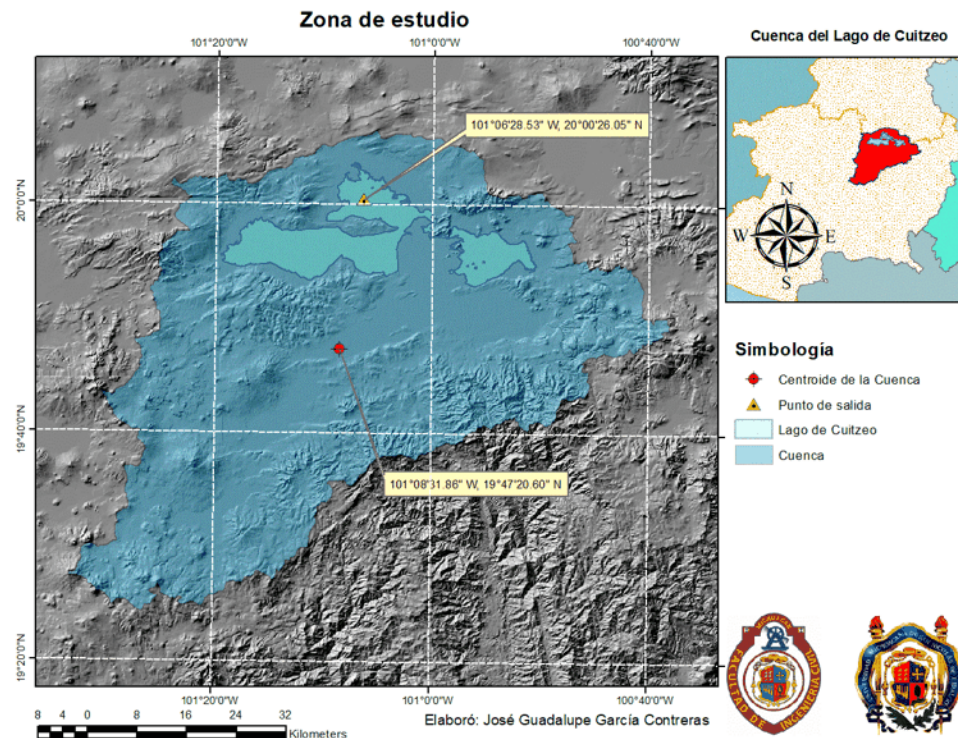


Tabla 8. Datos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Datos de la cuenca del Lago de Cuitzeo	
Área (Km ²)	4003.30
Perímetro (Km)	477.51
Pendiente media (%)	7.43
Punto de Salida (GCS)	101°06'28.53 W", 20°00'26.05" N
Centroide (GCS)	101°08'31.86" W, 19°47'20.60" N



6.2 Recopilación de Datos

6.2.1 Estaciones climatológicas

Las estaciones climatológicas son utilizadas para obtener los datos históricos de precipitación y temperatura para poder llevar a cabo la modelación en EvalHID.

Para el presente estudio se utilizaron las estaciones climatológicas que están ubicadas dentro y alrededor de la cuenca considerando los periodos de registro histórico mayor a 25 años, siendo 80 estaciones correspondientes al estado de Michoacán y 9 al estado de Guanajuato dando una selección total de 89 estaciones climatológicas (tabla 9 y figura 22) para su posterior análisis y validación mediante el uso del software GESTAD.

Los registros históricos que tienen las estaciones seleccionadas no son series continuas, por lo tanto, se debe realizar un proceso de llenado. Para esto se eligen las estaciones principales de acuerdo a criterios propios, las cuales se llenarán con los datos de las estaciones secundarias con la finalidad de obtener series continuos y con datos homogéneos.

Tabla 9. Estaciones climatológicas seleccionadas.

No.	CLAVE	ESTACIÓN	COORDENADAS UTM		
		NOMBRE	X	Y	Z
1	11002	ACAMBARO, ACAMBARO	320407.83	2216158.02	1883
2	11010	CERANO, YURIRIA	250755.19	2224395.48	1975
3	11027	IRAMUCO, ACAMBARO (SMN)	299419.55	2210850.24	1925
4	11047	MOROLEON, MOROLEON	269981.74	2227822.18	1820
5	11076	SOLIS, ACAMBARO	325657.58	2217949.91	1920
6	11114	EL REFUGIO, ACAMBARO	297738.68	2216405.27	2081
7	11149	PARACUARO, ACAMBARO	317055.97	2229108.72	1868
8	11156	EL DORMIDO, S.MARAVATIO	289175.20	2229424.56	1825
9	11158	PINICUARO, MOROLEON	266372.14	2218641.90	2070
10	16001	ACUITZIO DEL CANJE,(SMN)	255043.08	2156041.80	2101
11	16002	AGOSTITLAN, CD. HIDALGO	330341.02	2160710.42	2520
12	16004	ALVARO OBREGON, (SMN)	287007.55	2194388.07	590
13	16012	CAJONES, GABRIEL ZAMORA	191491.52	2125626.12	498
14	16016	CARRILLO PUERTO, A. O.	281882.73	2203677.68	1840
15	16017	CASA BLANCA, PURUANDIRO	238883.87	2246721.79	1694
16	16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	336572.18	2178111.13	2060
17	16022	COINTZIO, MORELIA	263963.91	2168841.71	2067



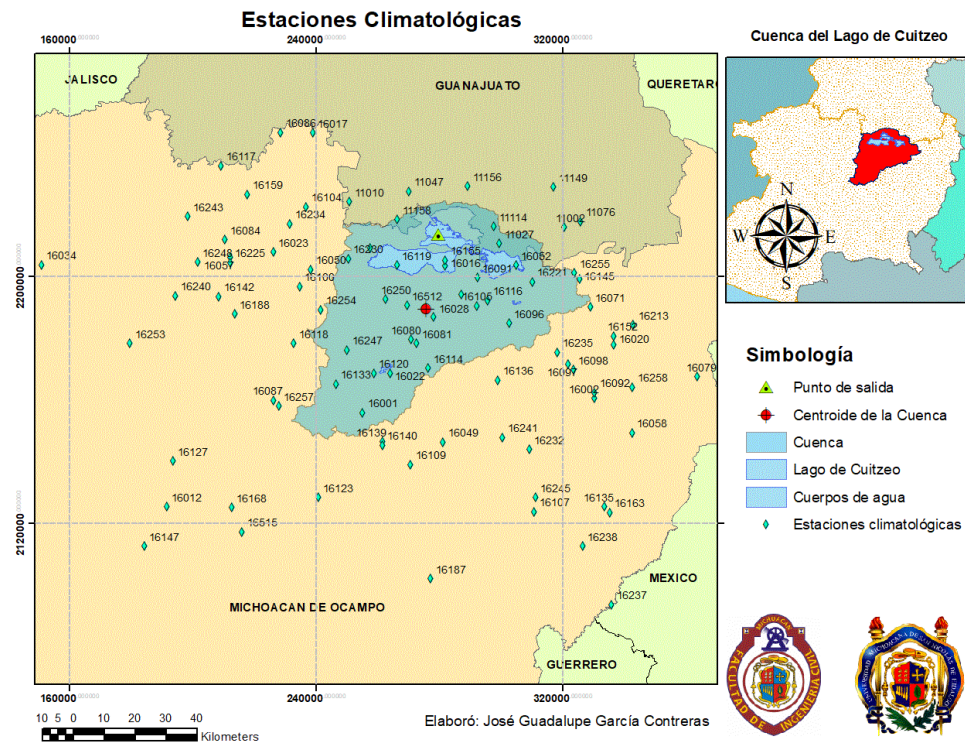
No.	CLAVE	ESTACIÓN	COORDENADAS UTM		
		NOMBRE	X	Y	Z
18	16023	COPANDARO DE GALEANA,	226083.81	2208149.98	2021
19	16027	CUITZEO, CUITZEO	257524.33	2209533.80	1867
20	16028	CUITZILLO GRANDE,	278183.95	2187114.39	1987
21	16034	CHUCANDIRO, CHUCANDIRO	150903.01	2203941.39	1843
22	16049	ETUCUARIO, MADERO (SMN)	281182.73	2146478.58	1861
23	16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	238219.16	2202427.00	2069
24	16052	HUINGO, ZINAPECUARIO	304874.92	2203833.33	1921
25	16057	JIMENEZ, VILLA JIMENEZ	212089.94	2206527.35	2014
26	16058	JUNGAPEO, JUNGAPEO	342487.77	2149531.10	1281
27	16071	LOS AZUFRES, CD. HIDALGO	328875.65	2190243.20	2914
28	16079	MELCHOR OCAMPO,M. OCAMPO	363663.88	2167737.20	2300
29	16080	MORELIA, MORELIA (SMN)	270818.90	2179758.40	1912
30	16081	MORELIA, MORELIA (DGE)	272579.60	2178474.70	1908
31	16084	PANINDICUARIO,	210435.15	2212093.78	1849
32	16086	PASTOR ORTIZ, PURUANDIRO	228435.32	2246883.38	1688
33	16087	PATZCUARO, PATZCUARO	226082.17	2160051.54	2140
34	16091	PLANTA BOMBEO A.ZINZIMEO	292311.32	2199860.82	1838
35	16092	PSA. AGOSTITLAN, CD. H.	330358.42	2162554.98	2457
36	16096	PSA. MALPAIS, QUERENDARO	302619.58	2184980.67	2282
37	16097	PSA. PUCUATO, CD.HIDALGO	321705.99	2171863.88	2501
38	16098	PSA. SABANETA,CD.HIDALGO	323435.40	2170001.60	2500
39	16100	PUENTE SAN ISIDRO,	234644.22	2196942.41	2061
40	16104	PURUANDIRO, PURUANDIRO	236777.99	2222754.96	1910
41	16105	QUIRIO, INDAPARAPEO	292202.71	2190635.36	1899
42	16107	SAN CARLOS, TIQUICHEO	310753.12	2123935.09	799
43	16109	SAN DIEGO CURUCUPATZEO,	270584.11	2139227.98	1435
44	16114	S.MIGUEL DEL MONTE, MOR.	276228.92	2170529.86	2178
45	16116	SAN SEBASTIAN,QUERENDARO	295716.98	2192440.00	1840
46	16117	SANTA FE DEL RIO,	209091.21	2236120.14	1681
47	16118	SANTA FE, QUIROGA	232619.44	2178512.40	2155
48	16119	STA.RITA,COPANDARO DE G.	266175.38	2203879.19	1880
49	16120	SANTIAGO UNDAMEO,MORELIA	258716.93	2168911.82	2025
50	16123	TACAMBARO, TACAMBARO	240645.69	2128555.47	1600
51	16127	TARETAN, TARETAN	193494.07	2140364.53	1140
52	16133	TURICATO, TURICATO	246422.53	2165389.96	2100
53	16135	TUZANTLA, TUZANTLA (SMN)	333517.61	2125628.93	677
54	16136	TZITZIO, TZITZIO	298917.89	2166569.97	1469
55	16139	VILLA MADERO, MADERO	261493.80	2146658.20	2097
56	16140	VILLA MADERO, MADERO (CFE)	261479.20	2145551.00	20182
57	16142	ZACAPU, ZACAPU (DGE)	208384.94	2193663.71	1990



No.	CLAVE	ESTACIÓN	COORDENADAS UTM		
		NOMBRE	X	Y	Z
58	16145	ZINAPECUARO, ZINAPECUARO	325474.36	2199501.42	2480
59	16147	ZIRITZICUARO, LA HUACANA	184253.73	2112823.21	455
60	16152	CD. HIDALGO, CD. HIDALGO	336597.57	2180878.27	2327
61	16155	COPANDARO, JIMENEZ	281905.61	2205522.62	1980
62	16159	EL ROSARIO, ANGAMACUTIRO	217655.34	2226746.73	1796
63	16163	TUZANTLA, TUZANTLA (DGE)	335253.94	2123768.42	665
64	16168	ARIO DE ROSALES, (SMN)	212537.47	2125283.68	1936
65	16187	ESC. TEC. AGRO. 139,	277142.74	2102239.36	602
66	16188	TIRINDARO, ZACAPU	213536.84	2188040.33	2032
67	16213	IRIMBO, CIUDAD HIDALGO	342795.49	2184579.64	2315
68	16221	UCAREO UNION DE FRUT.	310143.21	2198455.19	1986
69	16225	VILLA JIMENEZ, V.JIMENEZ	212059.76	2204681.50	2020
70	16230	LAS CRUCES, PURUANDIRO	250492.21	2205940.36	2374
71	16232	EL DEVANADOR, TZITZIO	309175.92	2144316.92	1252
72	16234	GALEANA, PURUANDIRO	231461.77	2217297.39	1950
73	16235	HUAJUMBARO, CD. HIDALGO	318247.48	2175588.51	2414
74	16237	EL LIMON, TIQUICHEO	335814.15	2093899.22	460
75	16238	MELCHOR OCAMPO, TUZANTLA	326385.71	2112781.28	519
76	16240	EL PUEBLITO, ZACAPU	194407.95	2193899.67	2362
77	16241	TEFETAN, TZITZIO	300462.06	2148101.06	885
78	16243	ZIQUITARO, PENJAMILLO	198346.05	2219683.92	1940
79	16245	SAN CARLOS, TIQUICHEO DGE	311180.51	2128543.39	651
80	16247	CAPULA, MORELIA	250075.90	2176413.24	2146
81	16248	CAURIO DE GUADALUPE	201584.03	2204856.09	2090
82	16250	HUANDACARO, CUITZEO	262534.89	2192853.96	2214
83	16254	TEREMENDO, MORELIA	241521.91	2189456.51	2141
84	16255	UCAREO, MORELIA	323746.97	2201363.70	2540
85	16257	STA. ISABEL DE AJUNO	227833.99	2158209.68	2250
86	16258	PRESA TUXPAN, TUXPAN	342616.92	2164288.37	2168
87	16253	TANACO, MICH.	804026.71	2180879.06	2140
88	16512	EL COLEGIO, MICH	269535.31	2190848.85	1880
89	16515	LA SANDIA, MICH	215963.59	2117406.11	2180

Nota: La estación 11158-Piñicuaró presentó pocos años de registro por lo que se decidió eliminarla antes de que formara parte del directorio ya que su información no era representativa.

Figura 22. Estaciones climatológicas seleccionadas para la zona de estudio.



Para obtener las coordenadas de las estaciones climatológicas se basó en el archivo shape proporcionado por la CONABIO y fueron corroborados con las coordenadas que se muestran en la plataforma del CLICOM. Una vez verificadas todas las estaciones se extraen las coordenadas UTM en X, Y y Z para futuros cálculos y se procede a la descarga de datos de precipitaciones diarias del CLICOM de cada una de las estaciones en formato .MAT (archivo para el software MATLAB), también se requiere descargar los datos de temperatura promedio en formato .CSV (archivo para Excel) para calcular la evapotranspiración.

6.2.2 Estaciones hidrométricas

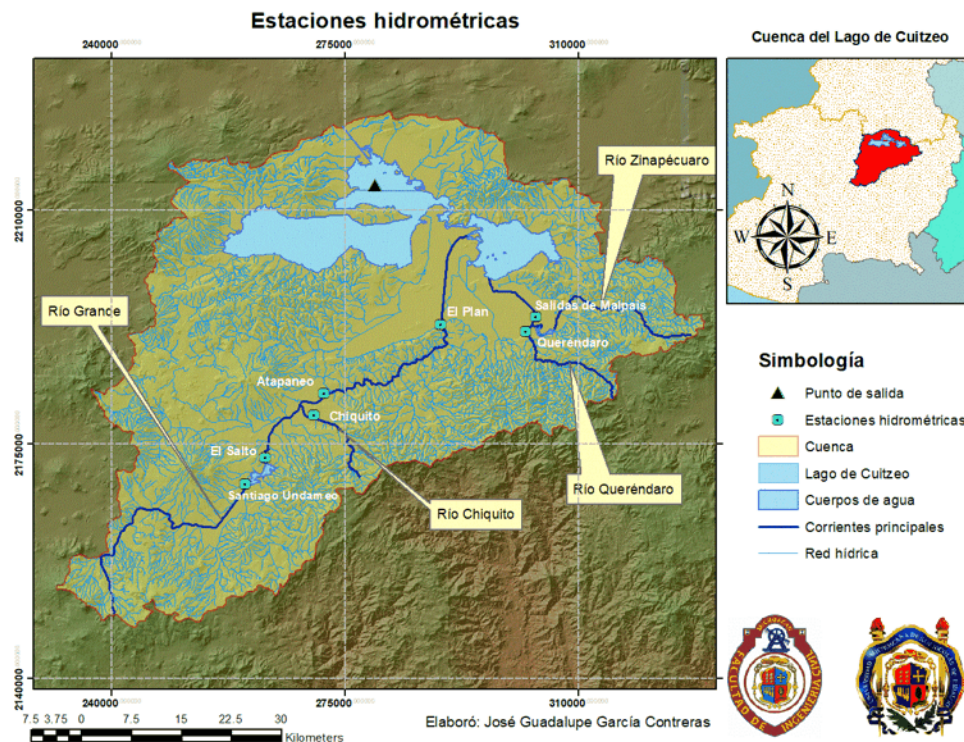
Los datos que proporcionan estas estaciones son los volúmenes de agua que contienen las presas, ríos, arroyos o lagunas producidos por las lluvias y los escurrimientos. Los datos son obtenidos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la CONAGUA.

Esta información fue requerida para poder realizar la calibración del modelo EvalHID y del modelo SIMGES con los registros históricos que contienen las estaciones hidrométricas del Río Grande de Morelia y el Río Queréndaro ya que son las más completas y con registros más actuales. En la tabla y figura siguientes se muestran las estaciones hidrométricas que se encuentran en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Tabla 10. Estaciones hidrométricas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Clave Est. Hidrométrica	Nombre	Coordenadas UTM	
		X	Y
12221	Atapaneo	271902.96	2182512.90
12224	Chiquito	270405.12	2179302.32
12314	Queréndaro	302092.42	2191746.84
12323	Salidas de Malpais	303572.52	2193975.45
12347	Santiago Undameo	260010.96	2168980.14
12365	El Salto	263036.97	2172938.84
12588	El Plan	289354.90	2192755.04

Figura 23. Estaciones hidrométricas en la zona de estudio.



6.3 Procesamiento de la información climatológica en GESTAD

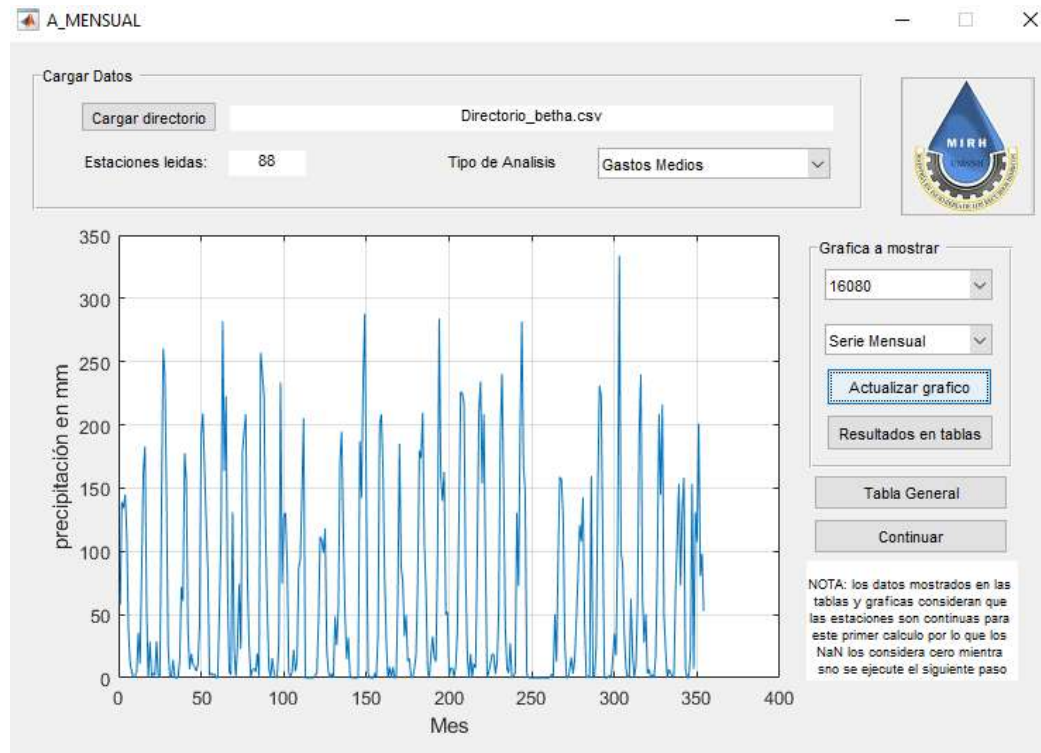
El procesamiento de la información de precipitación que contienen las estaciones climatológicas se realiza con el apoyo del software GESTAD el cual ya se definió



anteriormente. Existen varios métodos para realizar la validación de la homogeneidad, tendencia y persistencia, para esto el software aplica diversas pruebas para tener una serie de datos más fiable.

Primeramente se debe preparar un directorio que cuente con los datos de todas las estaciones climatológicas los cuales son clave, las coordenadas UTM en X, Y y su elevación en msnm, en este orden, se guardan en una misma carpeta junto a los archivos .MAT que se descargaron del CLICOM y posteriormente se procede a ejecutar el programa, una vez cargado el directorio, el programa nos permite visualizar las series de datos de cada una de las estaciones de manera gráfica o en tablas (figura 24).

Figura 24. Ventana inicial del software GESTAD.



6.3.1 Análisis y validación de datos.

Cázares et al. (2019) menciona en su artículo lo siguiente para definir las pruebas hechas a las series de datos:



El programa realiza las pruebas para validación de los datos de cada una de las estaciones y permite eliminarlas de la lista si el usuario así lo desea. Dicha validación de datos se realiza en cuatro niveles (inspección gráfica, homogeneidad, tendencia e independencia) y se realiza al registro histórico anual, las pruebas empleadas se desglosan a continuación:

- Pruebas gráficas.
 - Media móvil
- Homogeneidad
 - Test de Secuencias.
 - Test de Helmer.
 - Test T-Student.
 - Test de Cramer.
 - Test de Bartlett
- Tendencia
 - Test de la Pendiente de la recta de regresión.
 - Test de Spearman.
 - Test de Mann Kendall
- Dependencia o persistencia.
 - Límites de Anderson.
 - Wald-wolfowitz

6.3.1.1 Pruebas gráficas.

Los métodos gráficos sirven para apreciar inicialmente por simple inspección el comportamiento de la serie histórica permitiendo tener una idea general de su comportamiento. Muchas veces este comportamiento puede ser complicado de identificar por algunos cambios abruptos, para apreciar de mejor manera el comportamiento de los datos se puede calcular y graficar ventanas móviles, para esto se recomienda usar una ventana móvil de 5 años para precipitación y 3 para escurrimientos, ya que estos últimos tienen un comportamiento menor errático.



Esta ventana móvil consiste en determinar el promedio de los primeros datos conforme a la ventana, para posteriormente desplazarse 1 posición y calcular nuevamente la media de este nuevo grupo de datos y repetir este procedimiento hasta utilizar todos los datos de la ecuación:

$$\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \frac{x_2 + x_3 + \dots + x_{n+1}}{n}, \frac{x_3 + x_4 + \dots + x_{n+2}}{n}, \dots$$

nueva serie de datos se grafica y es más fácil identificar el comportamiento de la serie, es importante mencionar que estos son métodos tentativos por lo que pueden variar dependiendo del punto de vista de quien los analice.

6.3.1.2 Pruebas de homogeneidad.

Estas pruebas tienen como objetivo demostrar que los datos no cambian, esto se debe a que la climatología al ser una serie de eventos cíclicos se dice que tiende a mantener una homogeneidad en grandes periodos de tiempo.

6.3.1.2.1 Test de Secuencias.

Test de secuencias es un método que busca analizar los datos respecto a la mediana y contando el número de cambios presentes en la serie de datos consecutivos y verificar que el número de cambios existentes se encuentre entre el rango de datos indicado en la siguiente tabla, según el número de datos (N).

Tabla 11. Cambios permitidos para el Test de Helmer (Campos, 2011).

N	U	N	U	N	U	N	U
12	5	8	22	9	14	32	13
14	5	10	24	9	16	34	14
16	6	11	26	10	17	36	15
18	7	12	28	11	18	38	15
20	8	13	30	12	19	40	16



6.3.1.2.2 *Test de Helmert.*

Es un método que analiza los datos denominando secuencias (S) a aquellos datos consecutivos que mantienen la misma posición con respecto a la media (Mayor o menor) y denominándolo como cambio (C) en caso contrario, este método se aplica a la serie de datos consecutivos más grande que se tenga descartando el resto de los valores (Campos, 2011). Una vez que se analizaron los datos se aplica el criterio mostrado en la siguiente ecuación:

$$-\sqrt{n-1} \leq (s - c) \leq \sqrt{n-1}$$

6.3.1.2.3 *Test de t-Student.*

El Test de t-Student es una prueba que permite probar si la media de una serie de datos es igual que la de otra, esto en series de precipitación permite comparar la media de la primera mitad de los datos contra la segunda mitad permitiendo demostrar que la serie en ambas secciones tiene la misma media por lo que es homogénea. La prueba se basa en determinar un estadístico (t) por medio de la aplicación de la ecuación:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 \delta_1^2 + n_2 \delta_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{0.5}}$$

Donde:

- $n_1, \delta_1^2, \bar{x}_1$ son el numero de datos, la varianza y la media de la primera mitad del grupo de datos.
- $n_2, \delta_2^2, \bar{x}_2$ son el numero de datos, la varianza y la media de la segunda mitad del grupo de datos.

Este estadístico debe encontrarse entre los límites establecidos (tr) por una distribución t de student de dos colas con un nivel de significancia del $\alpha=0.05$ y N-2 grados de libertad (Escalante & Reyes, 2002).

Una limitación de este método es la cantidad de datos ya que si se tiene una serie muy grande puede arrojar resultados erróneos.



6.3.1.2.4 Test de Cramer

De manera similar a la prueba t Student la homogeneidad de la muestra, pero este método divide la muestra en 3 bloques, el primero del tamaño total de la muestra (n_j), el segundo (n_{60}) toma el 60% de los últimos datos de (n_j) y el tercer grupo (n_{30}) toma el 30% de los últimos datos de n_j .

La prueba compara el valor de la media $\bar{X}^j$ del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos $\bar{X}_{60}^j$, $\bar{X}_{30}^j$. Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media o homogénea, se deberá cumplir que no existe diferencia significativa entre las medias de los bloques para esto se usan las fórmulas:

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w[1 + (\tau_w^j)^2]} \right\}^2$$

$$\tau_w^j = \frac{\bar{X}_w^j - \bar{X}^j}{\delta_Q^j}$$

$$\bar{X}_w^j = \sum_{k=1}^{n_w} \frac{\bar{X}_w^j}{n_w}$$

$$\delta_x^j = \left[\frac{1}{(n_w - 1)} \sum_{k=1}^{n_j} (x_i^j - \bar{X}^j)^2 \right]^{0.5}$$

Para $w=60$ y 30

Este estadístico (t_w) tiene distribución t - student de dos colas con $n_{30}+n_{60}-2$ grados de libertad y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, si el valor de t_w es menor a los límites de la distribución t-studen para $w=60$ y $w=30$ se concluye que la serie es homogénea (Escalante & Reyes, 2002).



6.3.1.2.5 *Test de Bartlett*

Introducida por Bartlett en 1937, es una modificación del test de Newman y Pearson para “corregir el sesgo”, esta prueba es la que se utiliza con más frecuencia para probar la homogeneidad de las varianzas. En esta prueba los n_i en cada tratamiento no necesitan ser iguales; sin embargo, se recomienda que los n_i no sean menores que 3 y muchos de los n_i deben ser mayores que 5.

El estadístico de la prueba está definido por las ecuaciones:

$$U = \frac{1}{C} \left[(N - k) \ln(\delta^2) - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln(\delta_i^2) \right]$$
$$C = 1 + \frac{1}{3(k-1)} \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{N - k} \right)$$

Donde:

- N es la cantidad de datos de la serie
- K es el número de grupos en los que se dividirá la muestra (mínimo 2)
- n_i es el número de datos en el grupo i ésimo.
- δ_i^2 es la varianza del grupo i ésimo.

Cuando la hipótesis nula es cierta, el estadístico tiene distribución aproximadamente χ^2 con $k - 1$ grados de libertad (Correa, et al 2006).

6.3.1.3 Pruebas de Tendencia.

Las pruebas de tendencia persiguen un objetivo similar a las pruebas de homogeneidad ya que si la climatología no cambia en el tiempo deberá mantener la misma tendencia.



6.3.1.3.1 *Pendiente de regresión simple.*

Esta prueba consiste en demostrar si existe tendencia en los datos a partir de ajustar una recta de regresión simple comúnmente determinada por el método de mínimos cuadrados mostrado en la siguiente ecuación:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y}{\sum_{i=1}^n x^2 - (\sum_{i=1}^n x)^2}$$

Donde “y” representa la serie de tiempo, “x” la serie de datos correspondiente a la serie de tiempo y “m” la pendiente de regresión.

Una vez determinada la pendiente el estadístico que indica si la pendiente es representativa se calcula con las ecuaciones:

$$tr = \frac{m}{SE^2}$$

$$SE^2 = \frac{Se^2}{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}$$

$$Se^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}{N - 2}$$

Donde:

- SE^2 es el error estándar.
- Se^2 es la varianza del error de ajuste.
- N el número de datos de la serie.

Final mente el estadístico tr se compara con la distribución t student para una significancia de $\alpha=0.5$ y grados de libertad N-2 en caso de ser tr menor a la prueba t student se afirma la hipótesis de tendencia insignificante.

6.3.1.3.2 *Test de Spearman*

En esta prueba no paramétrica que se conoce como correlación del orden de rangos primero se ordenan los datos de menor a mayor y se sustituye cada elemento del registro por



su rango (k_i), después para cada dato de la serie original se calculan las diferencias: $d_i = k_i - i$, con $i = 1$ a n y se evalúan los estadísticos mostrados en las fórmulas:

$$ts = R_k \sqrt{\frac{N-2}{1-R_k^2}}$$
$$R_k = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{N(N^2-1)}$$

El valor de ts se compara con el intervalo definido por la distribución t-studen de 2 colas para un nivel de significancia $\alpha=0.05$ y $n-2$ grados de libertad (Campos, 2015).

6.3.1.3.3 Test de Mann Kendall.

Esta prueba paramétrica es muy efectiva si la tendencia fundamental es de tipo lineal o se aproxima a esta. Su procedimiento consiste en evaluar el número p , en todos los pares de observaciones (x_i, x_j ; con $i = 1$ a $n-1$; $j = i + 1$ a n) en que x_j es mayor que x_i , después se calculan las estadísticas de las ecuaciones:

$$Z_k = \frac{s+1}{\sqrt{V(s)}}$$
$$V(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18}$$
$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sig}(x_j - x_i)$$

Donde:

$$\begin{aligned} Si (x_j - x_i) > 0 \quad \text{sig}(x_j - x_i) &= 1 \\ Si (x_j - x_i) = 0 \quad \text{sig}(x_j - x_i) &= 0 \\ Si (x_j - x_i) < 0 \quad \text{sig}(x_j - x_i) &= -1 \end{aligned}$$



Nota: t representa el número de grupos en los que se repite la misma variable, pero como en series de precipitación o gasto es muy poco probable que se repita una lectura se omite la parte $\sum_t t(t-1) (2t+5)$.

Si el valor absoluto de Z_k es mayor que el valor crítico de la distribución normal estándar, la serie presenta tendencia creciente o decreciente con un nivel de significancia $\alpha=0.05$ (Cantor & Ochoa, 2011).

6.3.1.4 Pruebas de Dependencia o Persistencia.

Estudios realizados a lo largo del tiempo han demostrado que una característica que suele describir las series históricas es su dependencia o persistencia (Alvarez & Salas, 1989) en el caso de las series de precipitación cuentan con independencia, pero las series de escurrimientos suelen ser persistentes al menos para el primer año, aunque esto no se cumple siempre (Campos, 1992) es por esto que este tipo de pruebas nos permite identificar la serie analizada.

6.3.1.4.1 Límites de Anderson.

La cuantificación de la persistencia se realiza con base en el coeficiente de correlación (r_k) para un orden o desfase k el cual indica que tan fuerte está siendo afectado un evento por el anterior (Campos A, 2011). Este estadístico se determina por medio de la ecuación:

$$r_k = \frac{cov(x_i, x_{i+k})}{\sqrt{var(x_i) * var(x_{i+k})}}$$

Este método establece unos límites de confianza los cuales dependen de la cantidad de datos en la serie, de tal forma que a mayor cantidad de datos más cerrados serán los límites y mayor grado de confianza tendrán, en caso de contar con pocos datos los límites de abren generando mayor incertidumbre. Los límites están definidos por la ecuación:

$$Lim = \frac{-1 \pm 1.964\sqrt{n-2}}{n-1}$$



En el caso de series de precipitación esta prueba se aplica para un numero de desfases $k=n/3$ si el 95% de los r_k se encuentran dentro de los limites se considera una serie independiente, en el caso de las series de escurrimientos se debe observar si es persistente (dependiente) para cada desfase para de esta forma indicar que es persistente hasta k desfases.

6.3.1.4.2 *Wald-Wolfowitz.*

La prueba de Wald-Wolfowitz es generalmente la prueba principal usada para verificar la dependencia. Esta prueba detecta si un patrón es dependiente estadísticamente, esto mediante evaluar el carácter de aleatoriedad de una secuencia de registros históricos. Para esto el método genera corridas de datos sobre la media y bajo la media y evalúa si estos cambios representan un carácter aleatorio mediante las ecuaciones siguientes:

$$\mu_R = 1 + \frac{2nm}{n+m}$$
$$Var[R] = \frac{2nm(2nm - n - m)}{(n+m)^2(n+m-1)}$$
$$Z_W = \frac{\left(R \pm \left(\frac{1}{2}\right)\right) - \mu_R}{\sqrt{Var[R]}}$$

Donde:

- μ_R representa la media de las corridas
- n es son los datos de la serie sobre la media.
- m los datos bajo la media.
- R representa el número de corridas.

Esta prueba se compara con una distribución normal. Si el valor de Z_W calculado está dentro del rango del valor critico de Z para $\alpha=0.05$ se dice que los datos son independientes.

6.3.2 *Llenado de datos faltantes*



Esta sección permite llenar las estaciones principales para el mismo periodo de histórico ya que esto es esencial cuando se desea realizar modelaciones de gestión.

Para realizar el llenado el software cuenta con 3 métodos los cuales son:

- Regresión lineal simple
- Regresión lineal múltiple
- Inverso de la distancia ponderada (IDW)

6.3.2.1 Regresión lineal simple.

Este método permite determinar los datos faltantes de una serie de datos con apoyo en una o más series secundarias las cuales mantienen buena correlación con la serie que se desea llenar. Este método se representa por medio de una línea recta en un diagrama de dispersión generada a través del principio de mínimos cuadrados el cual está representado por la ecuación:

$$y = a_0 + a_1 * x = b + mx$$

Donde b es la ordenada al origen calculado con la ecuación Ec. 34 y m la pendiente calculada con la ecuación:

$$b = \bar{y} - m * \bar{x}$$

6.3.2.2 Regresión lineal múltiple.

Se basa en el mismo principio que la regresión lineal simple con el adicional de que se usan dos o más series de datos secundarias generando como recta de ajuste una ecuación polinómica como se muestra en la ecuación:

$$y = a_0 + a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + ... + a_n * x_n$$



6.3.2.3 Inverso de la distancia ponderada (IDW).

Este método requiere de al menos 3 estaciones que rodeen la estación objetivo, el principio del método es sacar un promedio de los valores en las estaciones secundarias asignando mayor peso a las estaciones cercanas y disminuir dicho peso al alejarse del objetivo (Díaz et al., 2008).

El peso en este caso está definido por la ecuación:

$$w_i = \frac{N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta}$$

Donde:

- N=número de estaciones secundarias.
- $d_{(e,i)}$ =distancia a la estación objetivo de la estación secundaria.
- β = coeficiente potencial (1 en caso de no querer considerarse).

Finalmente, la precipitación en la estación objetivo se estima con la ecuación:

$$p_e = \sum_{i=1}^N w_i * p_i$$

El software permite el llenado de una estación con múltiples métodos por lo que se puede intentar llenar datos con los métodos más completos y los que no se puedan con estos métodos llenarlos con los más sencillos esto con un apoyo gráfico que viene integrado dentro del programa.

6.4 Cálculo de la Evapotranspiración

El conocimiento de la evapotranspiración o uso consuntivo es un factor determinante en el diseño de sistemas de riego, incluyendo las obras de almacenamiento, conducción, distribución y drenaje. Especialmente, el volumen útil de una presa para abastecer a una zona de riego depende en gran medida del uso consuntivo.



En México se usan fundamentalmente dos métodos para el cálculo del uso consuntivo: el de Thorntwaite y el de Blaney-Criddle. El primero, por tomar en cuenta sólo la temperatura media mensual, arroja resultados estimativos que pueden usarse únicamente en estudios preliminares o de gran visión, mientras que el segundo es aplicable a casos más específicos (Aparicio 1997).

Para el presente estudio se utilizó el método de Thorntwaite ya que como se menciona, es para estudios de gran visión y resultaría complicado obtener las evapotranspiraciones de las estaciones con el método de Blaney-Criddle ya que requiere además de la temperatura y las horas de sol diarias, el tipo de cultivo, la duración de su ciclo vegetativo, la temporada de siembra y la zona, datos que son más complicados de capturar por la superficie que se está estudiando.

6.4.1 Método de Thorntwaite

Este método, desarrollado en 1944, calcula el uso consuntivo mensual como una función de las temperaturas medias mensuales mediante la fórmula:

$$U_j = 1.6 K_a \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a$$

Donde:

- U_j = uso consuntivo en el mes j , en cm.
- T_j = temperatura media en el mes j , en °C.
- a, I = constantes.
- K_a = constante que depende de la latitud y el mes del año (tabla 12).

Las constantes I (índice de eficiencia de temperatura) y a se calculan de la siguiente manera:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$



Donde:

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5}\right)^{1.514}$$

y j = número de mes

Tabla 12. Valores de K_a (Aparicio, 1997).

Latitud, grados	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Nota: Para el cálculo de K_a de cada mes para cada estación se debe realiza una interpolación entre el valor superior y el valor inferior con la posición de la estación.

$$a = 675 \times 10^{-9}I^3 - 771 \times 10^{-7}I^2 + 179 \times 10^{-4}I + 0.492$$

6.5 Modelo Precipitación-Escorrentía

Para la elaboración del modelo general de la Cuenca del Lago de Cuitzeo se tuvo que subdividir la cuenca en subcuencas ya que así el análisis se vuelve más fino, debido a que la superficie analizada es de grandes dimensiones, por lo tanto, se deduce que en la cuenca no existe una uniformidad de características de suelo y de precipitaciones, siendo estas variables las que inciden principalmente en el escurrimiento, y por lo tanto en el resultado de los volúmenes simulados.



La subdivisión (figura 25) fue tomada de la propuesta mostrada en el estudio realizado por Pardo (2016) en su tesis de maestría con el título “GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO, ANTE EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO”, en donde se ha determinado dividir la cuenca en dieciséis subcuencas (tabla 13).

Figura 25. Subcuencas de la zona de estudio (Pardo, 2016).

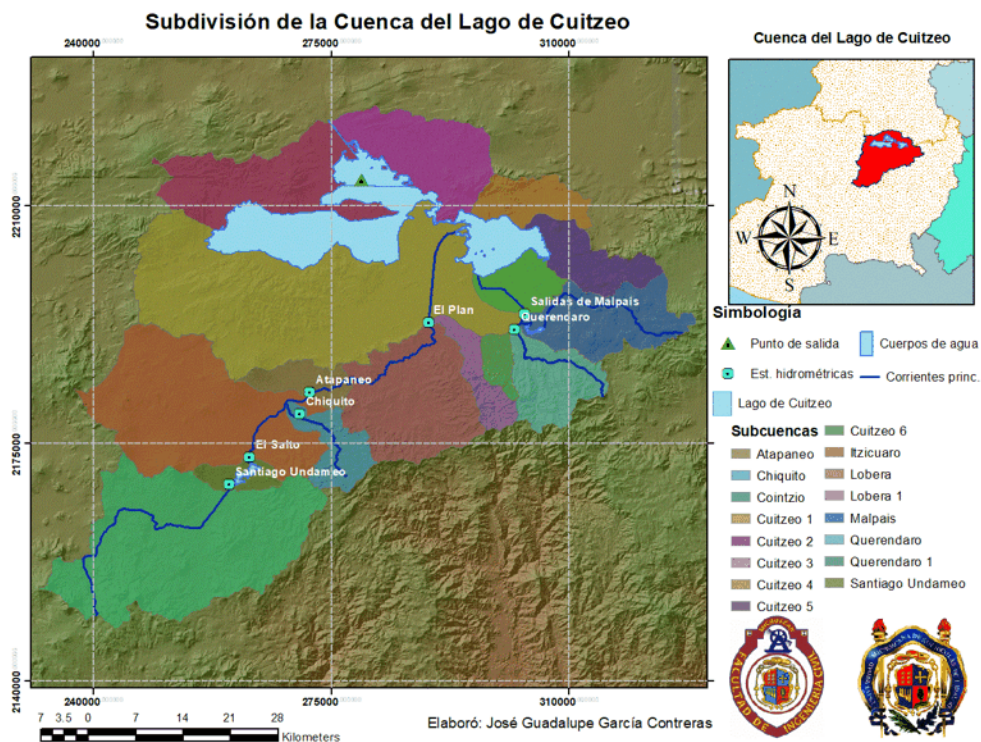


Tabla 13. Nombre de las subcuencas de la zona de estudio (Pardo, 2016).

Nombre	Área	Perímetro
Atapaneo	66.60	53.79
Chiquito	87.55	68.84
Cointzio	617.52	175.05
Cuitzeo 1	811.66	235.23
Cuitzeo 2	267.05	169.86
Cuitzeo 3	217.54	106.92
Cuitzeo 4	96.16	60.62
Cuitzeo 5	110.50	70.58
Cuitzeo 6	80.89	49.95



Nombre	Área	Perímetro
Itzicuaró	490.83	154.70
Lobera	295.64	102.29
Lobera 1	65.35	58.62
Malpaís	191.07	97.98
Queréndaro	136.26	70.21
Queréndaro 1	36.26	29.88
Santiago Undameo	44.02	35.73

El modelo general de la cuenca del Lago de Cuitzeo está conformado a su vez de dos modelos más. Como se ha mencionado, los datos de entrada que requiere EvalHID son las precipitaciones mensuales, la evapotranspiración y los datos de los volúmenes registrados por las estaciones hidrométricas, al calibrarse estos dos modelos por separado, existe la libertad de ingresar parámetros distintos (Hmax, C, Imax y Alfa).

Las subcuencas que se modelaron y calibraron fueron las pertenecientes a las estaciones hidrométricas Santiago Undameo (figura 26 y tabla 14) en el Río Grande de Morelia y Queréndaro (figura 27 y tabla 15) ubicada en el Río Queréndaro, ya que estas a diferencias de las otras, tienen un registro histórico de datos más completo y reciente. Posteriormente calibradas estas dos cuencas se podrá elaborar el modelo de la cuenca completa asignando los parámetros de Témez a las cuencas restantes y así obtener los escurrimientos de cada una.

Figura 26. Subcuenca perteneciente a la estación hidrométrica DM12347.

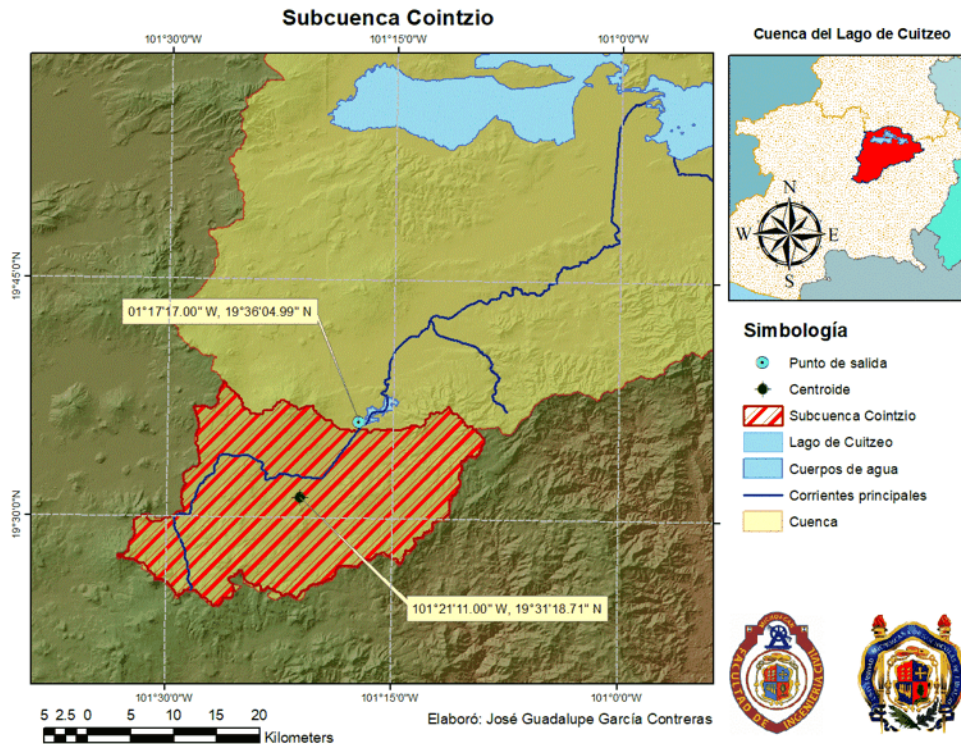


Tabla 14. Datos de la subcuenca Cointzio perteneciente a la estación hidrométrica DM12347.

Datos de la subcuenca Cointzio	
Área (Km ²)	617.52
Perímetro (Km)	175.05
Pendiente media (%)	7.77
Punto de Salida (GCS)	101°17'17.00" W, 19°36'04.99" N
Centroide (GCS)	101°21'11.00" W, 19°31'18.71" N

Figura 27. Subcuenca perteneciente a la estación hidrométrica DM12314.

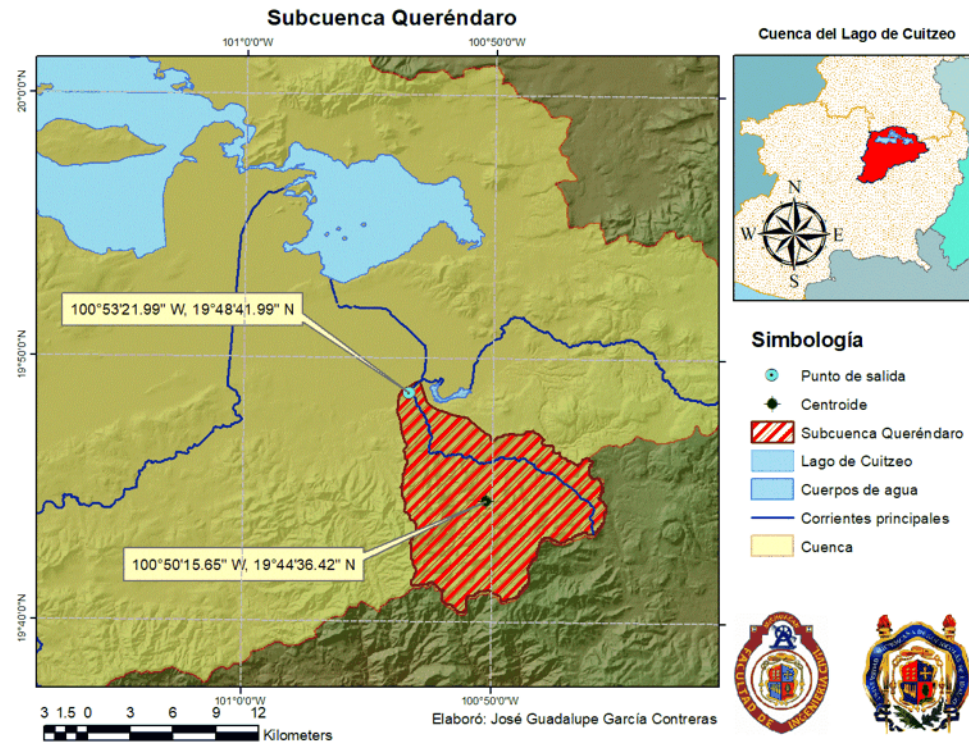


Tabla 15. Datos de la subcuenca Queréndaro perteneciente a la estación hidrométrica DM12314.

Datos de la subcuenca Queréndaro	
Área (Km ²)	136.26
Perímetro (Km)	70.21
Pendiente media (%)	16.67
Punto de Salida (GCS)	100°53'21.99" W, 19°48'41.99" N
Centroide (GCS)	100°50'15.65" W, 19°44'36.42" N

6.5.1 Traslado de datos para la elaboración del MPE

El software EvalHID requiere que para cada modelo exista un directorio de trabajo donde se deben colocar los archivos de precipitaciones, evapotranspiración, temperatura (en el caso del modelo de nieve) y los volúmenes observados de la hidrométrica (serie de datos real) para poder realizar la modelación y obtener los volúmenes simulados.

Los archivos anteriores se obtienen del generador de datos de EvalHID, el cual es un archivo de Excel programado en Visual Basic. Este generador de datos requiere la



información ordenada de los datos registrados en la hidrométrica que está dentro de la subcuenca para obtener el archivo de observados. Para el caso de los archivos de precipitación y evapotranspiración se debe hacer un traslado de datos hacia el centroide de cada una de las microcuencas con los datos de las estaciones que tienen área de influencia en la subcuenca a modelar.

Figura 28. Ventana de trabajo de la extensión de GESTAD para el traslado de datos.

Cargar Datos

Cargar Centroides Centroides.csv
Cargar Estaciones Estaciones.csv
Cargar Datos PRECIPITACIONES.csv

(2) Datos para llenado

Centroide a transportar: MC2 Cargar
Matrices Auxiliares

(3) Estaciones para llenado

Ordenar datos por: ID Agregar
Estaciones seleccionables: 11027 Quitar

ID	Estación	Distancia	ZONA	COR X	COR Y	COR Z
1	11027	28526.72	2	2.9942e+05	2.2109e+06	1925
2	16020	26871.63	4	3.3657e+05	2.1781e+06	2060
3	16213	32303.77	1	3.4280e+05	2.1846e+06	2315

Estaciones Seleccionadas

ID	Estación	Distancia	ZONA	COR X	COR Y	COR Z
1	11027	28526.72	2	2.9942e+05	2.2109e+06	1925
2	16020	26871.63	4	3.3657e+05	2.1781e+06	2060
3	16213	32303.77	1	3.4280e+05	2.1846e+06	2315

Grafica de Estaciones seleccionadas

MC2 11027 16020 16213

Regresar Tabla General Continuar

Para realizar el traslado de datos se emplea una extensión del software GESTAD (figura 28) que permite por el método del inverso de la distancia ponderada (IDW) definido anteriormente, trasladar los datos de precipitación y evapotranspiración a cada uno de los centroides de las microcuencas que conforman la subcuenca de análisis. Una vez realizado el traslado, la extensión de GESTAD nos arroja un archivo de Excel con los datos ordenados (precipitación y EVT) para ingresarlos al generador de datos de EvalHID y armar el directorio de datos, que en conjunto con los shapes del punto de salida y las microcuencas de la subcuenca nos permitirán realizar el modelo de Témez.



6.5.2 Calibración del MPE

La elaboración de un MPE para la evaluación de los recursos hídricos requiere de una calibración, esto es, ajustar los parámetros meteorológicos y fisiográficos de manera particular para cada sistema y esto se logra modificando los valores numéricos de las ecuaciones de cada modelo.

El proceso de calibración consiste en lograr que los valores simulados obtenidos del modelo sean lo más similares a los valores observados o medidos en el mismo periodo de tiempo de la serie utilizada, para esto caso en el software de EvalHID se deben modificar los parámetros del modelo de Témez (H_{max} , C , I_{max} y α) que son los que influyen de manera directa con el comportamiento del escurrimiento superficial. Las modificaciones que se realicen deben ser congruentes y dentro de los rangos que por experiencia o con base en otros estudios se conozcan. El realizar una correcta calibración nos permitirá que nuestros resultados también lo sean.

En el proceso para asemejar los valores simulados y los reales u observados, consta de la calibración que es lograr que la diferencia entre ambas series (simulada y real) sea mínima, y que se le conoce como función objetivo; y la validación, que es el proceso a través del que se generan caudales mediante el modelo durante un periodo distinto al usado en la calibración y del cual se dispone de caudales registrados para el mismo periodo. De esta forma se comprueba si el modelo es capaz de generar aportación con un nivel adecuado de confiabilidad (Bâ et al., 1995).

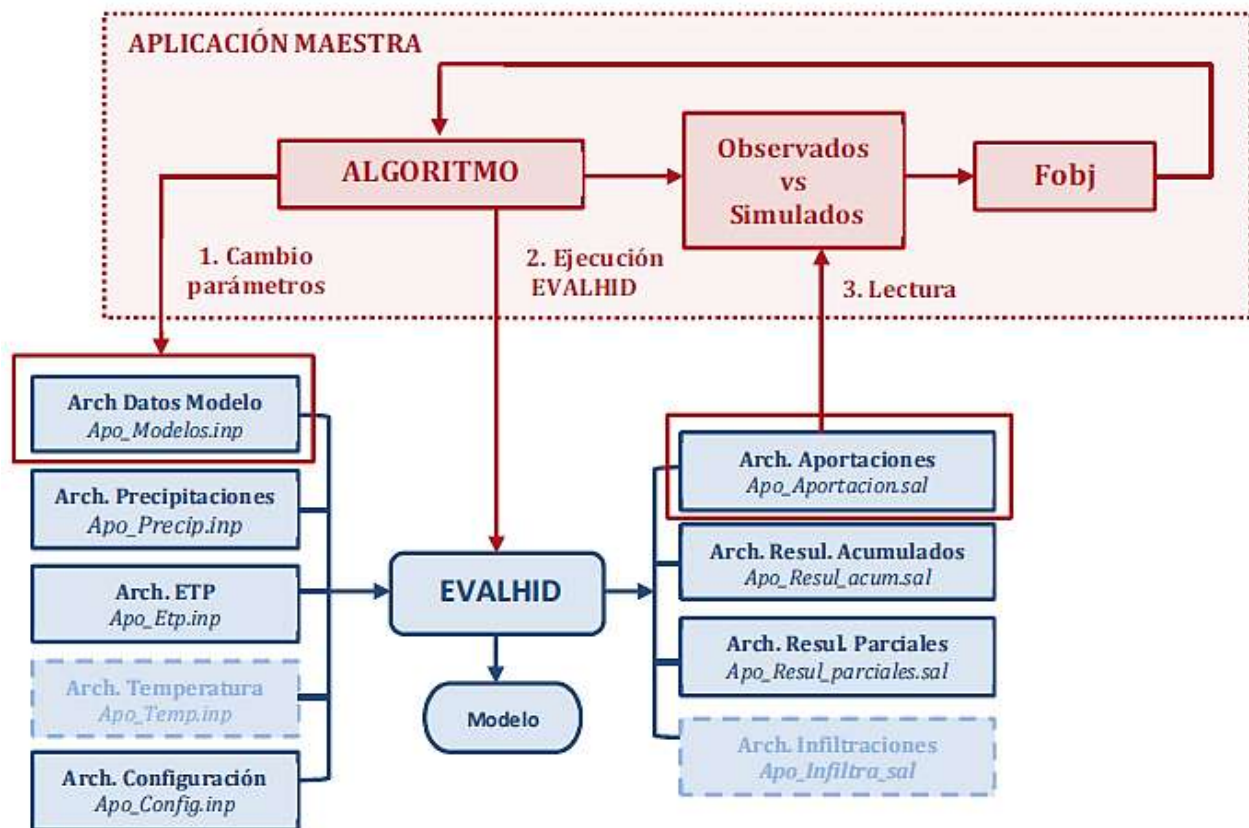
Para el presente estudio se utilizó un calibrador desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, el cual incorpora el algoritmo evolutivo de calibración SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method developed at The University of Arizona).

6.5.2.1 Aplicación del calibrador para EvalHID.

La aplicación informática de este calibrador permite importar los resultados de las aportaciones de EvalHID para poder compararlos con las series de aportaciones observadas y, mediante la incorporación a esta de una adaptación a Visual Basic del algoritmo SCE-UA, proceder a la autocalibración de los MPE (Casas y Paredes, 2013). La plataforma empleada

en esta aplicación es el libro de cálculo de Excel. Su funcionamiento se describe en la siguiente figura:

Figura 29. Esquema de funcionamiento del Calibrador para EvalHID (Casas, 2013).



Una vez creado y ejecutado el MPE en EVALHID, el usuario accede al calibrador y desde esta se carga automáticamente la siguiente información de cada una de las cuencas definidas en EVALHID:

- Código, nombre y superficie de la cuenca
- Columnas de precipitación, evapotranspiración y temperatura de los archivos de entrada EVALHID que corresponden a cada cuenca
- Coeficientes de ajuste de precipitación y temperatura
- Tipo de modelo empleado
- Parámetros del modelo



- Condiciones iniciales de las variables de estado
- Código de desagüe superficial y código de desagüe subterráneo

Inicialmente, y para poder comenzar la calibración, el usuario debe definir previamente el número y nombre de los parámetros, sus límites superiores e inferiores, así como su valor inicial. También se puede modificar el número máximo de iteraciones y decidir si se quiere comenzar a calibrar con el valor inicial de los parámetros o no. Existe además la posibilidad de imponer los parámetros con los que se quiere lanzar el algoritmo (semilla, número de complejos, etc.).

Adicionalmente, se debe especificar en la Aplicación Principal qué parámetros de los que se han cargado se desea optimizar, ya que existe la posibilidad de que no se quieran calibrar todas las subcuencas a la vez y se escojan, por tanto, sólo los parámetros de una determinada cuenca; e incluso que no se desee calibrar todos los parámetros de ésta, dejando algunos fijos. Además, el usuario puede hacer que las condiciones iniciales de las variables de estado también se conviertan en parámetros a calibrar.

Una vez especificada toda la información necesaria en el calibrador, se ejecuta desde ella el algoritmo SCE-UA. En cada iteración, el algoritmo varía los parámetros del modelo y la Aplicación Principal modifica el archivo principal de Datos del Modelo (Apo_Modelos.inp) para introducir estos nuevos parámetros en el programa EVALHID. A continuación, se ejecuta el programa y se procede a la lectura e importación del archivo de Aportaciones (Apo_Aportacion.sal).

Figura 30. Hoja de cálculo "SCEUA" del calibrador para EvalHID.

7	VALUE	NAME				
Number of parameters	4	NOPT	Javier Paredes (jparedes@hma.upv.es). Julio 2010. Adaptación del algoritmo SCE-UA a visual Basic para aplicaciones. Conexión con el modelo GESCAL. SCE-UA SIMGES01 ruta_Escena D:\aqtesc01 Initial: 20/11/2019 15:25:08 Final: 20/11/2019 15:36:11 Tiempo: ##### SACRAMENTO			
Maximum number of function evaluation:	15000	Maxn				
Number of shuffling loops in which the criterion value must change by PECNTO before optimization is terminated	10	Kstop				
Percentage by which the criterion value must change in KSTOP shuffling loops	0.1	pcento				
	0.001	peps				
number of complexes (sub-populations)	4	ngs				
Random number seed:	23456	iseed				
Considering initial parameters:	1	iflag				
Parameters						
Name (optional)	Hmax	C	Imax	Alfa		
Minimum Value	50	0.1	20	0		
Maximum Value	600	0.26	150	1		
Xo	119.99	0.4494	206.22	0.42		
OBJECTIVE FUNCTION (Minimize)						
f(x)	-0.7250258	-0.7250819 <- Máx. valor alcanzado de la FO				
SOLUTION	Hmax	C	Imax	Alfa		
Optimum	522.9874	0.1002644	88.264494	0.3442172	245.33124	1.2298994 195.29926 0.8287338
Numeroliteraciones		938				

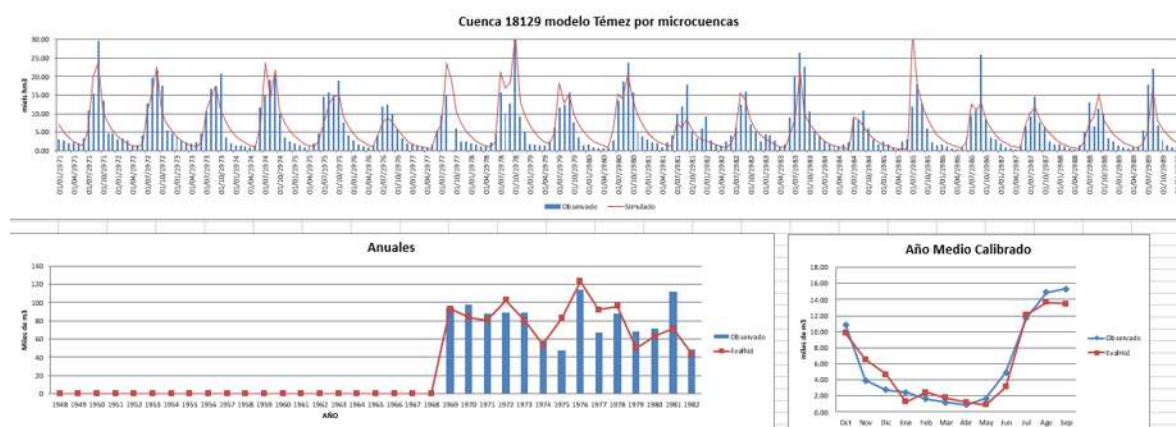
A continuación, la Aplicación Principal evalúa la función objetivo, que debe haber sido previamente definida por el usuario, y que emplea posteriormente el algoritmo en el proceso de optimización.

Si en la iteración i no se ha alcanzado el criterio de convergencia, el algoritmo avanza a la iteración $i+1$, y así sucesivamente hasta que la búsqueda de los parámetros finaliza cuando el algoritmo es incapaz de apreciar una mejora en la función objetivo de una iteración a la siguiente. Además, para evitar que el algoritmo entre en un bucle infinito, la búsqueda termina si se supera un número máximo de iteraciones antes de alcanzar el criterio de convergencia.

Los mejores y peores valores obtenidos para la función objetivo en cada grupo de iteraciones, así como los parámetros correspondientes a cada uno de ellos son almacenados por la Aplicación Principal para que puedan ser consultados. Así mismo, ésta informa de si el criterio de convergencia ha sido o no alcanzado y para qué número de iteraciones se ha alcanzado si es el caso.

El calibrador realiza una comparativa de forma gráfica de las series de datos que simula EvalHID contra los datos observados clasificándolos de manera mensual, anual y año medio, en conjunto de la función objetivo para decidir si el ajuste que se realizó es adecuado.

Figura 31. Gráficas creadas por el calibrador.



6.5.2.2 Algoritmo autocalibrador SCE-UA.

Casas y Paredes (2013) lo describen en su trabajo de la siguiente manera:



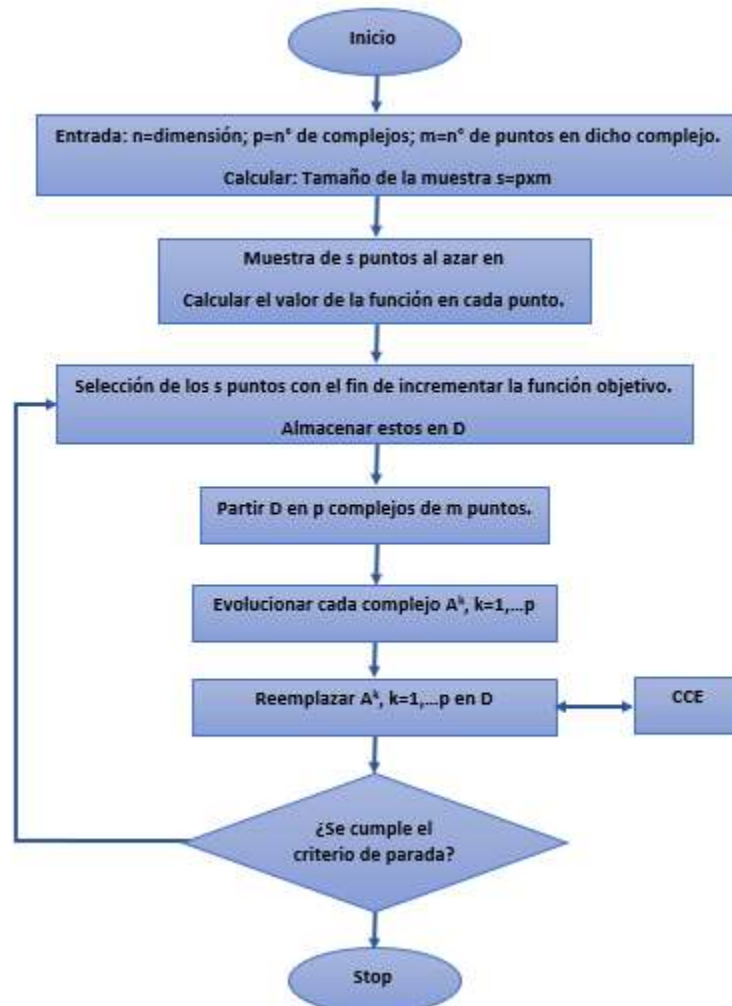
El algoritmo SCE-UA fue desarrollado por Duan et al. (1992) y ha sido utilizado con éxito para la resolución de problemas no lineales en numerosas aplicaciones en el ámbito de la calibración de modelos hidrológicos de cuenca.

El funcionamiento básico del algoritmo SCE está inspirado en los principios de la selección natural y la genética y es una combinación de procedimientos deterministas y aleatorios. Se parte de diferentes puntos de búsqueda (individuos) que se organizan por equipos (complex). De esta manera, la búsqueda de la solución global óptima se plantea como un proceso evolutivo (evolution) basado en la reproducción (cruce, mutación, recombinación) existiendo, además, mezcla de equipos (shuffled).

El SCE posee las propiedades necesarias para lidiar con los problemas más comunes de optimización de modelos hidrológicos de cuenca: convergencia global ante la presencia de múltiples regiones de atracción; capacidad para evitar caer atrapado en pequeños hoyos y baches en la superficie de la función objetivo; solidez ante sensibilidades divergentes de parámetros e interdependencia de parámetros; no dependencia en la disponibilidad de una expresión explícita para la función objetivo o las derivadas; capacidad para manejar un gran número de parámetros.

A continuación, se describen brevemente las distintas etapas que sigue este algoritmo evolutivo:

Figura 32. Diagrama general del SCE-UA. Adaptación de Duan et al., 1992 (Casas y Paredes, 2013).



6.5.2.3 Función objetivo.

Las funciones objetivo constituyen uno de los elementos principales en los procedimientos de estimación automática de parámetros. Una función objetivo es una ecuación que se emplea para obtener una medida numérica de la diferencia entre la respuesta simulada por el modelo (en el caso de los MPE, los caudales en régimen natural) y la respuesta observada (medida) en la cuenca. El propósito de la calibración automática de modelos es, por tanto, “encontrar aquellos valores de los parámetros del modelo que optimicen (minimicen o maximicen, según el caso) el valor numérico de la función objetivo” (Casas y Paredes, 2013).



El algoritmo SCE-UA evalúa gran cantidad de combinaciones de valores de parámetros para encontrar el mejor ajuste entre los datos observados y simulados. Este ajuste se evalúa maximizando una función objetivo de entre las siguientes:

$$F_1 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}]^2}$$
$$F_2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [\ln(Q_{sim}(t)) - \ln(Q_{obs}(t))]^2}{\sum_{t=1}^n [\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(\bar{Q}_{obs}(t))]^2}$$
$$F_3 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})(Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}}$$
$$F_4 = 1 - \left[\max \left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}; \frac{\bar{Q}_{obs}}{\bar{Q}_{sim}} \right) - 1 \right]^2$$

F_{med} promedio de las cuatro funciones anteriores.

Donde:

$Q_{sim}(t)$ y $Q_{obs}(t)$ son los flujos simulados y observado, respectivamente, en el intervalo de tiempo t , n es el número de meses de la calibración, y la barra alta denota el valor medio.

F_1 es el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS), un error cuadrático medio que da mayor peso a los errores grandes, que a menudo, pero no siempre, suceden durante períodos de flujo elevado. El valor de NS varía de -1 a 1. Un valor de NS=1 significa que el ajuste es perfecto. Un valor de NS=0 significa que el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados, por lo que la media de los datos observados tendría una capacidad de predicción similar al modelo. Valores inferiores a cero implican que la media tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo que implica el mal funcionamiento del modelo.

La principal desventaja del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe es que las diferencias entre los valores observados y simulados se calculan como valores cuadráticos. Como resultado, los valores mayores de las series temporales están fuertemente



sobrevalorados mientras que los valores más bajos no son tenidos en cuenta. En la cuantificación de predicciones de flujo, esto conlleva a una sobrestimación del funcionamiento del modelo durante picos de flujo y una subestimación del funcionamiento del modelo para condiciones de flujo escaso. El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe no es muy sensible a sobre- o infravaloraciones sistemáticas del modelo especialmente durante períodos de flujo escaso.

F2 es el coeficiente de Nash-Sutcliffe de la transformación logarítmica del flujo (ln NS), que da mayor peso a los errores durante flujos escasos. Para reducir el problema de las diferencias cuadráticas y la consecuente sensibilidad a valores extremos, el coeficiente NS se calcula con valores logarítmicos de los valores observados y simulados. Mediante esta transformación logarítmica del flujo, los picos se achatan y los valores más bajos se mantienen más o menos al mismo nivel. Como consecuencia, la influencia de los valores de flujo escaso se incrementa en comparación con los picos de flujo y por tanto aumenta la sensibilidad del ln NS a las sobre- o infravaloraciones sistemáticas del modelo.

F3 es el coeficiente de correlación de Pearson, que mide la covariabilidad de valores observados y simulados sin penalización por sesgo. El valor del coeficiente varía entre -1 y 1 . El coeficiente r toma el valor de 1 , momento denominado de correlación completa positiva, cuando los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente positiva, con x e y aumentando conjuntamente. El valor 1 es independiente de la magnitud de la pendiente. En cambio, si los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente negativa, con y decreciendo cuando x aumenta, el coeficiente r toma el valor de -1 , momento denominado de correlación completa negativa. Un valor de r cercano a cero indica que las variables x e y no están correlacionadas linealmente.

El coeficiente de Pearson tiene el inconveniente que es un estadístico pobre para decidir si la correlación observada es estadísticamente significativa, y/o si una correlación observada es significativamente más fuerte que otra. El motivo es que en el cálculo del coeficiente se ignora la distribución individual de x e y , por lo tanto, no hay una manera universal de evaluar sus distribuciones en el caso de que las dos variables no estén correlacionadas (la hipótesis nula).



F4 es una medida de la simetría del ajuste entre la simulación media y la observación media.

6.6 Análisis multivariante en las subcuencas para la asignación de parámetros del modelo de Témez

El análisis multivariante se define como el conjunto de técnicas estadísticas que tienen como objetivo analizar e interpretar las relaciones entre distintas variables de manera simultánea, mediante la construcción de modelos estadísticos complejos que permiten distinguir la contribución independiente de cada una de ellas en el sistema de relaciones y, de este modo, describir, explicar o predecir los fenómenos que son objeto de investigación (Meneses, 2019).

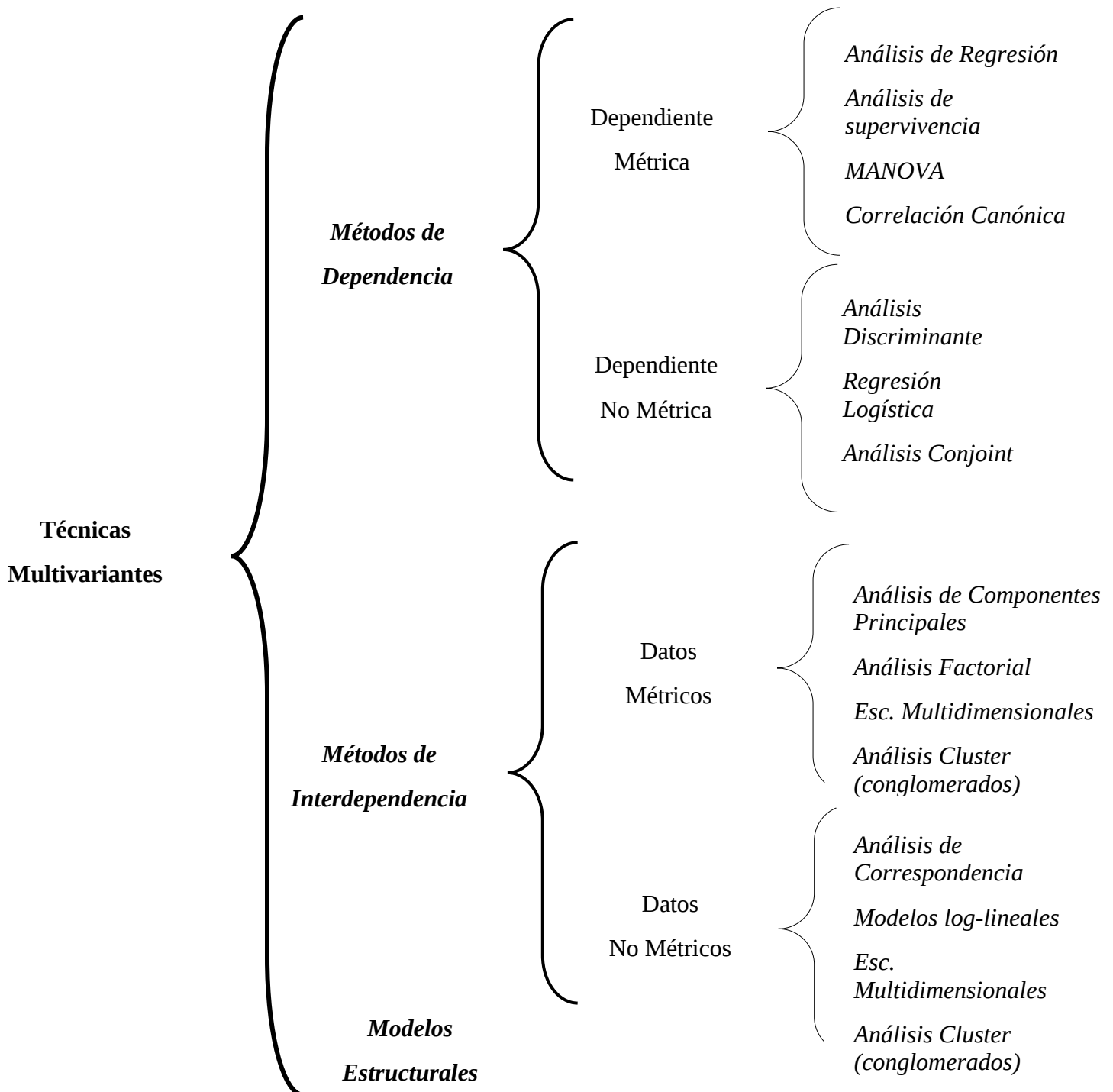
Los objetivos del análisis multivariante son dos, el primero, proporcionar métodos cuya finalidad es el estudio conjunto de datos multivariantes que el análisis estadístico uni y bidimensional es incapaz de conseguir; y el segundo es ayudar al analista o investigador a tomar decisiones óptimas en el contexto en el que se encuentre teniendo en cuenta la información disponible por el conjunto de datos analizado (Figueras, 2000).

Existen diferentes tipos de técnicas multivariantes, que se pueden clasificar en tres grandes grupos y se muestran en el siguiente diagrama:

- Métodos de dependencia: Suponen que las variables analizadas están divididas en dos grupos: las variables dependientes y las variables independientes. El objetivo de los métodos de dependencia consiste en determinar si el conjunto de variables independientes afecta al conjunto de variables dependientes y de qué forma.
- Métodos de interdependencia: Estos métodos no distinguen entre variables dependientes e independientes y su objetivo consiste en identificar qué variables están relacionadas, cómo lo están y por qué.



- Métodos estructurales: Suponen que las variables están divididas en dos grupos: el de las variables dependientes y el de las independientes. El objetivo de estos métodos es analizar, no sólo como las variables independientes afectan a las variables dependientes, sino también cómo están relacionadas las variables de los dos grupos entre sí.





La técnica multivariante utilizada en el presente estudio fue el análisis clúster, es el nombre genérico de una amplia variedad de procedimientos que pueden ser usados para crear una clasificación. Más concretamente, un método cluster es un procedimiento estadístico multivariante que comienza con un conjunto de datos conteniendo información sobre una muestra de entidades e intenta reorganizarlas en grupos relativamente homogéneos, el cual tiene por objetivo ordenar las observaciones en grupos tales que el grado de asociación natural es alto entre los miembros del mismo grupo y bajo entre miembros de grupos diferentes (Gutiérrez et al., 1994).

Dentro de los métodos clusters hay dos grandes categorías: los métodos jerárquicos y los no jerárquicos, en esta clasificación el análisis realizado forma parte de los jerárquicos.

Los métodos jerárquicos tienen por objetivo agrupar clusters para formar uno nuevo o bien separar alguno ya existente para dar origen a otros dos, de tal forma que se minimice alguna función distancia o bien se maximice alguna medida de similitud.

Los métodos jerárquicos se subdividen a su vez en aglomerativos y disociativos. Los aglomerativos comienzan el análisis con tantos grupos como individuos haya en el estudio. A partir de ahí se van formando grupos de forma ascendente, hasta que, al final del proceso, todos los casos están englobados en un mismo conglomerado. Los métodos disociativos o divisivos realizan el proceso inverso al anterior. Empiezan con un conglomerado que engloba a todos los individuos. A partir de este grupo inicial se van formando, a través de sucesivas divisiones, grupos cada vez más pequeños. Al final del proceso se tienen tantos grupos como individuos en la muestra estudiada (Gutiérrez et al., 1994).

Independientemente del proceso de agrupamiento, hay diversos criterios para ir formando los conglomerados; todos estos criterios se basan en una matriz de distancias o similitudes.

El programa JMP contiene los siguientes métodos aglomerativos:

- Método de Ward
- Método de la media
- Método del centroide
- Método único



- Método completo
- Método de Ward acelerado

Teniendo los modelos en EvalHID de las subcuencas de Queréndaro y Cointzio con parámetros calibrados del modelo de Témez (H_{max} , C , I_{max} y α), se procede a asignar dichos parámetros a las demás subcuencas mediante la aplicación de un método de análisis multivariante para obtener un conglomerado jerárquico donde se agrupan las subcuencas en función del parecido o la similaridad entre ellas, con base a características que influyen directamente en el comportamiento del escurrimiento superficial.

Las variables que se utilizaron para el análisis multivariante fueron:

- Pendiente media de la subcuenca
- Tipo de suelo:
 - Gruesa
 - Fina
 - Media
- Uso de suelo:
 - Cultivos
 - Pastizales
 - Bosques
 - Popal y tular (vegetación endémica de lugares con agua dulce o salobre y poco profundos)
 - Vegetación halófila y gipsófila (vegetación característica de los suelos yesosos)
 - Zonas urbanas

Cada una de las variables fue calculada como porcentaje en área de cubrimiento en cada una de las subcuencas, a excepción de la pendiente media, esta fue calculada con base a las elevaciones obtenidas de los modelos digitales de elevación y que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 16. Variables ingresadas para el análisis multivariante.**

Nombre	Tipo de suelo						Uso de suelo					Smedia (%)
	Gruesa	Fina	Media	ND*	Cultivos	Pastizal	Cuerpos de agua	Bosque	Popal y tular	Vegetación halófila y gipsófila	Zonas urbanas	
Cuitzeo 1	0.00%	85.49%	10.38%	4.13%	64.99%	20.25%	2.90%	5.47%	4.94%	4.94%	0.00%	6.23
Lobera	0.00%	59.82%	39.98%	0.20%	57.83%	3.59%	0.00%	38.59%	0.00%	0.00%	0.00%	10.76
Malpaís	1.88%	4.21%	93.91%	0.00%	40.69%	2.40%	0.00%	53.38%	3.53%	3.53%	0.00%	10.55
Itzicuario	0.06%	49.42%	49.66%	0.86%	55.65%	14.42%	0.00%	29.03%	0.00%	0.00%	0.90%	6.37
Queréndaro	0.00%	18.74%	80.34%	0.92%	28.32%	2.86%	0.00%	68.82%	0.00%	0.00%	0.00%	16.67
Atapaneo	0.00%	92.31%	7.69%	0.00%	82.62%	10.10%	0.00%	7.27%	0.00%	0.00%	0.00%	5.01
Chiquito	0.00%	60.15%	26.14%	13.71%	29.60%	0.00%	0.00%	57.90%	0.00%	0.00%	12.50%	11.18
Cointzio	0.00%	22.79%	77.11%	0.10%	52.38%	4.63%	0.00%	42.32%	0.66%	0.00%	0.00%	7.77
Santiago U.	0.00%	62.89%	25.91%	11.19%	74.18%	7.05%	9.39%	9.37%	0.00%	0.00%	0.00%	6.61
Queréndaro 1	0.00%	60.07%	39.60%	0.33%	30.48%	46.54%	0.00%	22.97%	0.00%	0.00%	0.00%	12.60
Lobera 1	0.00%	39.18%	60.61%	0.21%	51.50%	2.27%	0.00%	46.22%	0.00%	0.00%	0.00%	13.47
Cuitzeo 5	5.69%	27.14%	64.50%	2.66%	46.47%	20.49%	0.67%	28.31%	0.00%	4.05%	0.00%	7.78
Cuitzeo 4	0.00%	84.82%	14.71%	0.47%	67.84%	25.55%	0.04%	6.31%	0.00%	0.25%	0.00%	8.35
Cuitzeo 3	0.00%	96.16%	3.41%	0.43%	64.05%	27.30%	0.78%	1.91%	1.26%	4.69%	0.00%	5.44
Cuitzeo 2	0.00%	84.75%	13.93%	1.32%	60.83%	21.60%	0.90%	11.80%	2.31%	2.57%	0.00%	7.06
Cuitzeo 6	0.00%	10.06%	84.31%	5.63%	81.98%	5.25%	3.60%	2.30%	6.73%	0.14%	0.00%	4.43

Realizada la agrupación de las subcuencas y asignados los parámetros ya mencionados, se procede a elaborar el modelo general de la Cuenca del Lago de Cuitzeo para obtener los escurrimientos superficiales de la cuenca y de las subcuencas ya que para el modelo SIMGES se requiere conocer las aportaciones de las presas Cointzio y Malpaís correspondientes a las subcuencas de Santiago Undameo y Queréndaro respectivamente.

6.7 Modelo del Sistema de Gestión de Recursos Hídricos SIMGES

El modelo SIMGES es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial (Andreu et al, 2021).



El modelo admite cualquier configuración dentro de unos límites impuestos únicamente por capacidades de hardware, y por tanto es utilizable para cualquier esquema de recursos hidráulicos.

La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce a la escala de detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, uní o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

La gestión de los recursos hidráulicos se efectúa mediante reglas de operación tendentes a mantener un nivel similar de llenado en los embalses a partir de unas curvas de zonado de embalse. Dichas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo. Se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficits, y de máxima adaptación a las curvas de volúmenes objetivo de embalse y objetivos de producción hidroeléctrica.

Los resultados del modelo incluyen la evolución de todas las variables de interés a nivel mensual, a nivel anual, valores medios del período de simulación, así como garantías. Todo ello permite que el modelo pueda ser utilizado, entre otras finalidades para:

- Determinar las garantías que se obtienen para distintas hipótesis de infraestructura y de evolución de demandas, así como para distintas reglas de explotación de la cuenca.
- Determinación de reglas de explotación más adecuadas para unos niveles exigidos de garantías.



- Determinación de beneficios o perjuicios derivados de la alteración de prioridades de usos del agua.
- Determinación de capacidades de embalse, de conducciones, y de instalaciones de bombeo para unos niveles de demanda y de garantía dados.

6.7.1 *Elementos considerados*

La definición de unos elementos tipo, que son combinados por el usuario de diferentes formas, permite la adaptación del modelo a cualquier esquema. Los elementos considerados son:

- ***Embalses (superficiales)***, con su aportación intercuenca incluida. Quedan definidos mediante sus parámetros físicos, sus parámetros de gestión (volúmenes máximos, volúmenes objetivos, y prioridad de almacenamientos con respecto a otros embalses).
- ***Aportaciones intermedias***. Se consideran como tales aquellas que no puedan ser consideradas o no convenga sean consideradas directamente como entradas de embalse.
- ***Conducciones***. Se contempla bajo esta misma denominación a los tramos de río, canales, y cualquier otra conexión que convenga establecer. Quedan definidas por sus parámetros físicos (incluyendo capacidades máximas), y por sus posibles caudales mínimos (normalmente ecológicos). Se distingue en este grupo de conducciones tres tipos:
 - ***Tipo 1:*** Responden básicamente a la definición del párrafo anterior.
 - ***Tipo 2:*** Contemplan pérdidas por filtración en el cauce.
 - ***Tipo 3:*** Contemplan conexión hidráulica entre el río y un acuífero subyacente, y por tanto flujo del acuífero al río y viceversa, en función del estado del acuífero.
 - ***Tipo 4:*** Responden a la definición del tipo 1 con caudal máximo instantáneo función de la diferencia de cota entre la entrada y la salida de la conducción. Si en su origen o final se tiene un embalse, se considera la variación de cota a efectos de determinar el máximo que puede circular a lo largo del mes.



- **Tipo 5:** Se trata de conexiones hidráulicas entre nudos y/o embalses, para las que el caudal circulante es función de la diferencia de cota entre sus extremos. La circulación de agua puede tener lugar en ambos sentidos y se considera la variación de cota que pueda tenerse en los embalses a lo largo del mes.

- **Demandas consuntivas.** Son aquellos elementos que utilizan el agua y en los que parte de ella es consumida y por tanto se pierde para el sistema. Quedan incluidas dentro de este tipo tanto las zonas regables como las demandas urbanas e industriales. Se definen por su curva de demanda, sus parámetros de consumo, sus tomas y su conexión con algún elemento de retorno. Se admite el suministro a una misma demanda desde distintas fuentes.
- **Elementos de retorno.** Son simplemente definiciones de puntos de reintegro de agua al sistema provenientes de demandas consuntivas.
- **Demandas no consuntivas.** (centrales hidroeléctricas). Son aquellos elementos que utilizan el agua sin consumirla. Se definen mediante sus datos físicos y de producción y por su caudal mensual objetivo a utilizar.
- **Recarga artificial.** Son elementos cuyo flujo va a recargar acuíferos, utilizándose para tal fin los sobrantes. Se definen por sus características físicas.
- **Bombes adicionales.** Son elementos de captación de agua procedente de acuíferos que es incorporada al sistema superficial para su utilización en lugar distinto de la zona donde se efectúa el bombeo.
- **Acuíferos.** Quedan definidos mediante sus parámetros físicos y mediante unos parámetros de explotación, que una vez rebasados anulan las extracciones. El modelo permite contemplar varios tipos de acuíferos:
 - Acuífero depósito.
 - Acuífero unicelular.
 - Acuífero con manantial.
 - Acuífero pluricelular.
 - Acuífero conectado con río y con modelación distribuida por el método de los autovalores



- Acuífero rectangular homogéneo conectado por uno de sus lados con un río totalmente penetrante
- Acuífero rectangular homogéneo conectado por dos de sus lados contiguos con ríos totalmente penetrantes
- Acuífero con desagüe a tres niveles distintos: se trata de un modelo simplificado que permite considerar la conexión con dos niveles distintos de aguas superficiales y la evapotranspiración variable a lo largo del año.
- Acuífero modelado por el método de los autovalores sin limitaciones de geometría ni parámetros hidrodinámicos.

Al ser un modelo complejo para llevarlo a cabo en un nivel de licenciatura se utilizó el modelo de gestión que fue elaborado por Pardo-Loaiza (2016) con modificaciones hechas con base en el modelo de precipitación-escorrentía ya que se contemplaron periodos de tiempo y criterios de selección de datos diferentes, además de la modificación de los parámetros físicos, volúmenes, cotas y tasa de evaporación para los embalses que contiene el modelo.

6.7.2 Calibración del modelo SIMGES

El modelo de gestión una vez terminado y modificado con los valores obtenidos del modelo hecho en EvalHID y de acuerdo al periodo de tiempo seleccionado, se debe calibrar para que los resultados se acerquen a la realidad y sean lo más fiables posibles, partiendo de los datos de entrada, de los parámetros estimados y de los criterios aplicados.

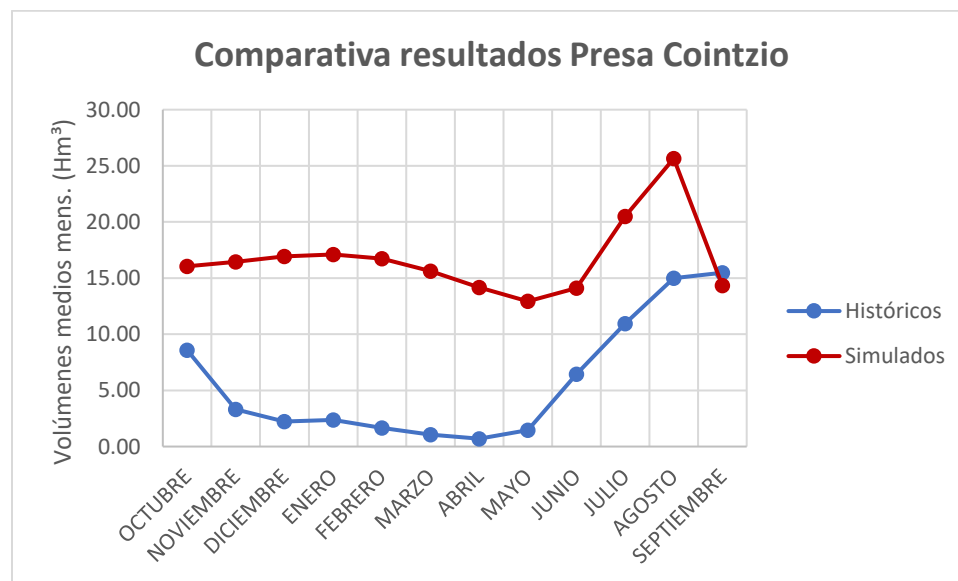
La calibración se lleva a cabo de manera manual directamente en el software, haciendo un proceso de modificación de valores en los datos físicos (coeficientes A, B y C) y los parámetros de gestión (volúmenes máximos, objetivo y mínimos), para de esta manera realizar la simulación y conocer el comportamiento de los volúmenes en los embalses, con estos valores obtenemos los volúmenes medios simulados para hacer una comparativa (gráficas 1 y 2) contra los volúmenes medios históricos, los cuales se obtienen de las estaciones hidrométricas que se encuentran antes de que se presente un régimen alterado del río con una demanda o una aportación, en el caso del presente modelo se escogieron las estaciones hidrométricas situadas antes de las presas Malpaís y Cointzio.



Una vez capturados los datos que resultan de la simulación y los datos históricos, se comparan de manera visual en una gráfica, además de calcular el error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés), el cual permitirá medir la cantidad de error que hay entre los dos conjuntos. De esta manera, los datos que presenten un RMSE que tienda a cero y que visualmente en las gráficas los volúmenes se vean casi superpuestos, indican que el modelo se ha calibrado, sus parámetros se han ajustado lo mejor posible para el periodo de datos registrado y los resultados obtenidos son los que mejor representan el comportamiento del río.

El realizar una calibración manual no permite conocer cuándo se ha alcanzado el mejor ajuste posible en el modelo, por lo tanto, no se sabe con exactitud cuando dar por terminado el proceso de calibración, ya que todo este proceso está basado en criterios subjetivos y que para un mismo modelo puede haber diferentes combinaciones de parámetros que pueden llegar a ser mejores con base a una mayor experiencia.

Gráfica 1. Resultados del modelo sin calibrar en la presa de Cointzio con un RMSE= 11.83.



Gráfica 2. Resultados del modelo calibrado en la presa de Cointzio con un RMSE= 2.46.

6.8 Restitución a Régimen Natural

El Ministerio de Medio Ambiente de España (2000) menciona que la restitución de los caudales de los ríos y drenajes de acuíferos consiste en estimar su régimen natural (que es el que define los recursos existentes) a partir del régimen alterado, que es el que puede observarse y medirse. Para estimar ese régimen natural es preciso conocer las detracciones de agua de los ríos y acuíferos, los retornos al río, la gestión de los embalses, así como las evaporaciones y filtraciones que en ellos puedan producirse, las transferencias artificiales entre cuencas, etc. En suma, se necesita disponer de información sobre la evolución en el tiempo de todas las intervenciones humanas significativas que se han producido en la cuenca.

Los retornos del agua derivada, que son aún menos conocidos cuantitativamente, dependen del tipo de uso y de la distancia del punto de utilización a los de toma y retorno. El retorno de agua superficial a los ríos se produce con un desfase respecto a la toma usualmente de horas o días, pero que puede llegar a ser del orden de un mes. Si el retorno se produce a través de los acuíferos, el desfase suele ser mucho mayor, incluso de años. Esto es importante a la hora de interpretar los datos de caudales históricos registrados en las estaciones de aforo de los ríos y, en particular, los de caudales bajos cuando están influidos por derivaciones de riego de cuantía desconocida. Lo mismo sucede cuando se producen bombeos de agua



subterránea de cuantía y distribución temporal desconocida en acuíferos aluviales pequeños, que pueden influir de forma rápida en los caudales del río.

En definitiva, el nivel de alteración antrópica es a veces tan intenso y complejo que resulta prácticamente imposible restituir los caudales naturales, con cierta fiabilidad, a partir del imperfecto conocimiento de las afecciones producidas. En estos casos, frecuentes en los cursos bajos de los ríos, puede recurrirse a modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía que, razonablemente calibrados, permitan estimar las condiciones naturales de la cuenca. Una adecuada combinación de distintos métodos y aproximaciones, según las circunstancias de cada caso, será la clave del éxito para atacar el problema de forma satisfactoria.

Restituir los caudales naturales históricos y obtener valores de aportaciones en régimen natural es una tarea de la mayor importancia para el conocimiento de los recursos hídricos y para la planificación hidrológica, pudiendo decirse que, en nuestros días, todavía está sujeta a algunas incertidumbres relativamente importantes, que no pueden ignorarse por esta planificación.

Para realizar la Restitución a Régimen Natural de los principales afluentes de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, se parte del modelo elaborado en SIMGES para obtener así los volúmenes en los embalses con los que se calibrará y también los volúmenes en el lago. Una vez calibrado el modelo se procede a eliminar todas las demandas existentes las cuales producen una alteración en los ríos, además de no establecer un volumen fijo en los embalses de las presas de Cointzio y Malpaís, esto con la finalidad de asemejar todo a un escurrimiento sin afectaciones, tal y como se daría de manera natural.

Teniendo ya el modelo en Régimen Natural se pueden observar los volúmenes que tiene el Lago de Cuitzeo y hacer una comparativa para posteriormente realizar el siguiente estudio.

6.9 Índices de Alteración Hidrológica (IAH)

Partiendo de la comparativa de los modelos de gestión (SIMGES), se aplican los Índices de Alteración Hidrológica en Ríos (IAH), método desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) por Carolina Martínez Santa-María y José Anastasio Fernández Yuste, para conocer el grado de alteración hidrológica mediante



parámetros que valoran aspectos hidrológicos del régimen con marcada trascendencia ambiental y con índices, los cuales son la relación entre los valores del mismo parámetro, uno en un régimen natural y otro en régimen alterado, que permiten cuantificar las diferencias entre el estado de referencia (régimen natural) y cualquier otro (régimen alterado), dichos índices están basados en los IAHRIS desarrollados por Richter et al. (1996) los cuales toman datos diarios y mensuales a diferencia de los IAH que se aplicarán en este estudio, que toman solamente datos mensuales.

Dentro de la metodología de los IAH se debe entender que un régimen de caudales es natural cuando sus características: magnitud, frecuencia, estacionalidad, duración y tasas de cambio no están sensiblemente alteradas por la acción del hombre y que un régimen alterado es cuando el hombre ha modificado el natural mediante regulación, detracción y/o incorporación de caudales.

6.9.1 Criterios utilizados para seleccionar los parámetros

Los parámetros permiten caracterizar el régimen hidrológico, tanto natural como alterado, en un punto de un río. Estos parámetros valoran aspectos hidrológicos del régimen con marcada trascendencia ambiental como lo son las sequías (valores extremos mínimos), avenidas (valores extremos máximos) y los valores habituales.

La vinculación de esos aspectos del régimen con factores clave del ecosistema fluvial puede sintetizarse en:

- Magnitud: ya que determina la disponibilidad general de agua en el ecosistema.
- Frecuencia con la que un evento se produce en un intervalo de tiempo dado: indicativa de la variabilidad en el régimen de caudales y condicionante de la dinámica geomorfológica y ecológica, y por ende de la diversidad.
- Duración o intervalo de tiempo asociado con unas determinadas condiciones de flujo: en situaciones extremas, avenidas y sequías, la duración está íntimamente ligada a los umbrales de resiliencia de las diferentes especies.
- Estacionalidad o regularidad con la que ese evento acontece en una época determinada del año: es un aspecto vinculado estrechamente y en sincronía con los ciclos de vida de las especies (fluviales, de estuarios y marinas).



- Tasas de cambio: referente a la rapidez con la que se producen los cambios de unas magnitudes a otras, afectando a la capacidad de respuesta de la biota.

Por tanto, el proceso de caracterización del régimen de caudales debe contemplar esos cinco aspectos, y debe hacerlo atendiendo tanto a los valores medios o habituales, como determinantes de la disponibilidad general de agua en el ecosistema, como a los valores extremos –avenidas y sequías-, al definir éstos las condiciones más críticas que soporta el ecosistema, y considerando la variabilidad tanto interanual como estacional. La tabla 17 resume, para cada componente del régimen, los aspectos considerados y el parámetro propuesto para su caracterización.

Con esta batería de parámetros (cuatro para los valores habituales, ocho para las avenidas y siete para las sequías) puede obtenerse una caracterización cuantitativa del régimen que recoge los aspectos con mayor significación y repercusión ambiental. Esa caracterización puede obtenerse para cualquier régimen del que se disponga de información suficiente, ya sea natural o alterado bien como resultado real de un aprovechamiento y/o regulación o resultado de una simulación como respuesta a distintos escenarios de gestión.

Tabla 17. Resumen de parámetros IAH.

COMPONENTE DEL RÉGIMEN	ASPECTO	PARÁMETRO
VALORES HABITUALES	APORTACIONES ANUALES Y MENSUALES	MAGNITUD
		Media de las aportaciones anuales
		Por tipo de año
		Año húmedo Año medio Año seco
		AÑO PONDERADO (P1)
	VARIABILIDAD	Diferencia entra la aportación mensual y mínima en el año
		Por tipo de año
VALORES EXTREMOS	CAUDALES DIARIOS	VARIABILIDAD
		ESTACIONALIDAD
	VALORES MÁXIMOS de caudales diarios (AVENIDAS)	MAGNITUD Y FRECUENCIA
	VALORES MÍNIMOS de caudales diarios (AVENIDAS)	DURACIÓN
	VALORES MÍNIMOS de caudales diarios (AVENIDAS)	ESTACIONALIDAD



En cuanto al cálculo de los indicadores, este método establece las siguientes pautas:

- En la mayoría de los casos, se determina el indicador como la media aritmética de los valores de los cocientes de parámetros (en régimen natural y régimen alterado) para cada año.
- Los indicadores están comprendidos entre 0 y 1, representando el 0 la alteración total, y el 1 el estado inalterado. En los casos en los que el valor del indicador sea superior a 1, se cambia este valor por su inverso.

6.9.2 Descripción de los parámetros e indicadores

A continuación, se describen los parámetros implementados para la evaluación de la alteración hidrológica en el presente estudio, basados en los IAHRIS y como se determinarán los indicadores de alteración hidrológica (IAH) a partir de dichos parámetros.

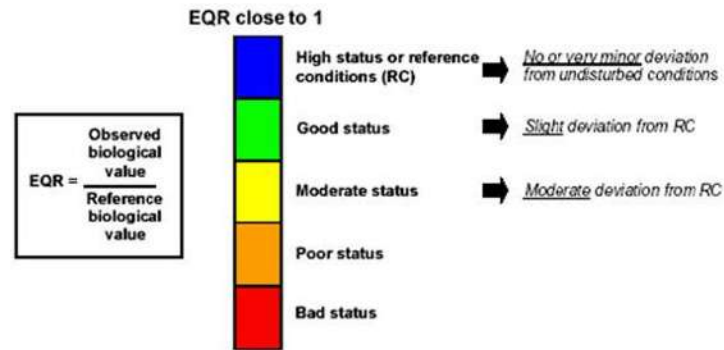
En la tabla 18 se muestran los 12 indicadores IAH que se utilizarán para evaluar la alteración hidrológica, junto con el parámetro a partir del que se obtienen.

Tabla 18. Resumen de los indicadores utilizados IAH (Ortín, 2017).

CLASIFICACIÓN	ASPECTO	CÓDIGO	NOMBRE	PARÁMETRO
VALORES HABITUALES	Magnitud	IAH1	Índice de Magnitud de las aportaciones anuales	Media de las aportaciones anuales
		IAH2	Índice de Magnitud de las aportaciones mensuales	Media de las aportaciones mensuales
	Variabilidad	IAH3	Índice de Variabilidad habitual	Q10-Q90
		IAH4	Índice de Variabilidad extrema	Diferencia entre la aportación mensual máxima y mínima
	Estacionalidad	IAH5	Índice de Estacionalidad de máximos	Mes de máxima aportación al año
		IAH6	Índice de Estacionalidad de mínimos	Mes de mínima aportación al año
VALORES EXTREMOS MÁXIMOS	Magnitud	IAH7	Índice de Magnitud de las avenidas habituales	Caudal de avenida habitual (Q5)
	Variabilidad	IAH8	Índice de Variabilidad de las avenidas habituales	Coefficiente de variación de la serie de avenidas habituales
	Estacionalidad	IAH9	Índice de Estacionalidad de avenidas	Número de años con Q>Q5 para cada mes
VALORES EXTREMOS MÍNIMOS	Magnitud	IAH10	Índice de Magnitud de las sequías habituales	Caudal de sequía habitual (Q95)
	Variabilidad	IAH11	Índice de Variabilidad de las sequías habituales	Coefficiente de variación de la serie de sequías habituales
	Estacionalidad	IAH12	Índice de Estacionalidad de sequías	Número de años con Q>Q95 para cada mes

El método de los IAH atendiendo a las recomendaciones del CIS-WDF (2003) referentes a los EQR (figura 33), muestra que la mayor parte de los índices de alteración se han definido como cociente entre el valor del parámetro en régimen alterado y el valor de ese mismo parámetro en régimen natural.

Figura 33. Recomendación del CIS-WDF para los Ecological Quality Ratios.



Como lo contemplan los IAH, los indicadores tendrán un valor comprendido entre 0 y 1, siendo 0 la alteración total y 1 el estado inalterado. En el caso en el que el valor del indicador sea superior a 1, se cambiará por su valor inverso. En la siguiente tabla se muestran los distintos estados en los que se clasificarán los indicadores según su valor tras la evaluación. El nivel 1 se corresponde con un muy buen estado, el nivel 2 con un buen estado, el nivel 3 con un estado moderado, el nivel 4 con un estado deficiente y el nivel 5 con un estado malo (Ortín, 2017).

Tabla 19. Estados de alteración según el valor del indicador.

Estatus Hidrológico				
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
$1 < \text{IAH} < 0.8$	$0.8 < \text{IAH} < 0.6$	$0.6 < \text{IAH} < 0.4$	$0.4 < \text{IAH} < 0.2$	$0.2 < \text{IAH} < 0$

- IAH1. Índice de Magnitud de las aportaciones anuales.

Cociente entre la media de las aportaciones anuales en régimen natural y en régimen alterado. De la misma forma que para el resto de indicadores relativos a los valores habituales, se determinan tres indicadores, uno para los años húmedos, otro para los medios y otro para los secos, a partir de los cuales se determina el indicador total, mediante una media ponderada. Este procedimiento fue descrito en el apartado en el que se describe el método IAHRIS (4.1.2). En los siguientes indicadores se obvia este comentario, pero es válido para todos los indicadores relativos a los valores habituales.

- IAH 2. Índice de Magnitud de las aportaciones mensuales.



Cociente entre la media de las aportaciones mensuales para cada mes del año en régimen natural y en régimen alterado. Se determina un valor para cada mes, siendo el indicador la media de los 12 meses.

- IAH 3. Índice de Variabilidad habitual.

A partir de la curva de caudales clasificados construida con las aportaciones mensuales, se determina por la diferencia entre los valores de los percentiles 10 y 90, tanto para régimen natural como alterado, y se calcula su cociente.

- IAH 4. Índice de Variabilidad extrema.

Cociente de la diferencia entre las aportaciones mensuales máxima y mínima, para régimen natural como alterado.

- IAH 5. Índice de Estacionalidad de máximos.

Se determina el número de meses de desfase entre los meses de máxima aportación del año para régimen natural y alterado, siendo 6 el máximo desfase posible. El indicador se calcula con la siguiente fórmula:

$$IAH5 = 1 - \frac{n^{\circ} \text{ meses de desfase}}{6}$$

- IAH 6. Índice de Estacionalidad de mínimos.

Se determina el número de meses de desfase entre los meses de mínima aportación del año para régimen natural y alterado, siendo 6 el máximo desfase posible. El indicador se calcula con la siguiente fórmula:

$$IAH6 = 1 - \frac{n^{\circ} \text{ meses de desfase}}{6}$$

- IAH 7. Índice de Magnitud de las avenidas habituales.

Cociente de los caudales de avenida habitual (que se establece en Q5, de acuerdo al método IAHRIS) en régimen natural y régimen alterado. La curva de caudales clasificados se construye a partir de los datos de caudales medios mensuales de todo el periodo.



- IAH 8. Índice de Variabilidad de las avenidas habituales

Cociente de los coeficientes de variación de los caudales de avenida habitual en régimen natural y régimen alterado.

- IAH 9. Índice de Estacionalidad de avenidas.

Para cada mes, se determina el número de años que el caudal medio mensual supera al caudal de avenida habitual, tanto para régimen natural como régimen alterado. El indicador mensual se calcula a partir de la diferencia entre ambos valores, estableciendo que si esta supera el valor de 5, el indicador es 0. El indicador total se corresponde con la media de los 12 valores mensuales.

$$IAH9mensual = \frac{5 - ABS(Natural - Alterado)}{5}$$

- IAH 10. Índice de Magnitud de las sequías habituales.

Cociente de los caudales de sequía habitual (que se establece en Q95, de acuerdo al método IAHRIS) en régimen natural y régimen alterado. La curva de caudales clasificados se construye a partir de los datos de caudales medios mensuales de todo el periodo.

- IAH 11. Índice de Variabilidad de las sequías habituales.

Cociente de los coeficientes de variación de los caudales de sequía habitual en régimen natural y régimen alterado.

- IAH 12. Índice de Estacionalidad de sequías.

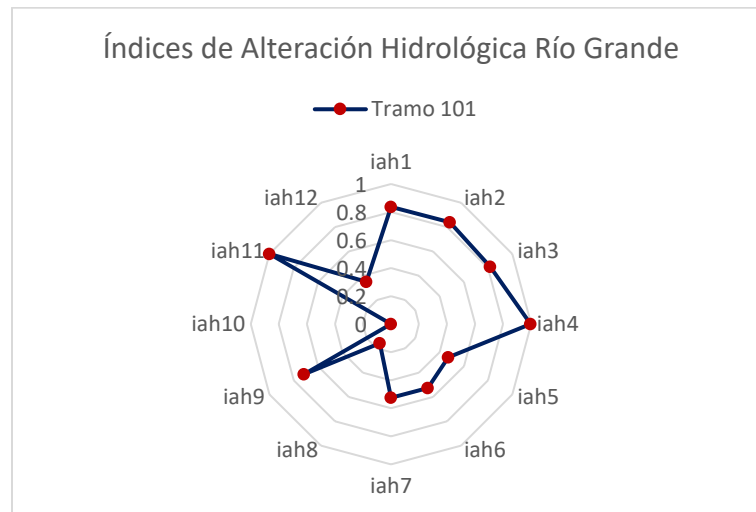
Para cada mes, se determina el número de años que el caudal medio mensual es inferior al caudal de sequía habitual, tanto para régimen natural como régimen alterado. El indicador mensual se calcula a partir de la diferencia entre ambos valores, estableciendo que, si esta supera el valor de 5, el indicador es 0. El indicador total se corresponde con la media de los 12 valores mensuales.

$$IAH12mensual = \frac{5 - ABS(Natural - Alterado)}{5}$$



Para facilitar la interpretación de los IAH se elabora una gráfica radial que nos permita ver simultáneamente los valores de los índices implicados en el aspecto evaluado. Con esta gráfica, se permite apreciar con facilidad que tan cerca o lejos está el valor actual que alcanza cada IAH.

Figura 34. Diagrama radial para la representación conjunta de los IAH.

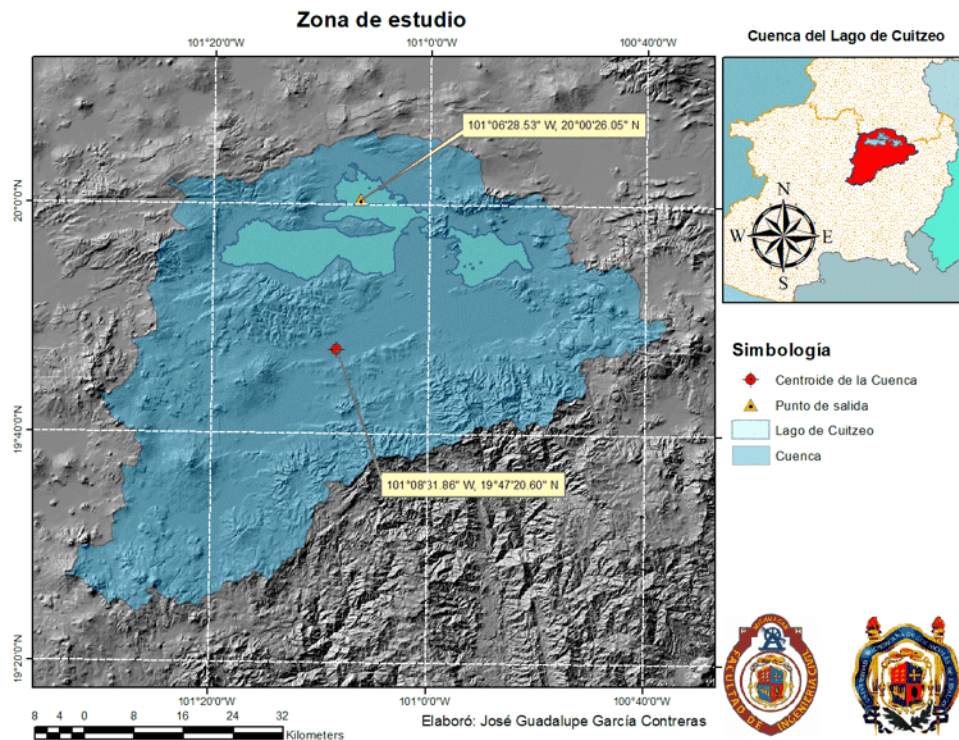


7. RESULTADOS

7.1 Resultados generales

La zona de estudio fue delimitada mediante la utilización del software ArcGIS, donde se obtiene la siguiente información:

Figura 35. Cuenca del Lago de Cuitzeo.



La Cuenca del Lago de Cuitzeo es de tipo endorreico, teniendo su punto de salida dentro del lago en las coordenadas 101°06'28.53" W, 20°00'26.05" N, lo cual indica que sus únicas salidas de agua son por medio de infiltración hacia el subsuelo o por evaporación, tiene una superficie de 4003.30 km². Pertenece a la región hidrológica 12 (RH-12) Lerma-Santiago y a la subregión hidrológica Alto-Lerma.

Su superficie se encuentra mayormente en el estado de Michoacán y una pequeña porción en el estado de Guanajuato, de los cuales abarca 23 y 5 municipios respectivamente.

Sus principales afluentes son el Río Grande de Morelia y el Río Queréndaro y dentro de la cuenca se observan pequeños cuerpos de agua como lo son las presas de Cointzio,



Malpaís; la laguna de Queréndaro y algunos manantiales que se forman eventualmente cuando se presentan grandes avenidas.

7.2 Estaciones climatológicas

Para comenzar el análisis de la zona de estudio, se realiza una preselección de estaciones climatológicas, siendo un total de 88 estaciones a verificar y validar para así seleccionar las más completas, ya que en los registros históricos tanto de precipitaciones como de temperatura contienen vacíos y errores que deben ser corregidos, esta corrección se realiza mediante el uso del software GESTAD para poder obtener una serie de datos confiable.

La información de las 88 estaciones elegidas se ingresa al software GESTAD con base en un criterio de discretización (tabla 20) el cual nos permite conocer el periodo histórico de registro y el porcentaje de años efectivos (tabla 21), una vez procesada esta información; se les aplican pruebas de homogeneidad, tendencia y persistencia, siguiendo un criterio estricto para su selección de que pasaran 7 de 8 pruebas en las que solo 42 estaciones climatológicas son útiles (tabla 22 y figura 36).

Tabla 20. Criterio de discretización para selección de estaciones climatológicas.

CRITERIO DE DISCRETIZACIÓN			
Máximo de datos faltantes			
Días		Meses	
Secos	Húmedos	Secos	Húmedos
10	0	2	0

Tabla 21. Periodo histórico de información y % de años efectivos de la est. clim.

N°	Clave	Año inicial	Año final	Años totales	Meses totales	Años efectivos	% Años efectivos
1	16127	1961	1998	38	450	37.33	0.9824
2	16081	1947	2015	69	822	67.42	0.9771
3	16116	1969	1991	23	270	22.42	0.9748
4	16020	1959	2006	48	575	46.5	0.9688
5	16120	1953	2007	55	647	53.17	0.9667
6	16100	1947	1993	47	553	45.42	0.9664
7	16052	1941	2015	75	891	72.42	0.9656
8	16152	1922	1988	67	796	64.58	0.9639
9	16050	1948	2014	67	795	64.58	0.9639
10	16133	1969	2015	47	556	45.25	0.9628
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.



Tabla 22. Estaciones climatológicas que pasaron 7 de 8 pruebas.

PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD, PERSISTENCIA Y TENDECIA									
No. Estación	T-Student	Cramer	Bartlett	P. de regreción	Spearman	Mann Kendall	L. Anderson	Wald-wolfowitz	
1	11002	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
2	11010	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
3	11027	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
4	11076	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
5	11114	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
6	16004	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
7	16012	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Existe Tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
8	16017	Homogenea	Homogenea	No Homogen	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
9	16020	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
10	16022	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
11	16023	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
12	16027	Homogenea	No Homogen	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
13	16049	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	Existe tendensia	Independiente	Independiente
14	16050	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
15	16057	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
16	16080	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
17	16081	No Homogen	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
18	16086	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
19	16087	Homogenea	Homogenea	No Homogen	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
20	16100	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
21	16104	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
22	16107	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
23	16109	Homogenea	No Homogen	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
24	16116	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
25	16120	Homogenea	Homogenea	No Homogen	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
26	16123	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
27	16127	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
28	16133	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
29	16135	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
30	16139	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
31	16140	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
32	16142	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
33	16147	Homogenea	No Homogen	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
34	16155	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
35	16159	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
36	16213	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
37	16225	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
38	16230	Homogenea	Homogenea	No Homogen	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
39	16234	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Dep. a 1 años	Independiente
40	16235	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
41	16245	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente
42	16248	No Homogen	Homogenea	Homogenea	Sin tendencia	Sin tendencia	sin tendencia	Independiente	Independiente



Figura 36. Estaciones validadas por GESTAD.



7.2.1 Selección de estaciones principales.

Determinadas las estaciones climatológicas para trabajar se seleccionan las estaciones principales que serán llenadas con los datos de las 42 estaciones ya elegidas. La selección de las estaciones principales se lleva a cabo mediante el uso del software GESTAD dando un porcentaje de peso a factores que tienen influencia en la zona de estudio (tabla 23), estos son: distancia, total de años (periodo de registro), años efectivos y último año de registro, dando como resultado un total de 21 estaciones principales (tabla 24 y figura 37) para hacer el llenado de datos faltantes.

Tabla 23. Porcentaje de peso para selección de estaciones principales.

PORCENTAJE DE PESO INGRESADO EN GESTAD					No. Estaciones principales
Distancia	Años	Años efectivos	Año último		
25%	25%	40%	10%		21

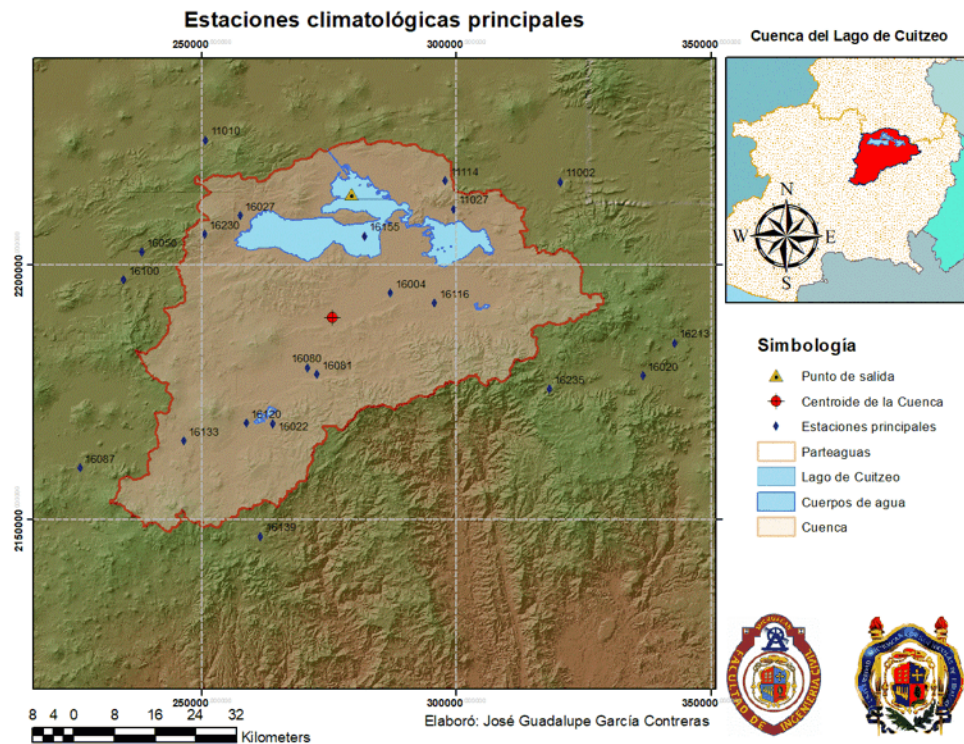


Siendo las siguientes estaciones climatológicas las que fueron seleccionadas para ser llenadas con los datos de las 21 estaciones restantes:

Tabla 24. Estaciones principales para la zona de estudio.

No.	CLAVE	ESTACIÓN NOMBRE	COORDENADAS UTM		
			X	Y	ALTITUD
1	11002	ACAMBARO, ACAMBARO	320407.831	2216158.021	1883
2	11010	CERANO, YURIRIA	250755.187	2224395.478	1975
3	11027	IRAMUCO, ACAMBARO (SMN)	299419.551	2210850.244	1925
4	11114	EL REFUGIO, ACAMBARO	297738.680	2216405.270	2081
5	16004	ALVARO OBREGON, (SMN)	287007.547	2194388.067	590
6	16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	336572.180	2178111.130	2060
7	16022	COINTZIO, MORELIA	263963.910	2168841.710	2067
8	16027	CUITZEO, CUITZEO	257524.326	2209533.801	1867
9	16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	238219.164	2202426.995	2069
10	16080	MORELIA, MORELIA (SMN)	270818.900	2179758.400	1912
11	16081	MORELIA, MORELIA (DGE)	272579.600	2178474.700	1908
12	16087	PATZCUARO, PATZCUARO	226082.170	2160051.540	2140
13	16100	PUENTE SAN ISIDRO,	234644.224	2196942.411	2061
14	16116	SAN SEBASTIAN,QUERENDARO	295716.976	2192439.997	1840
15	16120	SANTIAGO UNDAMEO,MORELIA	258716.932	2168911.822	2025
16	16133	TURICATO, TURICATO	246422.526	2165389.956	2100
17	16139	VILLA MADERO, MADERO	261493.800	2146658.200	2097
18	16155	COPANDARO, JIMENEZ	281905.606	2205522.623	1980
19	16213	IRIMBO, CIUDAD HIDALGO	342795.492	2184579.639	2315
20	16230	LAS CRUCES, PURUANDIRO	250492.208	2205940.358	2374
21	16235	HUAJUMBARO, CD. HIDALGO	318247.480	2175588.508	2414

Figura 37. Mapa de estaciones climatológicas principales.



Estas 21 estaciones climatológicas estaban pensadas para que formaran parte del modelo de Precipitación-Escorrentía, pero debido a que no todas coincidían con el mismo periodo de registro se hizo una discretización aun mayor basada en varios criterios, el que requiere el modelo de Témez y el criterio que menciona Aparicio y estos hacerlos abarquen el periodo de registro de las series de datos que se tienen de las estaciones hidrométricas.

El criterio tomado de EvalHID dice que se debe utilizar una serie de datos que tenga al menos 15 años para calibrar el modelo de Témez y si existe la posibilidad, 10 años para realizar la validación del modelo y Aparicio menciona mediante una gráfica (gráfica 3) que se deben utilizar un número mínimo de estaciones para una cierta área de la cuenca, de dicha gráfica se elige que para una superficie de 4000 Km² y un escurrimiento medio anual de 15 cm/año con un número de tormentas entre 30 y 45 para lo que se deben utilizar como mínimo 8 estaciones.

Uniendo todos estos criterios se decide tomar como estaciones climatológicas para el MPE un total de 13 estaciones para tener una holgura de datos y proceder con la modelación.



Gráfica 3. Número mínimo de estaciones climatológicas para calcular la precipitación (Aparicio, 1997).

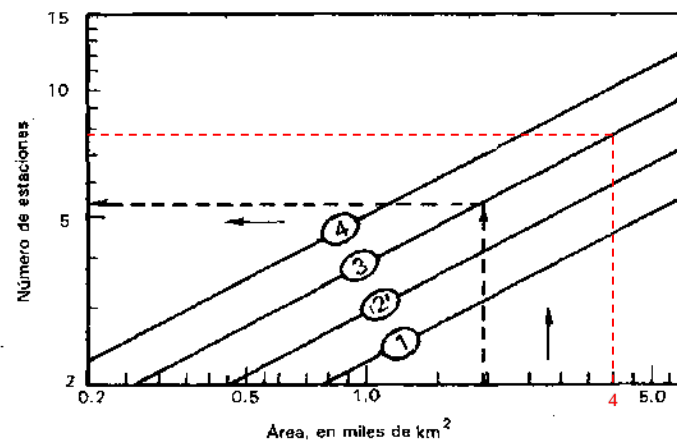


Tabla 25. Selección de curva para No. mín. de est. climatológicas (Aparicio, 1997).

Esc. Medio anual, cm/año	Días de tormenta por año		
	<30	30-45	>45
>15	curva 1	curva 2	curva 3
≤15	curva 2	curva 3	curva 4

Dando como resultado la siguiente lista de estaciones climatológicas a emplear para el MPE:

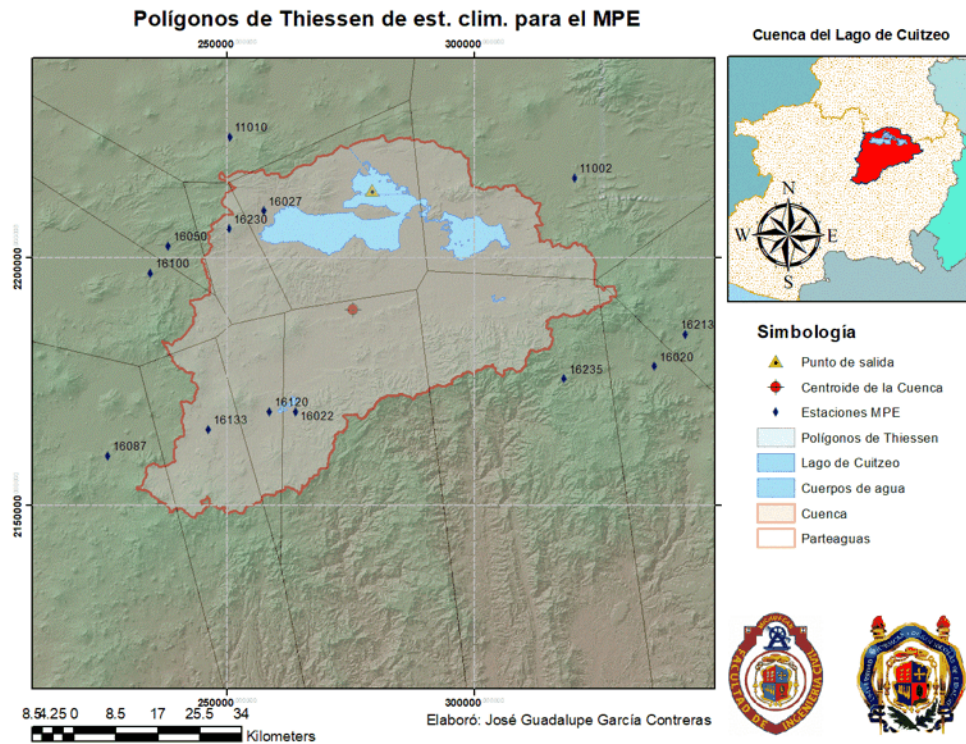
Tabla 26. Estaciones climatológicas a emplear para el MPE.

No.	CLAVE	ESTACIÓN NOMBRE	COORDENADAS UTM		
			X	Y	ALTITUD
1	11002	ACAMBARO, ACAMBARO	320407.831	2216158.021	1883
2	11010	CERANO, YURIRIA	250755.187	2224395.478	1975
3	16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	336572.180	2178111.130	2060
4	16022	COINTZIO, MORELIA	263963.910	2168841.710	2067
5	16027	CUITZEO, CUITZEO	257524.326	2209533.801	1867
6	16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	238219.164	2202426.995	2069
7	16087	PATZCUARO, PATZCUARO	226082.170	2160051.540	2140
8	16100	PUENTE SAN ISIDRO,	234644.224	2196942.411	2061
9	16120	SANTIAGO UNDAMEO,MORELIA	258716.932	2168911.822	2025
10	16133	TURICATO, TURICATO	246422.526	2165389.956	2100
11	16213	IRIMBO, CIUDAD HIDALGO	342795.492	2184579.639	2315
12	16230	LAS CRUCES, PURUANDIRO	250492.208	2205940.358	2374
13	16235	HUAJUMBARO, CD. HIDALGO	318247.480	2175588.508	2414

Figura 38. Estaciones climatológicas seleccionadas para el MPE de EvalHID.



Figura 39. Polígonos de Thiessen de las 13 estaciones seleccionadas.





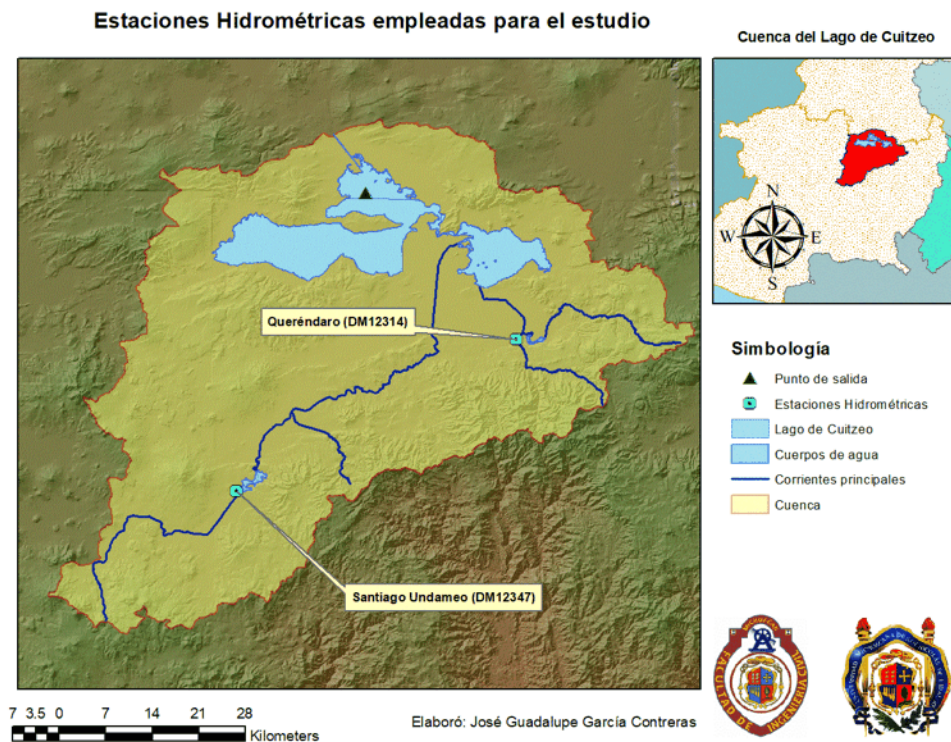
Las 13 estaciones seleccionadas abarcan un periodo de registro histórico de mayo de 1981 a noviembre de 2006, periodo que se adaptará a los datos que tengan las estaciones hidrométricas para poder realizar los modelos de EvalHID y GESTAD y en la figura anterior se muestra su área de influencia de acuerdo a los polígonos de Thiessen.

7.3 Estaciones Hidrométricas

En la zona de estudio existen siete estaciones hidrométricas, de las cuales sólo se utilizaron dos (figura 40), dado que son las únicas que se encuentran con datos que no presentan afectación por extracción o aportación, es decir, que se encuentran en un régimen natural, las estaciones elegidas son:

- Estación hidrométrica con clave DM12347, y nombre “SANTIAGO UNDAMEO”, localizada sobre el río Grande de Morelia, muy cerca de la cola del embalse de la presa Cointzio y aguas abajo de la confluencia de los arroyos Tiripetío y Tirio, en las cercanías del poblado de Santiago Undameo, dentro del municipio de Morelia y cuenta con un periodo de registro de 17 años, de 1985 a 2002.
- Estación hidrométrica con clave DM12314, y nombre “QUERÉNDARO”, Se encuentra ubicada sobre el río Queréndaro, en el cruce de éste con el camino que va a Queréndaro a partir de la ciudad de Morelia, aguas arriba del embalse de la propia presa, en el municipio de Queréndaro del estado de Michoacán y cuenta con un periodo de registro de 51 años, de 1936 a 1987.

Figura 40. Estaciones hidrométricas empleadas para los modelos de EvalHID y SIMGES.



7.4 Modelación y calibración del MPE en EvalHID

Para llevar a cabo el modelo completo de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, se realizaron primeramente dos modelos, uno para la subcuenca de Cointzio y otro para la subcuenca de Queréndaro, ya que son las únicas subcuencas que se pueden calibrar, tomando como punto de salida las estaciones hidrométricas DM12347 y DM12314 respectivamente para cada subcuenca y de manera posterior, obtener los valores de los parámetros de Témez y realizar una asignación de dichos parámetros a las demás subcuencas con apoyo de un análisis multivariante para conformar así el MPE general de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Para elaborar los modelos se requieren los datos de manera mensual con la información climática que es la precipitación, la evapotranspiración y la temperatura; además de la información morfológica de la cuenca (shapes de las microcuencas, subcuencas, cuenca y sus puntos de salida) que se obtiene con ArcGIS y para la calibración se requiere la información de las estaciones hidrométricas que son los datos observados, estos permitirán ajustar los parámetros de Témez para que el modelo se aproxime lo más posible a la realidad.

7.4.1 Modelación de la subcuenca de Cointzio

Dado que el MPE de Témex es un modelo denominado como semiagregado y realiza una valoración global, limita su aplicación a las cuencas pequeñas o intermedias, por esta razón se subdivide la subcuenca de Cointzio, dando como resultado un total de 19 microcuencas (figura 41), cuya información es la siguiente:

Figura 41. Subcuenca de Cointzio.

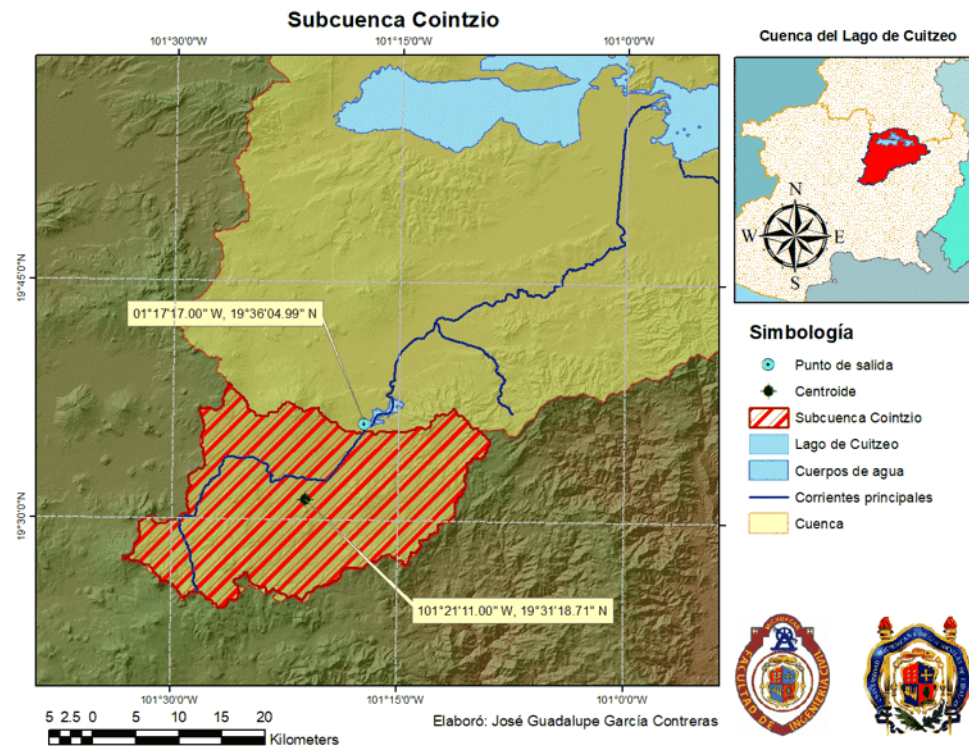


Tabla 27. Estaciones climatológicas para la subc. de Cointzio.

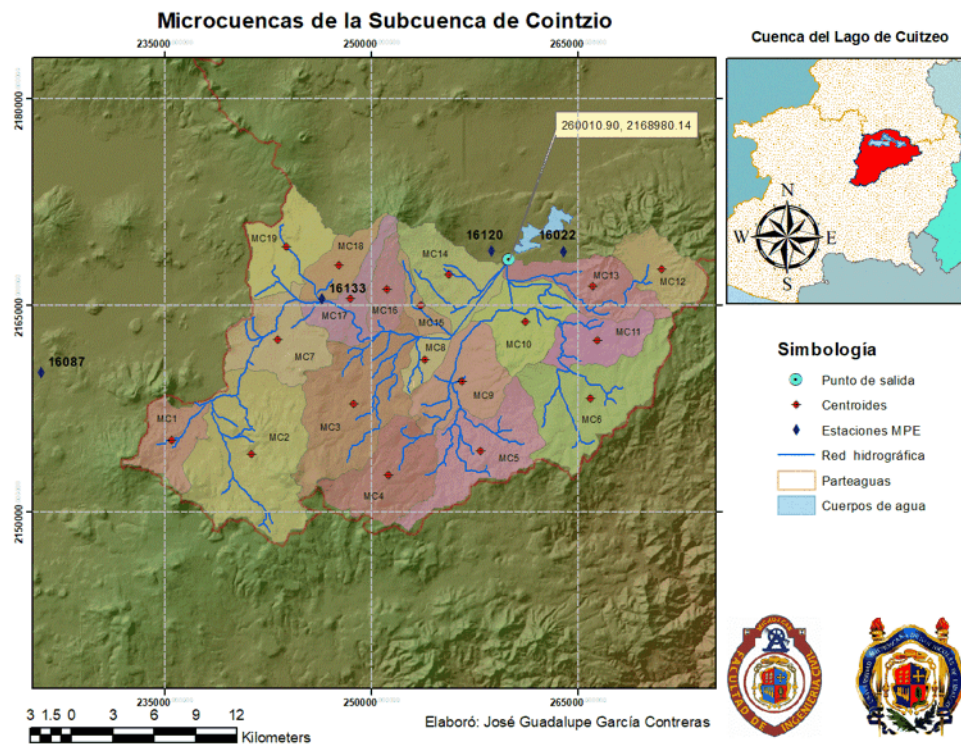
ESTACIÓN CLIM.	NOMBRE	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	AÑOS EFECTIVOS
16022	COINTZIO, MORELIA	01/01/1969	01/01/1990	21
16087	PATZCUARO, PATZCUARO	01/01/1969	01/01/1990	21
16120	SANTIAGO UNDAMEO, MORELIA	01/01/1969	01/01/1990	21
16133	TURICATO, TURICATO	01/01/1969	01/01/1990	21

Las estaciones climatológicas se eligieron para ambos modelos de acuerdo a los polígonos de Thiessen cuyas áreas influyen en cada subcuenca.

Tabla 28. Estación hidrométrica para la subc. de Cointzio.

ESTACIÓN HIDRO.	NOMBRE	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	AÑOS EFECTIVOS	CORRIENTE	CUENCA	ESTADO
DM12347	SANTIAGO UNDAMEO	01/01/1969	01/01/1990	21	RIO GRANDE DE MORELIA	LAGO DE CUITZEO	MICHOACÁN

Figura 42. División de la subcuenca de Cointzio para el MPE de Témex.



En el modelo de la subcuenca de Cointzio se colocó como punto de desagüe superficial la ubicación de la estación hidrométrica DM12347 (punto de salida, figura 42) para obtener la esorrentía de todas las microcuencas en ese punto.

Para trasladar la información de las estaciones climatológicas a los centroides de las microcuencas (tabla 29), se utilizó el software GESTAD (figura 43) con el cual se obtuvieron las precipitaciones y las evapotranspiraciones en cada uno de estos centroides para ser ingresados posteriormente al generador de datos de EvalHID (hoja de Macros Excel) que permitirá ingresar esa información al calibrador.



Tabla 29. Coordenadas de los centroides de la subc. de Cointzio.

NOMBRE	COORDENADAS (UTM)		
	X	Y	Z
MC1	235512.97	2155219.58	2466.00
MC2	241320.70	2154165.81	2570.00
MC3	248718.98	2157833.19	2263.00
MC4	251258.51	2152674.26	2586.00
MC5	257949.81	2154427.68	2259.00
MC6	265917.95	2158249.77	2235.00
MC7	243233.81	2162477.67	2140.00
MC8	253888.43	2161017.28	2020.00
MC9	256615.95	2159457.95	2047.00
MC10	261167.62	2163810.07	2097.00
MC11	266432.35	2162452.83	2160.00
MC12	271073.17	2167619.65	2307.00
MC13	266054.87	2166347.56	2164.00
MC14	255637.57	2167201.13	2092.00
MC15	253597.61	2164971.00	2130.00
MC16	251126.69	2166134.65	2247.00
MC17	248516.89	2165444.77	2124.00
MC18	247644.91	2167900.74	2211.00
MC19	243859.43	2169215.79	2176.00

Figura 43. Ventana del software GESTAD para el traslado de datos a los centroides.

Cargar Datos

Cargar Centroides

Cargar Estaciones

Cargar Datos

CENTROIDES.csv

ESTACIONES.csv

PRECIPITACIONES_Cointzio.csv

(2) Datos para llenado

Centroide a transportar

MC1

Cargar

Matrices Auxiliares

Centroides trasladados

LLenar datos

(3) Estaciones para llenado

Ordenar datos por:

Distancia

16081

16087

Agregar

Quitar

Estaciones seleccionables

ID	Estación	Distancia	ZONA	COR X	COR Y	COR Z
2	16081	4.3761e+04	1	2.7258e+05	2.1785e+06	1908

Estaciones Seleccionadas

ID	Estación	Distancia	ZONA	COR X	COR Y	COR Z
3	16087	10601.61	2	2.2608e+05	2.1601e+06	2140
5	16133	14919.41	1	2.4642e+05	2.1654e+06	2100
4	16120	26946.16	1	2.5872e+05	2.1689e+06	2025
1	16022	31546.43	1	2.6396e+05	2.1688e+06	2067

Grafica de Estaciones seleccionadas

16120

16022

16133

16087

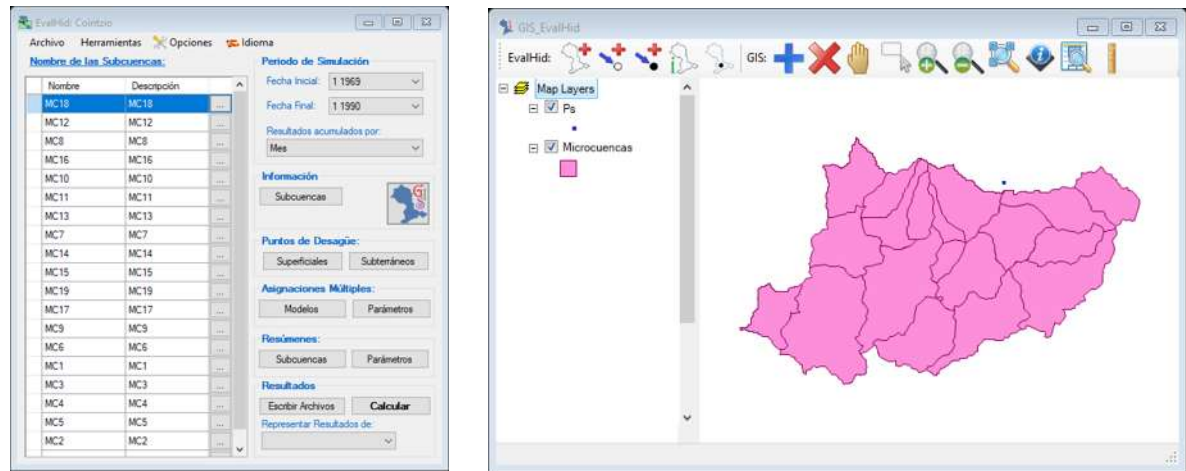
MC1

Regresar

Tabla General

Continuar

Figura 44. Ventanas del software EvalHID con el MPE de la subc. de Cointzio.



El periodo de simulación para la calibración del modelo fue de 1969 a 1983 y para la validación el periodo fue de 1984 a 1990, dando como resultado los siguientes indicadores de ajuste, los cuales muestran un rango excelente de calibración, siendo esto un indicador de que el modelo es bueno.

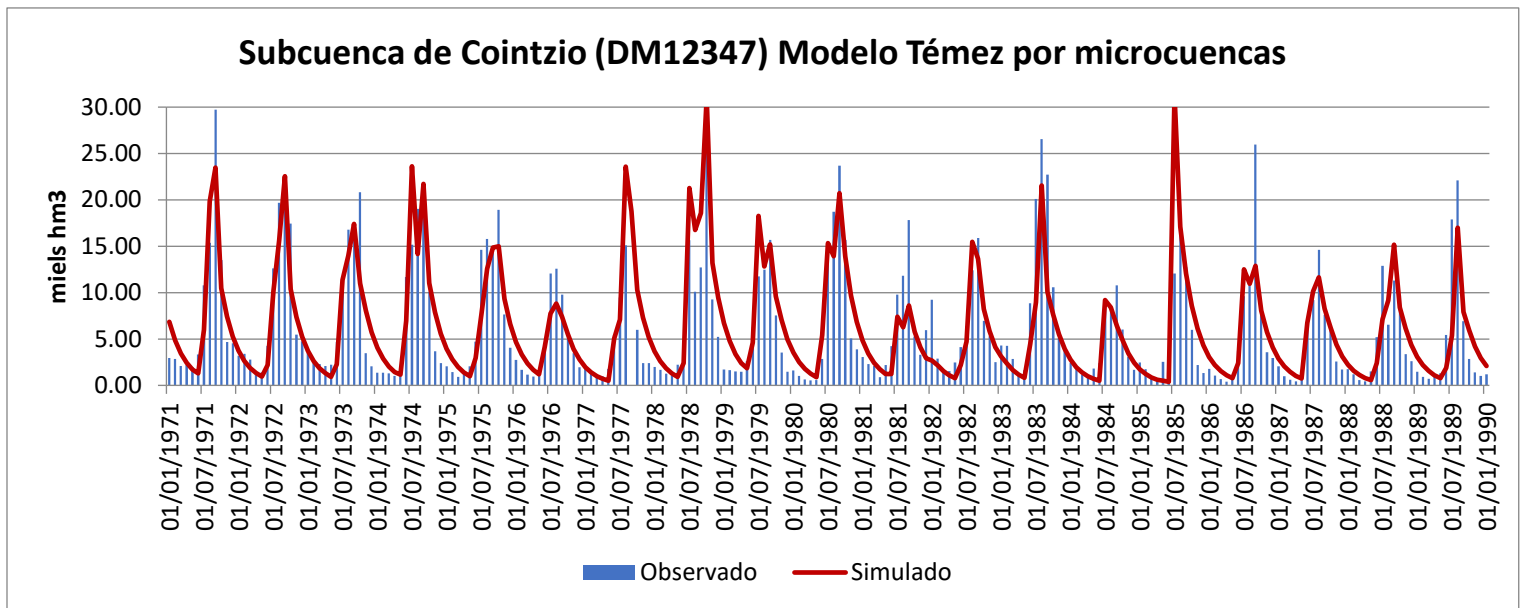
Tabla 30. Valores de las funciones objetivo del algoritmo autocalibrador SCE-UA para subc. de Cointzio.

Func. Obj.	EFICIENCIA	
	Calibración	Validación
NS	0.6811	0.7251
ln NS	0.3904	0.7991
ρ	0.8286	0.8589
Simetría	0.9999	0.9999
Promedio	0.7250	0.8458

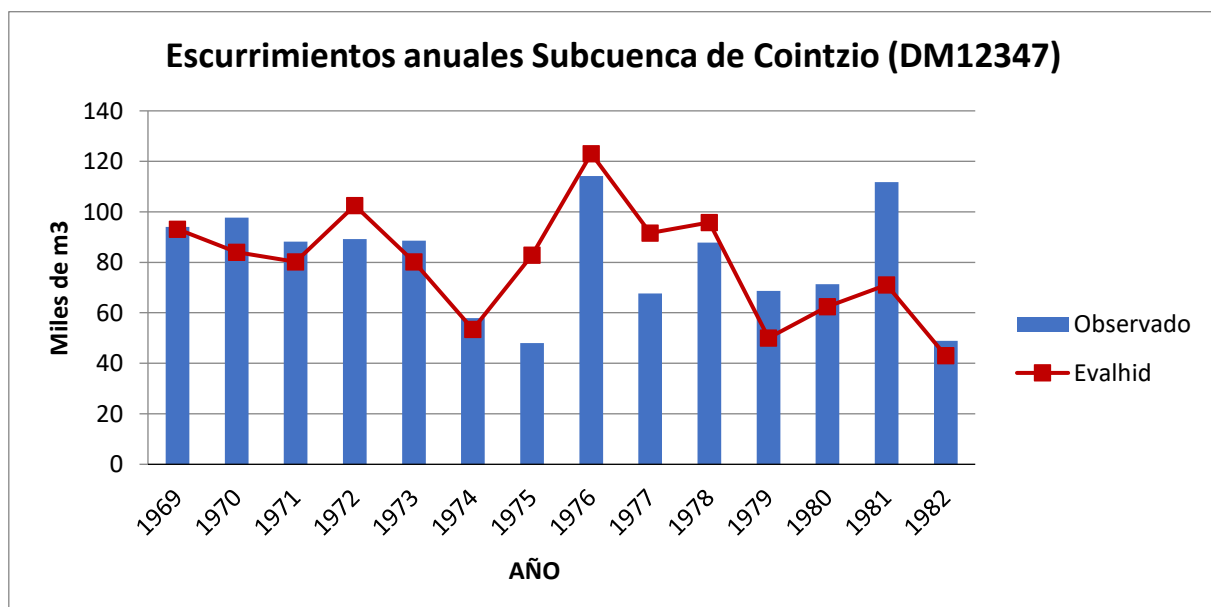
Los resultados de la calibración del modelo para la subcuenca de Cointzio se pueden apreciar de manera visual en las siguientes gráficas:



Gráfica 4. Comparativa de aportaciones mensuales simulados y observados de la subcuenca de Cointzio.

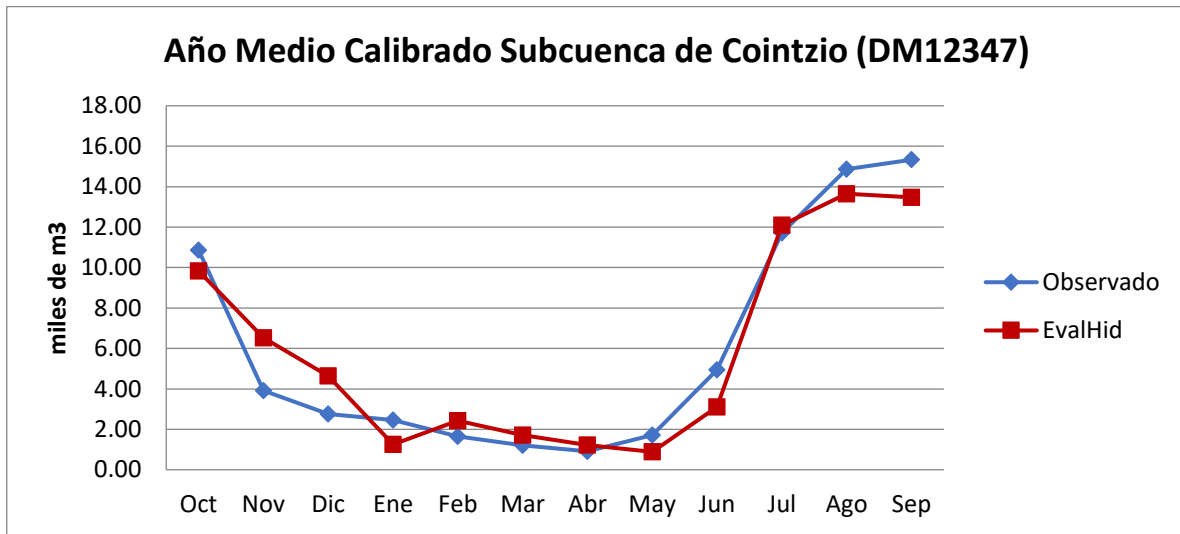


Gráfica 5. Comparativa de aportaciones anuales simuladas y reales de la subcuenca de Cointzio.





Gráfica 6. Comparativa de año medio simulado y real de la subc. de Cointzio.



7.4.2 Modelación de la subcuenca de Queréndaro

Para la modelación de la subcuenca de Queréndaro se realizó el mismo proceso que en el anterior modelo, dando como resultado de la división de esta subcuenca un total de 6 microcuencas, cuya información se presenta a continuación:

Figura 45. Subcuenca de Queréndaro.

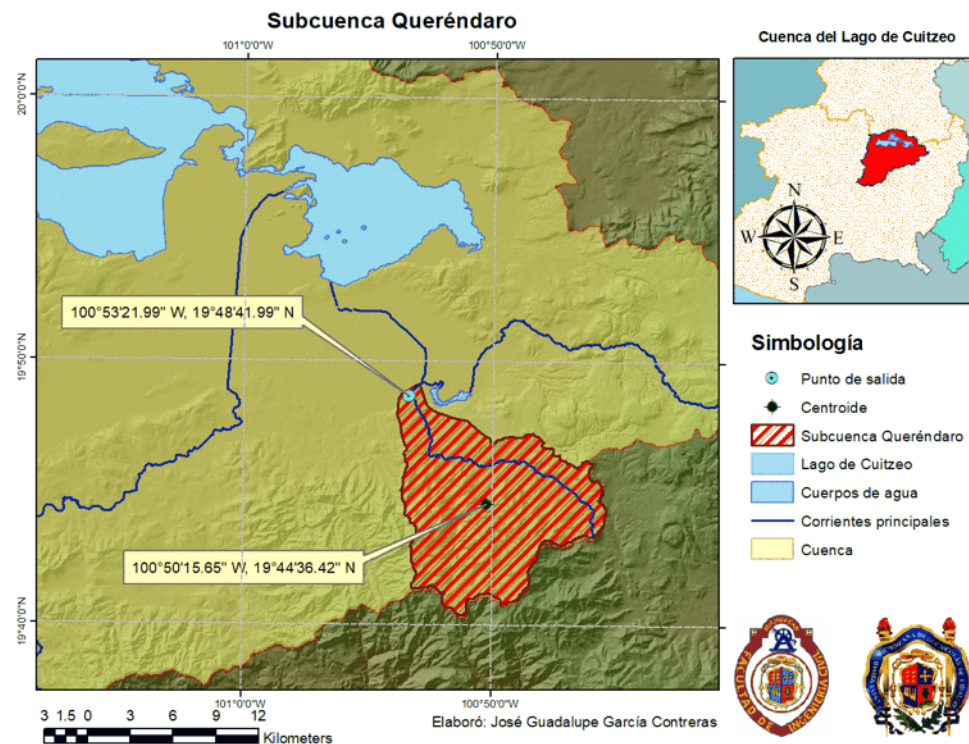


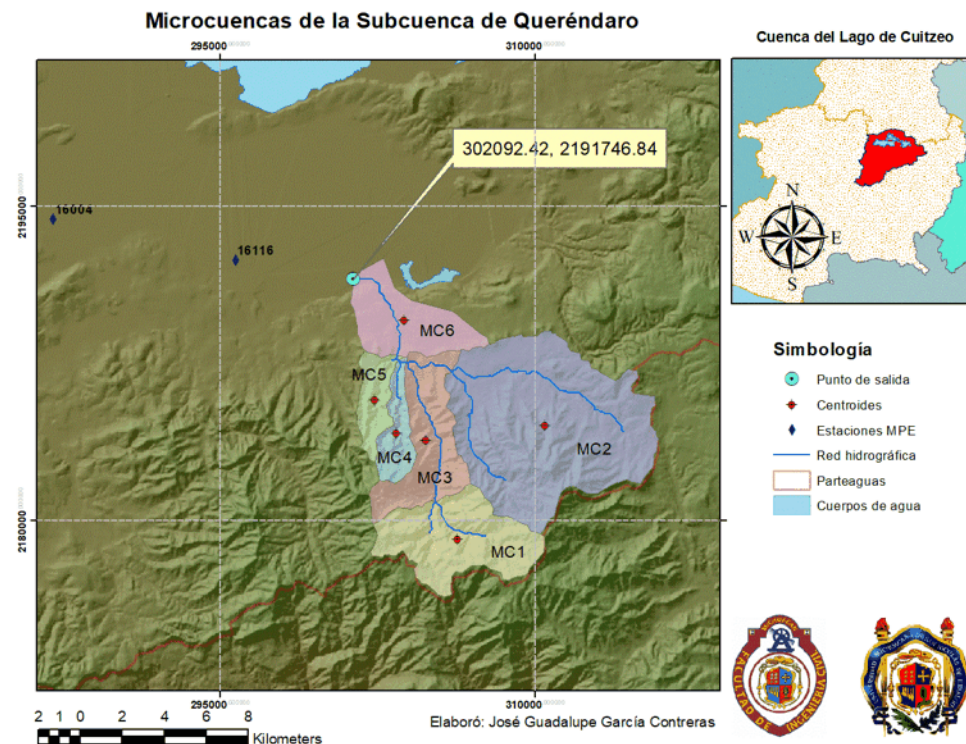
Tabla 31. Estaciones climatológicas para la subc. de Queréndaro.

ESTACIÓN CLIM.	NOMBRE	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	AÑOS EFECTIVOS
16004	ALVARO OBREGON, (SMN)	01/07/1969	01/08/1986	17
16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	01/07/1969	01/08/1986	17
16116	SAN SEBASTIAN,QUERENDARO	01/07/1969	01/08/1986	17

Tabla 32. Estación hidrométrica para la subc. de Queréndaro.

ESTACIÓN HIDRO.	NOMBRE	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	AÑOS EFECTIVOS	CORRIENTE	CUENCA	ESTADO
DM12314	QUERÉNDARO	01/07/1969	01/08/1986	17	RÍO QUERÉNDARO	LAGO DE CUITZEO	MICHOACÁN

Figura 46. División de la subcuenca de Queréndaro para el MPE de Témez.



En el modelo de la subcuenca de Queréndaro se colocó como punto de desagüe superficial la ubicación de la estación hidrométrica DM12314 (punto de salida, figura 46) para obtener la esorrentía de todas las microcuencas en ese punto.

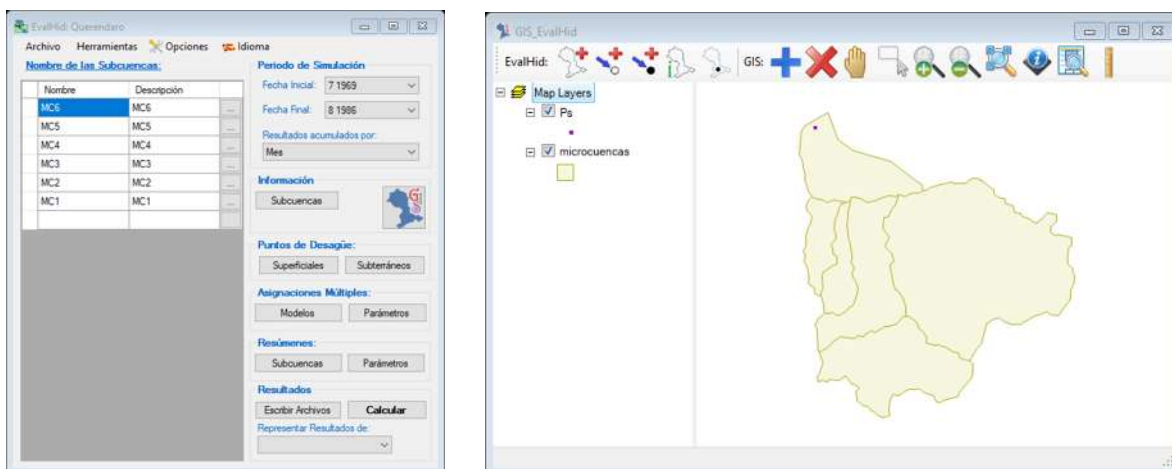


Se realizó el traslado de datos de las estaciones climatológicas a los centroides de la misma manera con apoyo de GESTAD.

Tabla 33. Coordenadas de los centroides de la subc. de Queréndaro.

NOMBRE	COORDENADAS (UTM)		
	X	Y	Z
MC1	303781.04	2189593.43	1980.00
MC2	302348.55	2185798.90	2190.00
MC3	303386.12	2184212.39	2337.00
MC4	304795.53	2183860.83	2351.00
MC5	310492.67	2184568.04	2562.00
MC6	306304.28	2179136.53	2611.00

Figura 47. Ventanas del software EvalHID con el MPE de la subc. de Queréndaro.



El periodo de simulación para la calibración del modelo fue de 1969 a 1986, dando como resultado los siguientes indicadores de ajuste, los cuales muestran un rango bueno de calibración, siendo esto un indicador de que el modelo es adecuado.

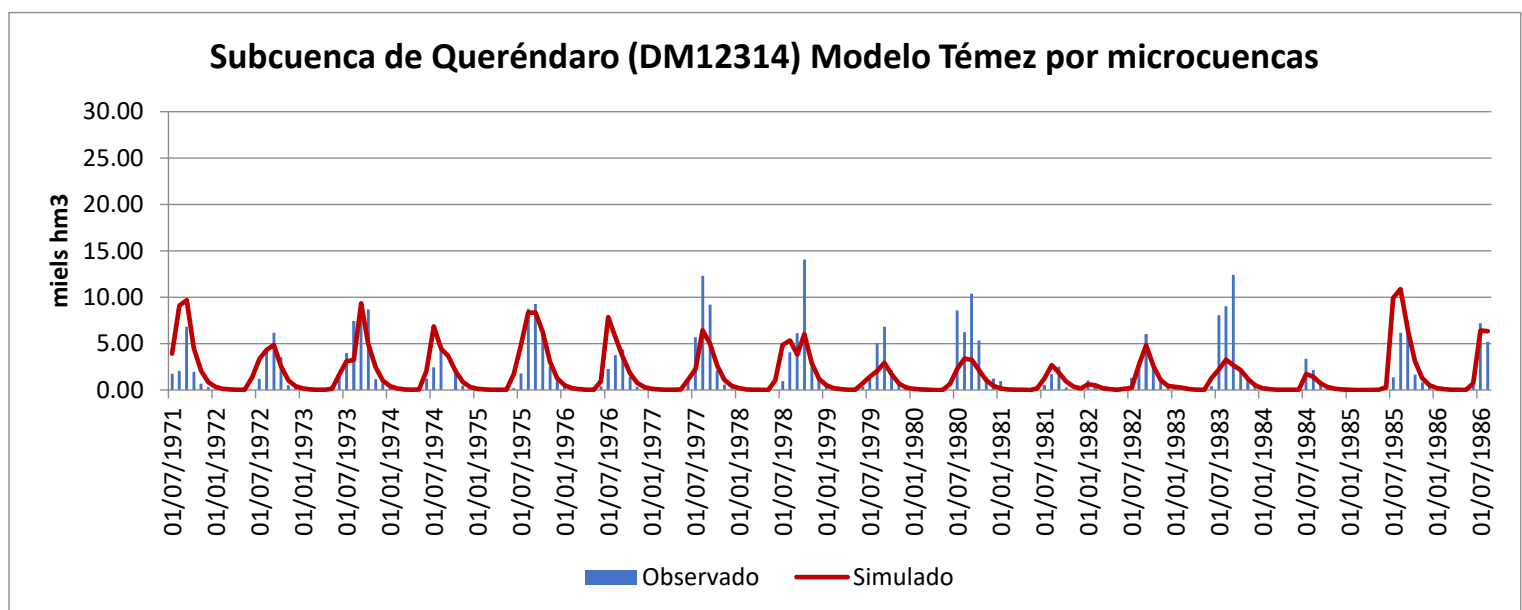


Tabla 34. Valores de las funciones objetivo del algoritmo autocalibrador SCE-UA para sub. de Queréndaro.

EFICIENCIA	
Func. Obj.	Calibración
NS	0.5222
ln NS	0.6601
ρ	0.7284
Simetría	0.9954
Promedio	0.7265

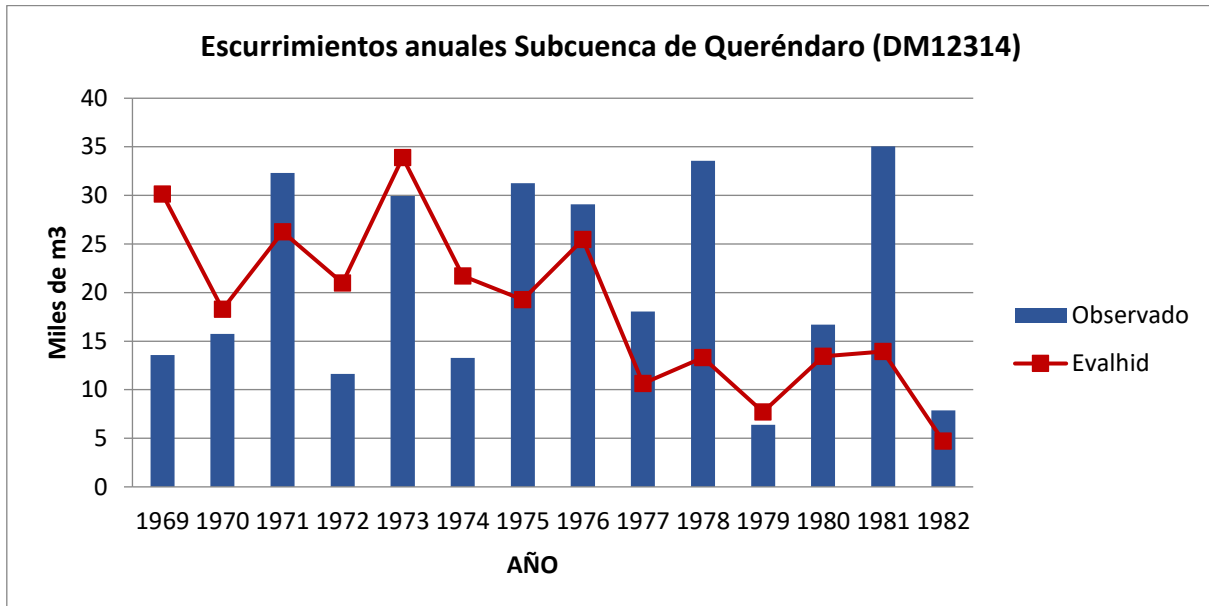
Los resultados de la calibración del modelo para la subcuenca de Queréndaro se pueden apreciar de manera visual en las siguientes gráficas:

Gráfica 7. Comparativa de aportaciones mensuales simulados y observados de la subcuenca de Queréndaro.

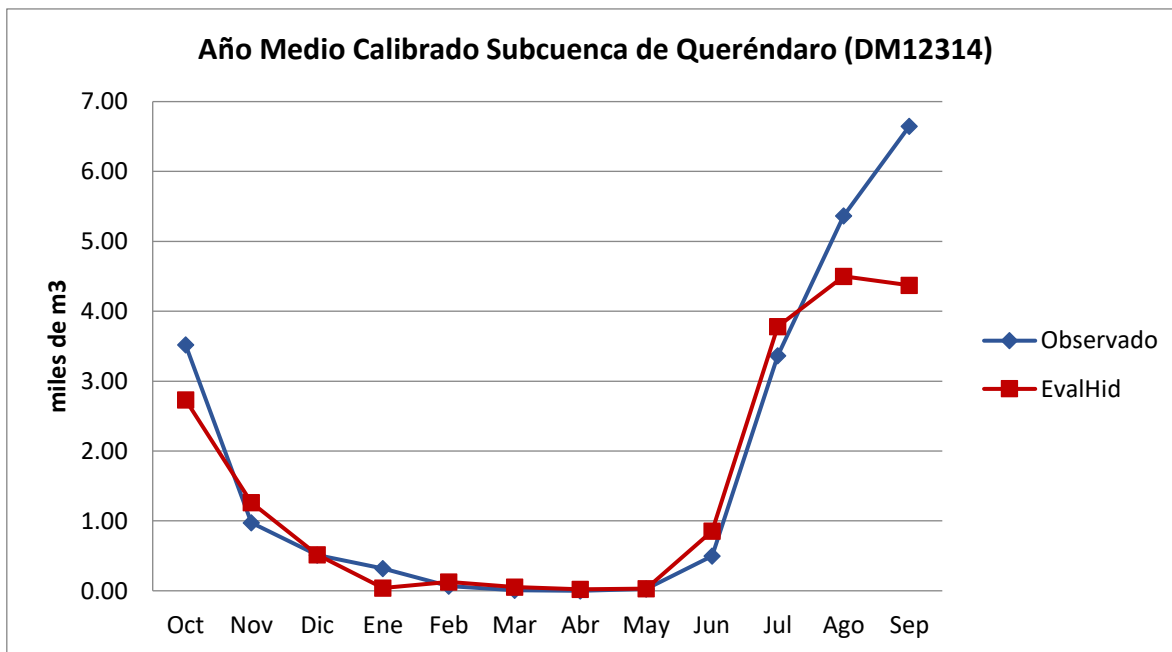




Gráfica 8. Comparativa de aportaciones anuales simuladas y reales de la subcuenca de Queréndaro.



Gráfica 9. Comparativa de año medio simulado y real de la sub. de Queréndaro.



Una vez terminados y calibrados ambos modelos, se obtienen los valores de los parámetros de Témez para cada subcuenca, siendo estos los siguientes:



Tabla 35. *Parámetros de Témez obtenidos del MPE.*

Valores obtenidos de la calibración con el modelo de Témez				
Subcuenca	Hmax	C	Imax	Alfa
COINTZIO	522.9874	0.1003	88.2645	0.3442
QUERÉNDARO	171.9270	0.2727	149.9770	0.8998

Con estos valores, se realiza una asignación de parámetros a las demás subcuencas para conformar de esta manera el modelo general de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

7.4.3 Asignación de parámetros mediante análisis multivariante

Partiendo de los parámetros de Témez obtenidos de los modelos de las subcuencas de Cointzio y Queréndaro, con apoyo del software JMP se procede a asignar dichos parámetros a las subcuencas restantes.

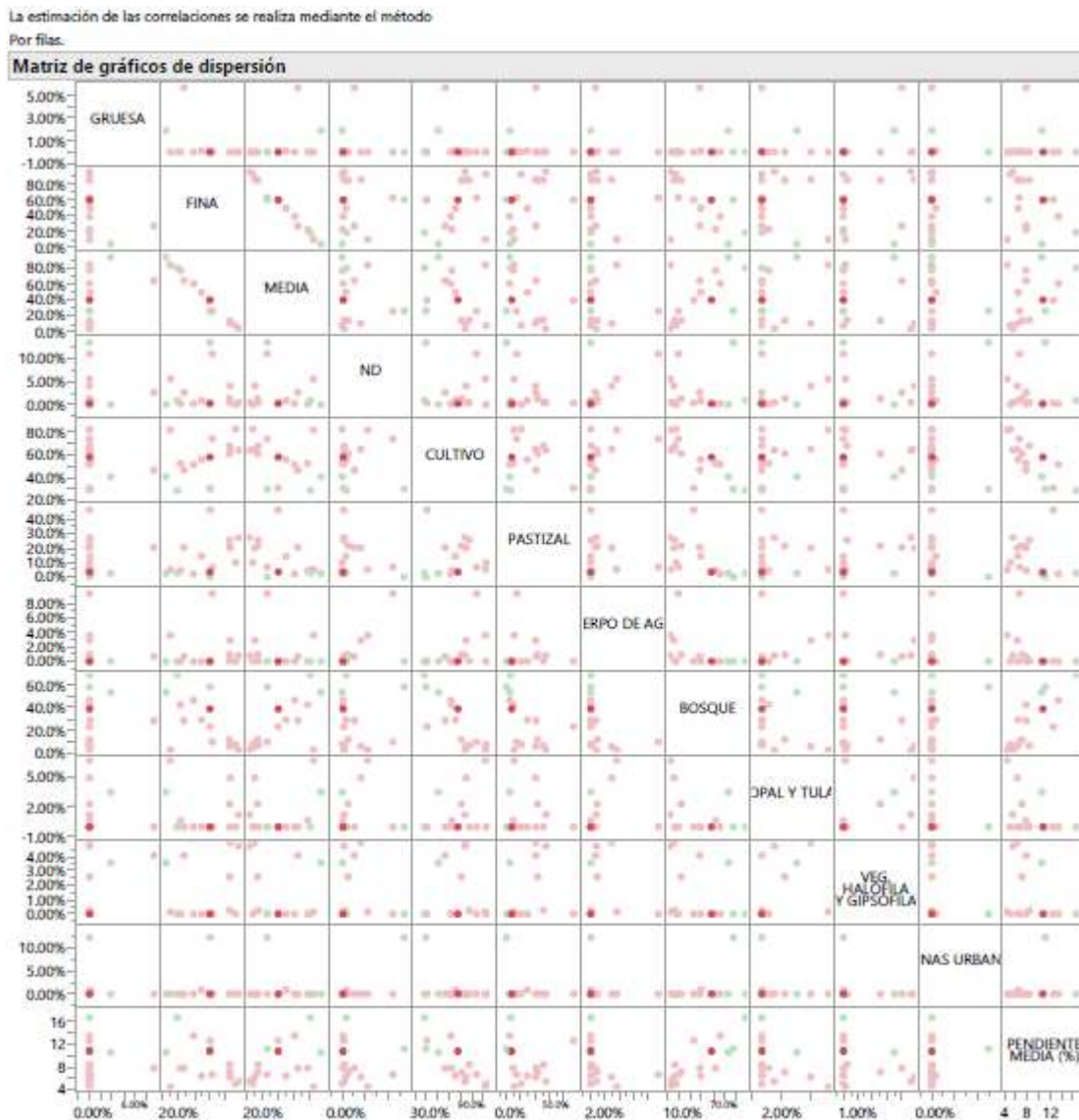
Se deben conformar dos grupos en los cuales haya una similaridad entre características morfológicas de las subcuencas que influyan de manera directa en el comportamiento del escurrimiento superficial como se mencionó anteriormente en la metodología.

Primero se crea una matriz de correlación con las características descritas en la metodología, para el análisis multivariante se desprecia la columna de “fina” dada su alta correlación con la columna de “media”:

Tabla 36. *Matriz de correlación con las características que influyen en el escurrimiento superficial.*

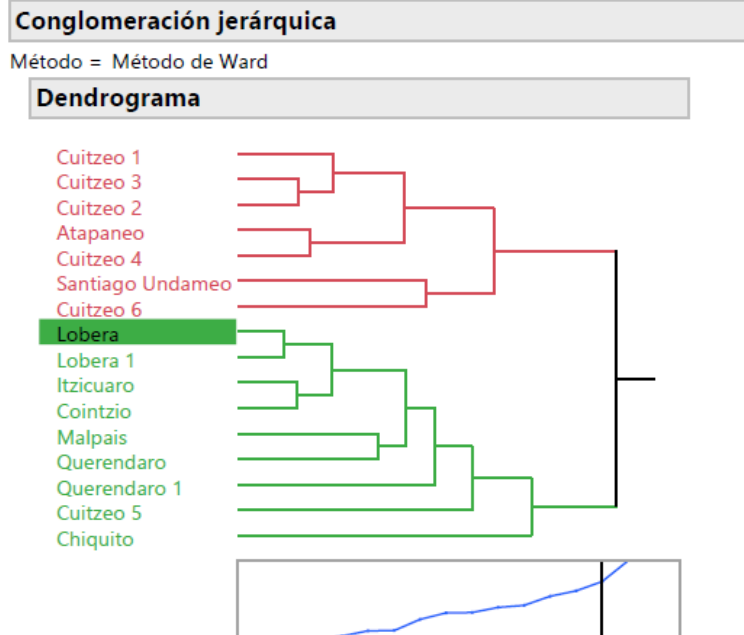
Correlaciones												
	GRUESA	FINA	MEDIA	ND	CULTIVO	PASTIZAL	CUERPO DE AGUA	BOSQUE POPAL Y TULAR	VEG. HALÓFILA Y GIPSÓFILA	ZONAS URBANAS	PENDIENTE MEDIA (%)	
GRUESA	1.0000	-0.3640	0.3244	-0.0535	-0.2097	0.0706	-0.0907	0.1184	-0.0570	0.4697	-0.0924	-0.0318
FINA	-0.3640	1.0000	-0.9897	0.0234	0.3847	0.4864	0.0600	-0.6017	-0.2142	0.1770	0.0546	-0.3665
MEDIA	0.3244	-0.9897	1.0000	-0.1587	-0.3758	-0.4515	-0.1386	0.5977	0.2066	-0.1827	-0.1468	0.3854
ND	-0.0535	0.0234	-0.1587	1.0000	-0.0026	-0.2930	0.6006	0.0059	0.0818	-0.1287	0.7002	-0.1144
CULTIVO	-0.2097	0.3847	-0.3758	-0.0026	1.0000	-0.0284	0.4742	-0.8088	0.3529	0.0334	-0.4011	-0.8111
PASTIZAL	0.0706	0.4864	-0.4515	-0.2930	-0.0284	1.0000	-0.0971	-0.5306	-0.0726	0.3022	-0.2796	-0.1551
CUERPO DE AGUA	-0.0907	0.0600	-0.1386	0.6006	0.4742	-0.0971	1.0000	-0.4329	0.2514	0.0067	-0.1332	-0.3783
BOSQUE	0.1184	-0.6017	0.5977	0.0059	-0.8088	-0.5306	-0.4329	1.0000	-0.3421	-0.2712	0.3782	0.8117
POPAL Y TULAR	-0.0570	-0.2142	0.2066	0.0818	0.3529	-0.0726	0.2514	-0.3421	1.0000	0.4122	-0.1660	-0.4082
VEG. HALÓFILA Y GIPSÓFILA	0.4697	0.1770	-0.1827	-0.1287	0.0334	0.3022	0.0067	-0.2712	0.4122	1.0000	-0.1861	-0.3084
ZONAS URBANAS	-0.0924	0.0546	-0.1468	0.7002	-0.4011	-0.2796	-0.1332	0.3782	-0.1660	-0.1861	1.0000	0.1737
PENDIENTE MEDIA (%)	-0.0318	-0.3665	0.3854	-0.1144	-0.8111	-0.1551	-0.3783	0.8117	-0.4082	-0.3084	0.1737	1.0000

Figura 48. Matriz de gráficos de dispersión elaborada por JMP.



JMP permite realizar diferentes tipos de análisis, de primera instancia muestra una conglomeración por medio del método de Ward en la cual agrupa las cuencas calibradas en un mismo grupo (figura 49), limitando así una posible asignación de parámetros a las demás subcuencas.

Figura 49. Conglomeración de subcuencas por el Método de Ward.



Aplicando los diferentes métodos que integran al software, se encuentra que el Método Completo con la opción de estandarizar los datos robustamente, logra hacer una conglomeración que coloca a las subcuencas calibradas en dos diferentes grupos, haciendo posible la asignación de parámetros para poder conformar el modelo general de la cuenca.

Figura 50. Conglomeración jerárquica para la asignación de parámetros de Témez.

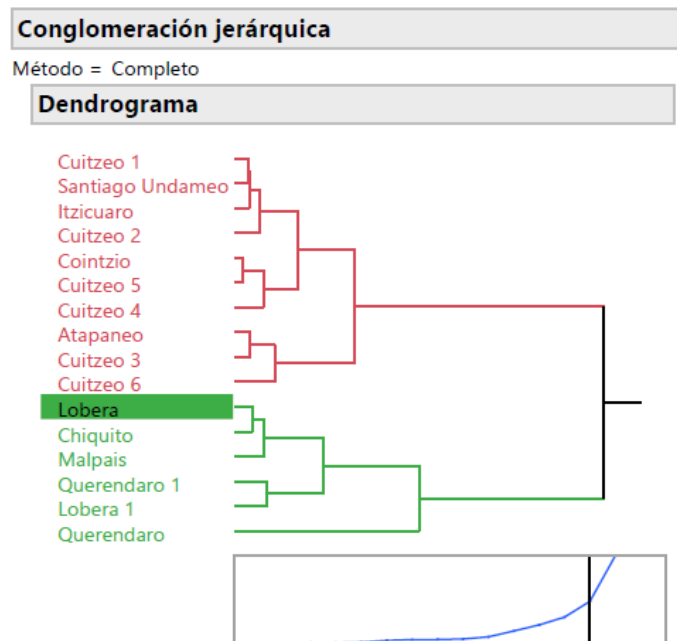


Tabla 37. Agrupación de subcuencas por medio de análisis multivariante.

Agrupación de Subcuencas	
Grupo 1	Grupo 2
Cointzio	Queréndaro
Cuitzeo 1	Lobera
Santiago Undameo	Chiquito
Itzicuaró	Malpais
Cuitzeo 2	Querendaro 1
Cuitzeo 5	Lobera 1
Cuitzeo 4	
Atapaneo	
Cuitzeo 3	
Cuitzeo 6	

Con esta agrupación se procede a elaborar el modelo general de la cuenca, el cual ya no requiere de calibración, solamente se deben ingresar los datos de precipitación, y evapotranspiración de las 13 estaciones climatológicas trasladados a cada uno de los centroides de cada subcuenca (figura 51) al generador de datos de EvalHID y posteriormente colocar en EvalHID los parámetros que tendrá cada una de ellas para así obtener los escurrimientos en cada una de las subcuencas.

Figura 51. Agrupación de subcuencas de acuerdo al análisis multivariante.

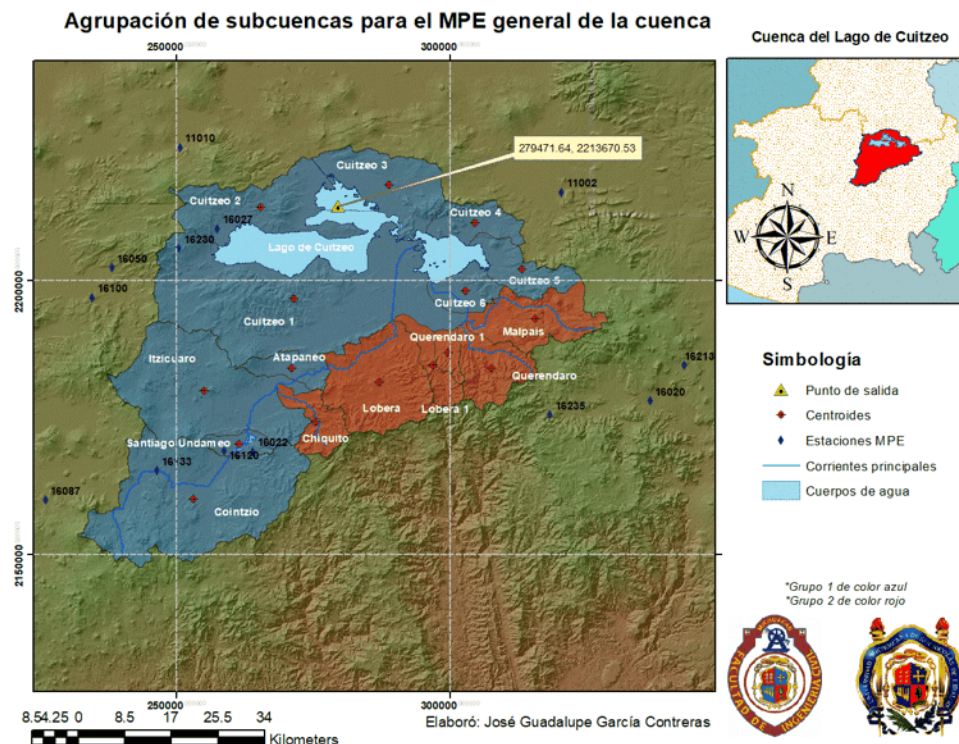




Figura 52. Ventana del software EvalHID con las 16 subcuencas que conforman el modelo general de la cuenca.

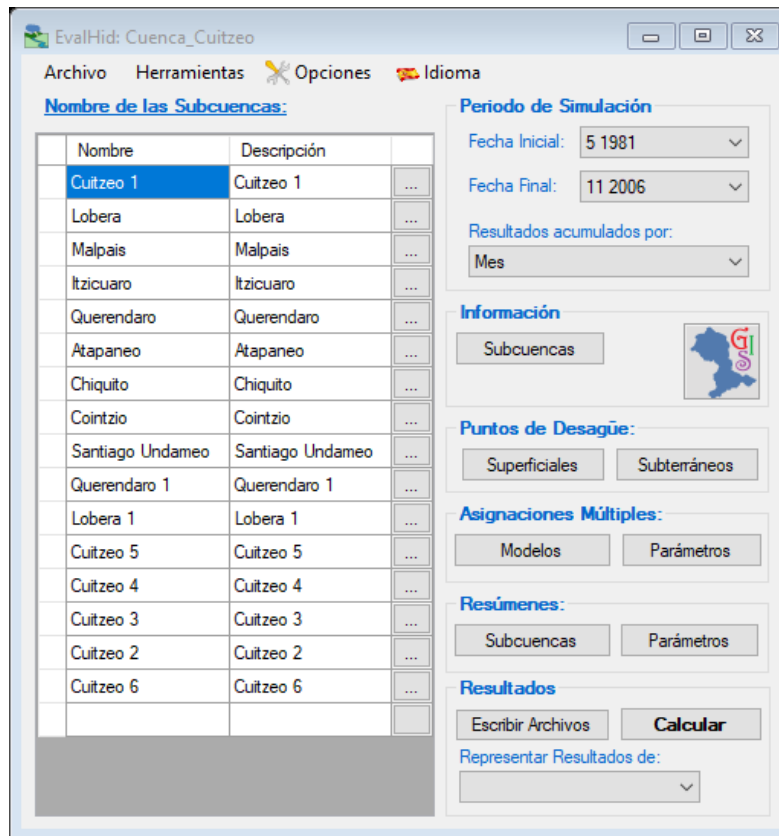


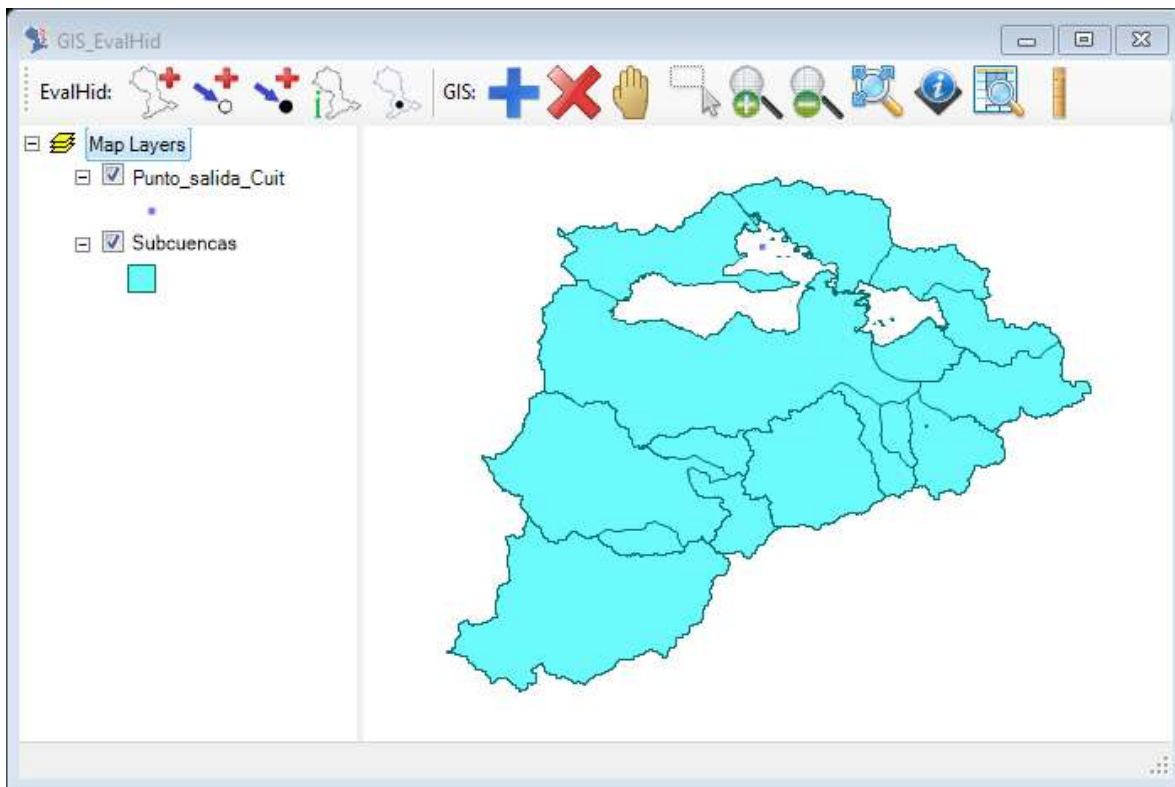
Figura 53. Ventana con el resumen de parámetros de Témez.

The screenshot shows the 'Resumen de Parámetros' window. At the top, there is a dropdown menu for 'Témez'. Below it is a table with 7 columns: 'Nombre de la Subcuenca', 'Hmax', 'C', 'lmax', 'Alfa', 'H', and 'Vi'.

Nombre de la Subcuenca	Hmax	C	lmax	Alfa	H	Vi
Cuitzeo 1	522.9874044	0.100264376	88.26449381	0.344217171	20	35
Lobera	522.9874044	0.100264376	88.26449381	0.344217171	20	35
Malpais	171.9270237	0.272726733	149.9769865	0.899798665	20	35
Itzicuaro	522.9874044	0.100264376	88.26449381	0.344217171	20	35
Querendaro	171.9270237	0.272726733	149.9769865	0.899798665	20	35
Atapaneo	522.9874044	0.100264376	88.26449381	0.344217171	20	35
Chiquito	171.9270237	0.272726733	149.9769865	0.899798665	20	35
Cointzio	522.9874044	0.100264376	88.26449381	0.344217171	20	35
Santiago Undameo	522.9874044	0.100264376	88.26449381	0.344217171	20	35
Querendaro 1	171.9270237	0.272726733	149.9769865	0.899798665	20	35
Lobera 1	171.9270237	0.272726733	149.9769865	0.899798665	20	35
Cuitzeo 5	522.9874044	0.100264376	88.26449381	0.344217171	20	35
Cuitzeo 4	522.9874044	0.100264376	88.26449381	0.344217171	20	35
Cuitzeo 3	522.9874044	0.100264376	88.26449381	0.344217171	20	35
Cuitzeo 2	522.9874044	0.100264376	88.26449381	0.344217171	20	35
Cuitzeo 6	522.9874044	0.100264376	88.26449381	0.344217171	20	35

*H y Vi son los valores iniciales de la humedad del suelo y el volumen almacenado en el acuífero respectivamente.

Figura 54. Ventana que muestra el modelo de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.



De esta manera, se obtienen los datos mensuales en milímetros (que serán convertidos a hectómetros cúbicos) de las aportaciones en cada uno de los puntos de salida de las subcuencas que conforman a la Cuenca del Lago de Cuitzeo, en un periodo de registro que abarca desde 1981 hasta el 2006, siendo sólo de interés para el modelo SIMGES las aportaciones de las subcuencas Cointzio, Chiquito, Atapaneo, Lobera (El Plan), Queréndaro y el Lago de Cuitzeo.

Dichos datos serán considerados para colocar en los embalses a lo largo de los cauces del Río Grande de Morelia y el Río Queréndaro



7.5 Modelo de gestión (SIMGES) y su calibración.

El modelo presentado en la tesis “GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO, ANTE EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO” (Pardo, 2016), fue editado y adaptado a este estudio con los valores de las aportaciones obtenidas de la modelación realizada en EvalHID, además de complementar el modelo con datos recabados del Departamento de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos de CONAGUA y acondicionados a la serie histórica, dando como resultado un total de 25 años, de octubre de 1981 a septiembre de 2006, las aportaciones ingresadas fueron:

1. Aportación Atapaneo
2. Aportación Chiquito
3. Aportación El Plan
4. Aportación Malpaís
5. Aportación Queréndaro
6. Aportación Santiago Undameo (Cointzio)
7. Aportación al Lago de Cuitzeo

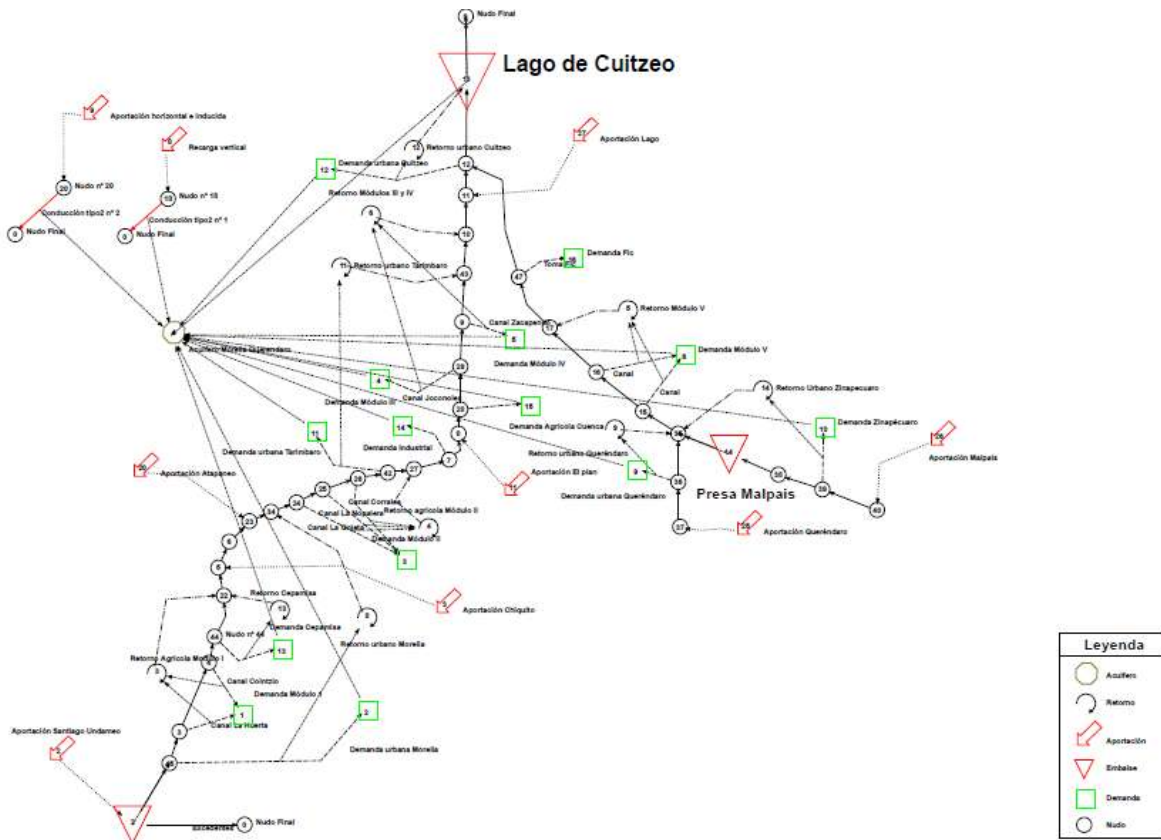
Estos seis puntos de desagüe superficial, fueron definidos de acuerdo a las estaciones hidrométricas existentes, ya que de esta manera se puede llevar a cabo la comparativa de los resultados simulados con los observados en dichas estaciones (Pardo, 2016).

Los valores correspondientes a las demandas, elementos de retorno, toma de demanda, conducciones y acuíferos no fueron modificados ya que los datos utilizados fueron de acuerdo a la información proporcionada por el Distrito de Riego (ubicación de pozos y volumen total de bombeo) y a los resultados obtenidos de las modelaciones y cálculos realizados en la tesis anteriormente mencionada.

Los datos editados fueron los volúmenes, cotas, tasa de evaporación y datos físicos, correspondientes a los embalses del modelo; que son el Lago de Cuitzeo, la presa de Cointzio y la presa Malpaís.

El esquema de simulación para la gestión de la Cuenca del Lago de Cuitzeo es el siguiente:

Figura 55. Detalle del esquema de simulación SIMGES de la Cuenca del Lago de Cuitzeo (Pardo, 2016).



Antes de realizar la calibración del modelo, se colocaron los datos de tasa de evaporación correspondiente a los años de 1981 a 2006 en todos los embalses y, además se modificaron las cotas del embalse (tabla 38) del Lago de Cuitzeo, dichas cotas fueron obtenidas de la información del plano general del Lago de Cuitzeo “Plan de S. Bartolo. Valle de Uruétaro-Queréndaro” (figura 56), hecho por la Comisión de Irrigación, del Departamento Técnico y Sección de Estudios y Proyectos (1921-1947), hoy CONAGUA.

Esto con la finalidad de mejorar la calidad del presente estudio y sus resultados.

Figura 56. Plano topobatemétrico del Lago de Cuitzeo (CONAGUA, 2019).

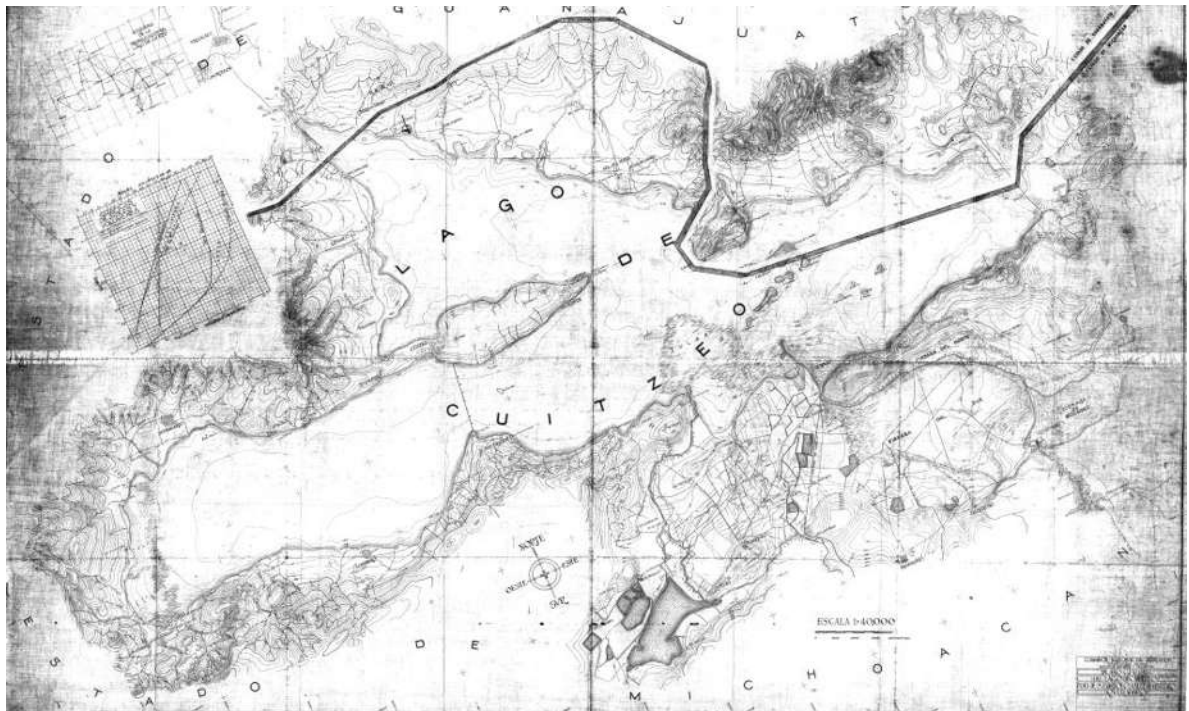


Figura 57. Gráfica de áreas y volúmenes del Lago de Cuitzeo en sus condiciones naturales y vaso reducido (CONAGUA, 2019).

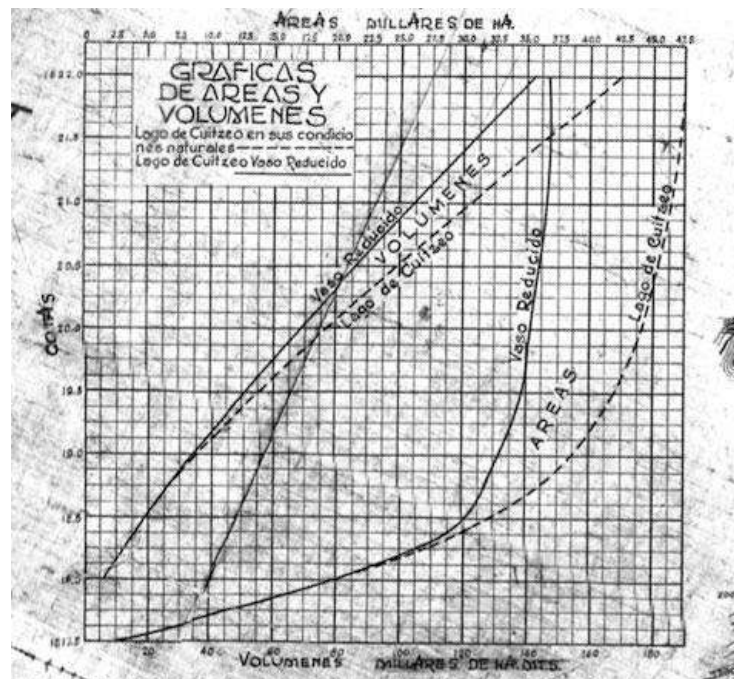


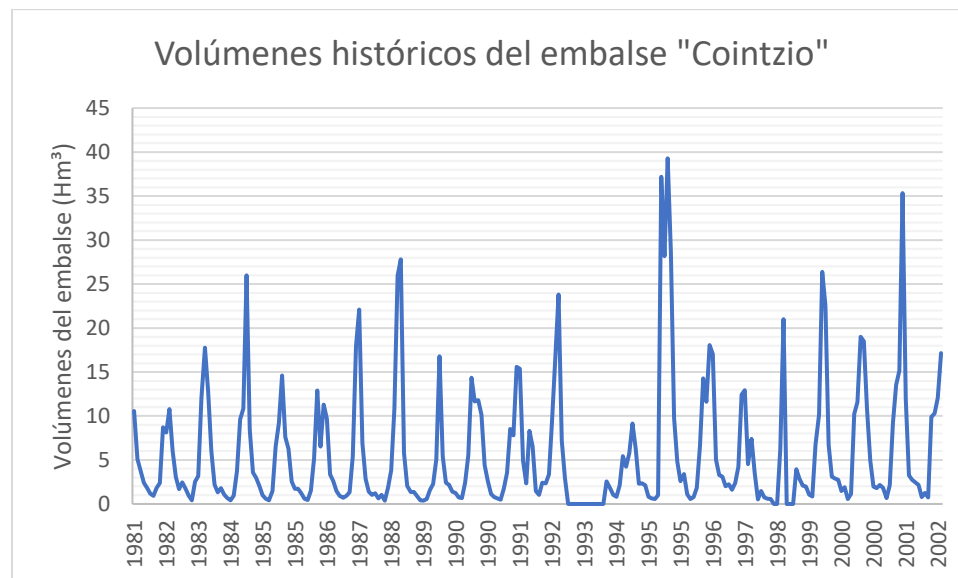


Tabla 38. Valores de las área y volúmenes para las cotas de SIMGES, obtenidos del plano topobatómico del Lago de Cuitzeo.

VASO REDUCIDO		LAGO DE CUITZEO		VASO REDUCIDO		LAGO DE CUITZEO	
COTAS (metros)	VOLÚMENES (millares de Ha.)	COTAS (metros)	VOLÚMENES (millares de Ha.)	COTAS (metros)	ÁREAS (millares de Ha.)	COTAS (metros)	ÁREAS (millares de Ha.)
1817.5	0	1817.5	0	1817.5	2.5	1817.5	2.5
1818	6	1818	6	1818	20	1818	20
1818.5	19.5	1818.5	19.5	1818.5	30	1818.5	32.2
1819	34	1819	35	1819	33.1	1819	38.75
1819.5	50.5	1819.5	55	1819.5	34.6	1819.5	42.1
1820	68	1820	77.5	1820	35.5	1820	44.1
1820.5	87	1820.5	99.5	1820.5	36	1820.5	45.3
1821	104.5	1821	122	1821	36.6	1821	46.4
1821.5	123.5	1821.5	145.5	1821.5	36.8	1821.5	47.2
1822	142.5	1822	170	1822	36.75	1822	47.75

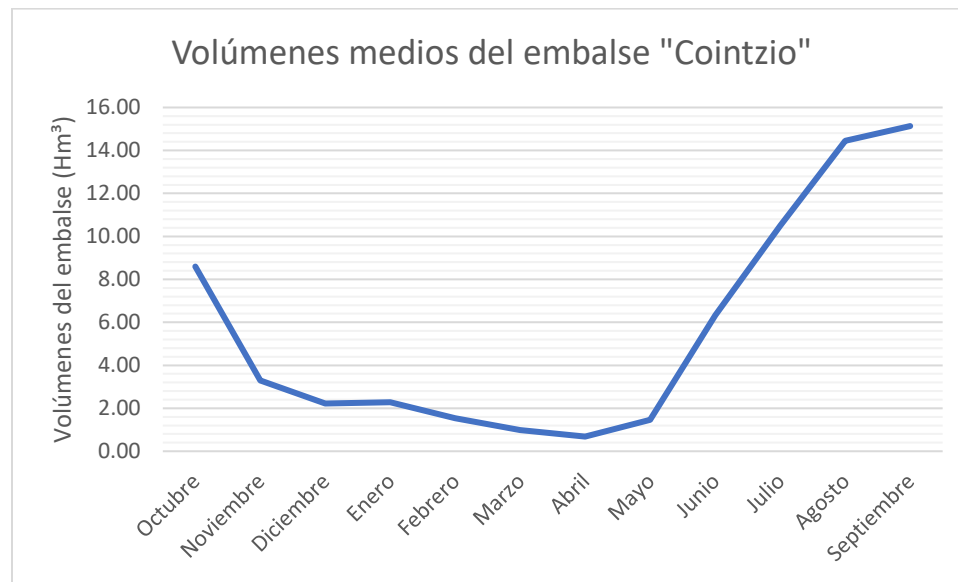
La información con que se cuenta de los embalses correspondientes a las presas Malpaís y Queréndaro se pueden observar en las siguientes gráficas ya que es la información con la que se calibrará el modelo.

Gráfica 10. Volúmenes históricos de la presa Cointzio.

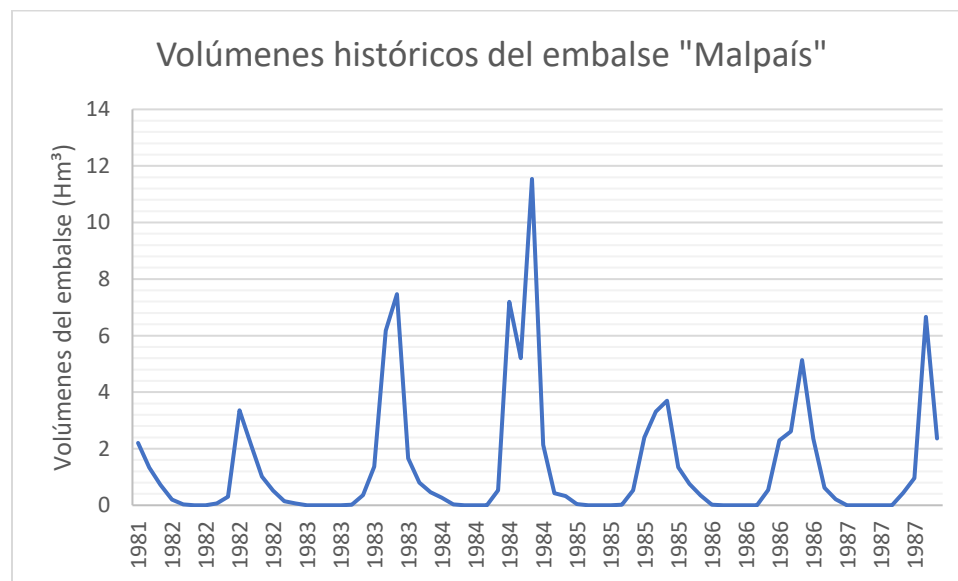




Gráfica 11. Volúmenes medios históricos de la presa Cointzio.

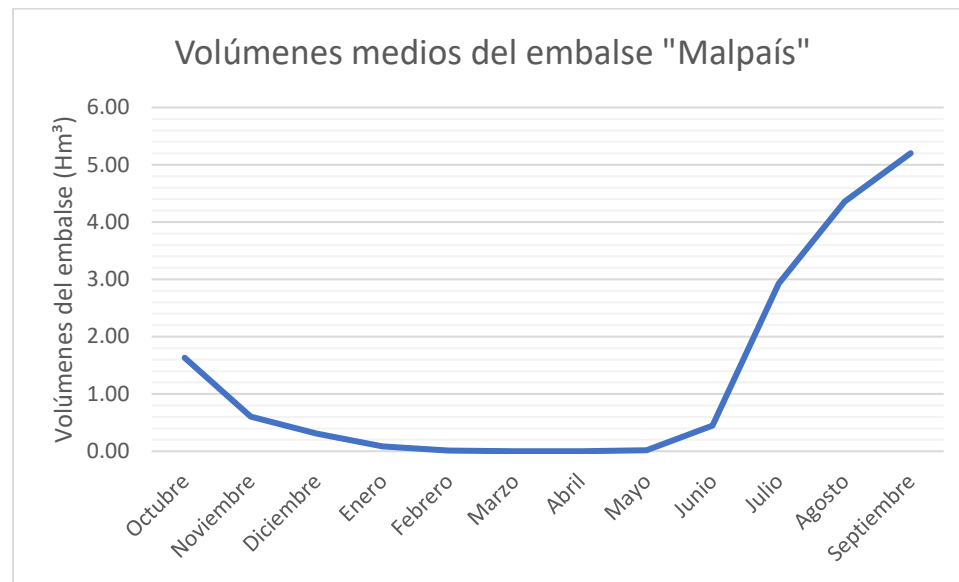


Gráfica 12. Volúmenes históricos de la presa Malpaís.





Gráfica 13. Volúmenes medios históricos de la presa Malpaís.



7.5.1 Calibración del modelo SIMGES

Para lograr la calibración del modelo se usó la información de las estaciones hidrométricas mencionadas anteriormente, dicha calibración se lleva a cabo de manera manual modificando los valores en los datos físicos (coeficientes A, B y C) y los parámetros de gestión (volúmenes máximos, objetivo y mínimos) para poder asemejar los valores simulados con los observados, con estos valores se calcula el RMSE para hacer una comparativa de cómo va mejorando la calibración.

Los resultados de la calibración del modelo SIMGES son los siguientes:



Tabla 39. Valores iniciales de SIMGES de la presa Cointzio.

MES	VALOR OBS. (Hm ³)	VALOR SIM. (Hm ³)	DIFERENCIA	RMSE	MÁXIMO	OBJETIVO	MÍNIMO
OCTUBRE	8.591	16.048	-7.456	11.828	80	80	20
NOVIEMBRE	3.301	16.460	-13.159	11.828	80	80	20
DICIEMBRE	2.228	16.934	-14.706	11.828	80	80	20
ENERO	2.373	17.100	-14.727	11.828	80	80	20
FEBRERO	1.661	16.739	-15.078	11.828	80	80	20
MARZO	1.064	15.628	-14.564	11.828	80	80	20
ABRIL	0.701	14.176	-13.475	11.828	80	80	20
MAYO	1.474	12.933	-11.459	11.828	80	80	20
JUNIO	6.445	14.108	-7.663	11.828	80	80	20
JULIO	10.942	20.487	-9.546	11.828	80	80	20
AGOSTO	14.997	25.654	-10.657	11.828	80	80	20
SEPTIEMBRE	15.479	14.355	1.125	11.828	80	80	20
TOTAL	69.255	200.621					
Coefficientes		Vol. Inicial					
A=	0.1	80					
B=	0.1						
C=	1						

Gráfica 14. Resultados del modelo sin calibrar en la presa de Cointzio.

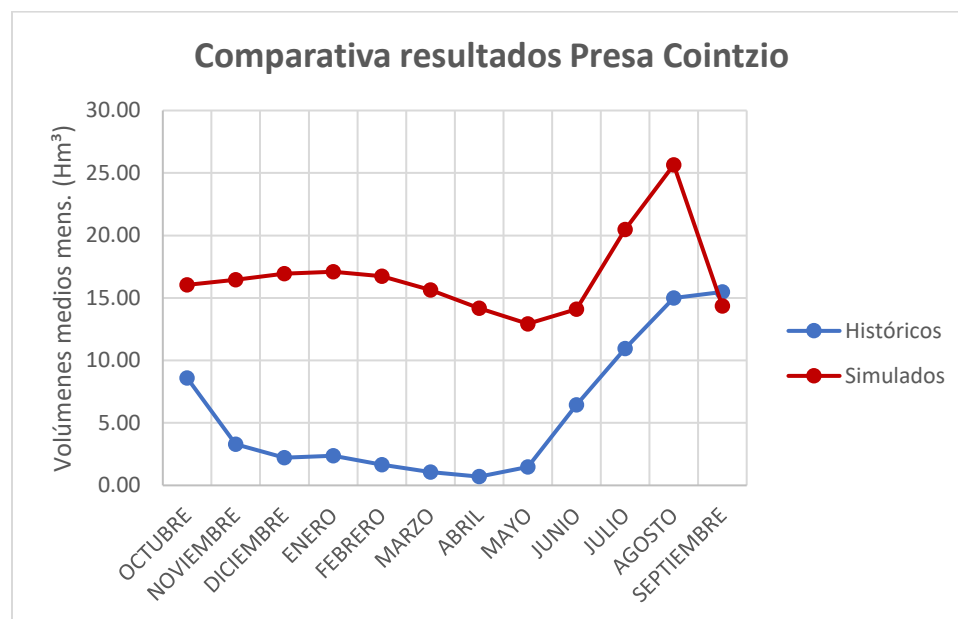




Tabla 40. Valores finales de SIMGES de la presa Cointzio.

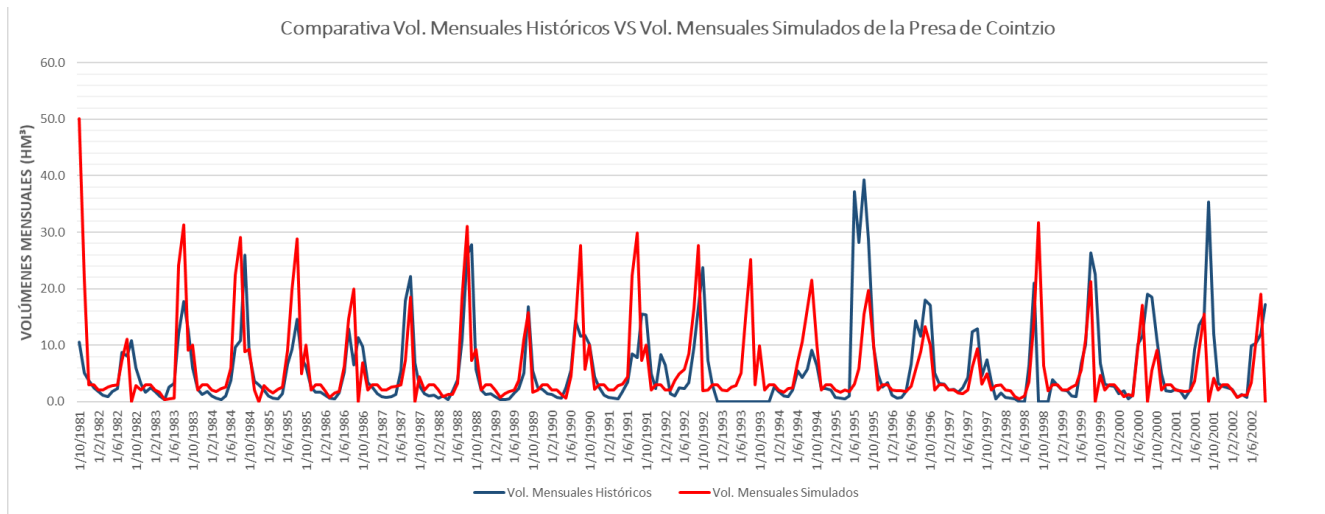
MES	VALOR OBS. (Hm³)	VALOR SIM. (Hm³)	DIFERENCIA	RMSE	MÁXIMO	OBJETIVO	MÍNIMO
OCTUBRE	8.591	9.226	-0.635	2.463	65	40	10
NOVIEMBRE	3.301	2.911	0.389	2.463	50	5	2
DICIEMBRE	2.228	2.857	-0.629	2.463	20	8	3
ENERO	2.281	2.994	-0.713	2.463	20	4	3
FEBRERO	1.537	2.000	-0.462	2.463	10	4	2
MARZO	0.979	1.659	-0.680	2.463	25	10	2
ABRIL	0.683	1.943	-1.260	2.463	25	10	5
MAYO	1.466	2.095	-0.629	2.463	40	10	10
JUNIO	6.331	4.390	1.941	2.463	65	40	30
JULIO	10.505	12.425	-1.920	2.463	50	35	30
AGOSTO	14.447	19.352	-4.905	2.463	50	30	20
SEPTIEMBRE	15.134	9.040	6.095	2.463	70	60	50
TOTAL	67.482	70.890					
Coeficientes			Vol. Inicial				
A=	0.1	80					
B=	0.12						
C=	1						

Gráfica 15. Resultados del modelo calibrado en la presa de Cointzio.





Gráfica 16. Comparativa de vol. mensuales históricos VS. vol. mensuales simulados en el embalse "Cointzio".



Gráfica 17. Comparativa vol. medios históricos VS. vol. medios simulados del embalse "Cointzio".

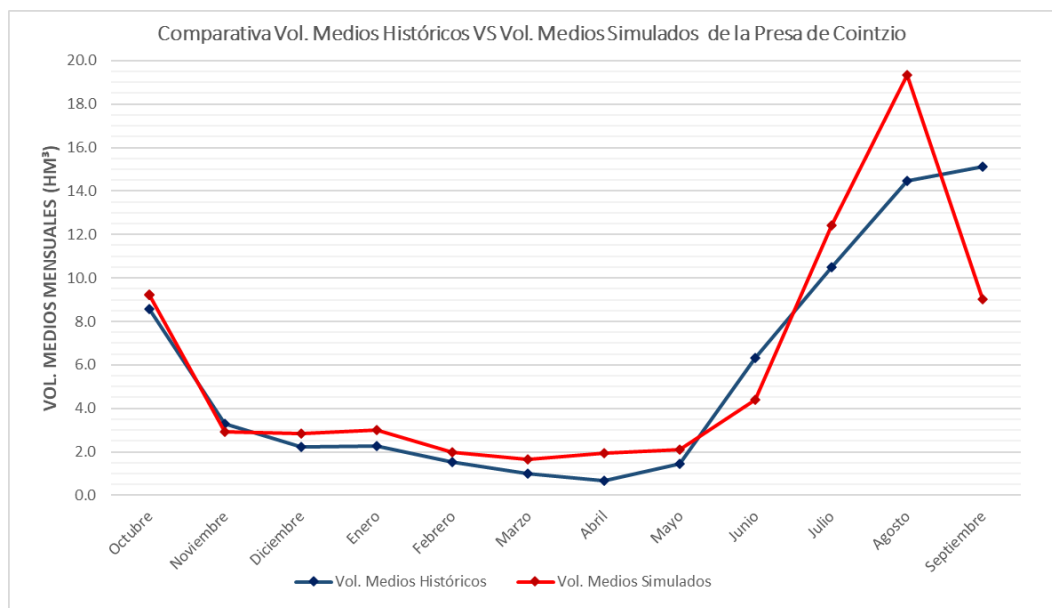




Tabla 41. Valores iniciales de SIMGES de la presa Malpaís.

MES	VALOR OBS. (Hm ³)	VALOR SIM. (Hm ³)	DIFERENCIA	RMSE	MÁXIMO	OBJETIVO	MÍNIMO
OCTUBRE	1.633	1.271	0.362	2.463	30	4	0.5
NOVIEMBRE	0.602	0.500	0.102	2.463	30	8	0.5
DICIEMBRE	0.306	1.320	-1.014	2.463	30	3	2
ENERO	0.087	1.530	-1.443	2.463	20	9	8
FEBRERO	0.011	1.484	-1.474	2.463	20	9	8
MARZO	0.000	1.287	-1.287	2.463	30	26	8
ABRIL	0.000	1.051	-1.051	2.463	30	26	8
MAYO	0.018	0.864	-0.847	2.463	30	26	8
JUNIO	0.448	0.500	-0.052	2.463	10	1	0.5
JULIO	2.929	3.349	-0.420	2.463	5	2	0.5
AGOSTO	4.358	11.993	-7.635	2.463	15	14	13
SEPTIEMBRE	5.202	7.529	-2.326	2.463	15	14	13
TOTAL	15.594	32.679					
Coefficientes		Vol. Inicial					
A=	0.01	15					
B=	0.01						
C=	1						

Gráfica 18. Resultados del modelo sin calibrar en la presa de Cointzio.

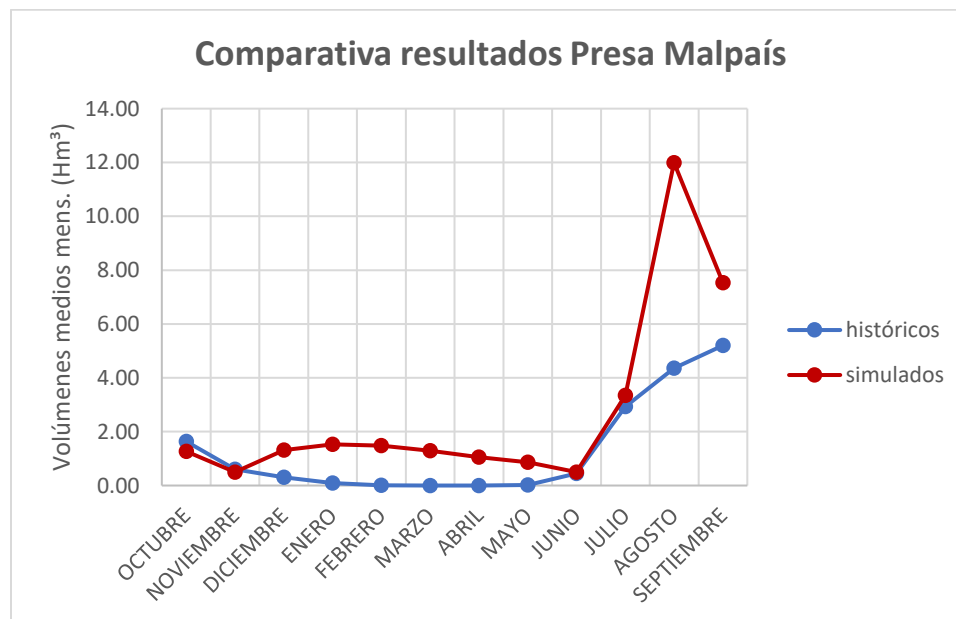
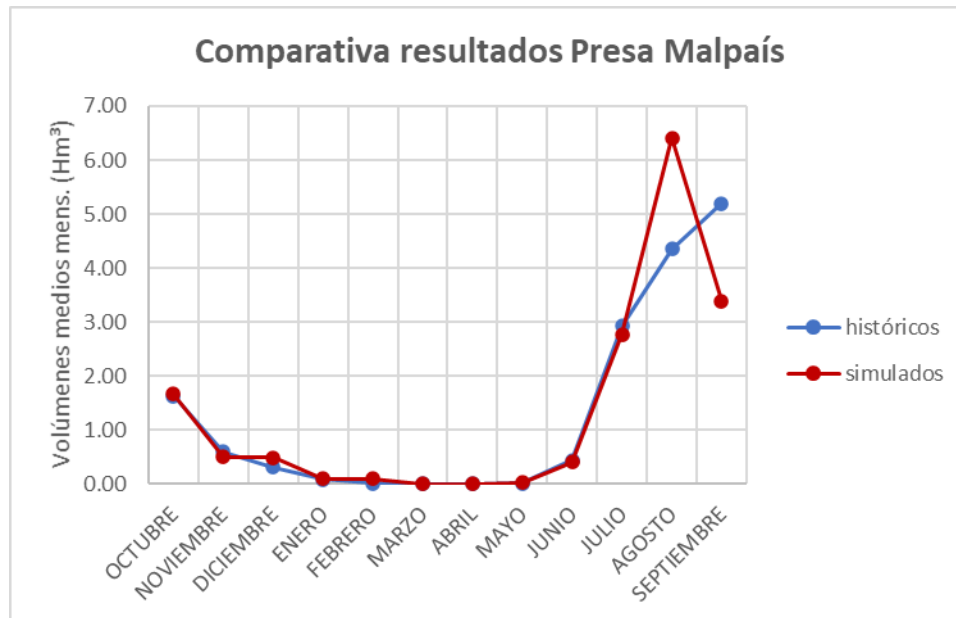




Tabla 42. Valores finales de SIMGES de la presa Malpaís.

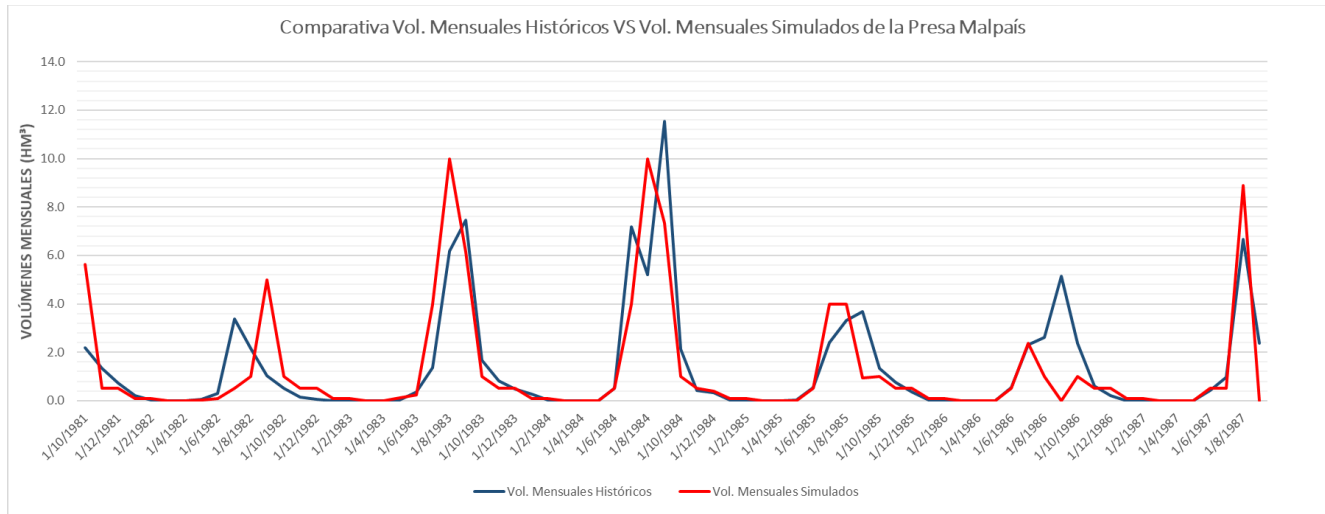
MES	VALOR OBS. (Hm ³)	VALOR SIM. (Hm ³)	DIFERENCIA	RMSE	MÁXIMO	OBJETIVO	MÍNIMO
OCTUBRE	1.633	1.661	-0.028	0.794	15	5	1
NOVIEMBRE	0.602	0.500	0.102	0.794	7	3.5	0.5
DICIEMBRE	0.306	0.484	-0.178	0.794	2	0.5	0.5
ENERO	0.087	0.100	-0.013	0.794	0.5	0.3	0.1
FEBRERO	0.011	0.100	-0.089	0.794	0.5	0.3	0.1
MARZO	0.000	0.000	0.000	0.794	0.5	0.25	0
ABRIL	0.000	0.000	0.000	0.794	0.5	0.2	0
MAYO	0.018	0.021	-0.004	0.794	2.5	2	1
JUNIO	0.448	0.406	0.043	0.794	7	1	0.5
JULIO	2.929	2.769	0.160	0.794	4	1	0.5
AGOSTO	4.358	6.411	-2.054	0.794	10	4	1
SEPTIEMBRE	5.202	3.393	1.809	0.794	15	14	10
TOTAL	15.594	15.846					
Coefficientes		Vol. Inicial					
A=	0.01	15					
B=	0.01						
C=	1						

Gráfica 19. Resultados del modelo calibrado en la presa de Malpaís.

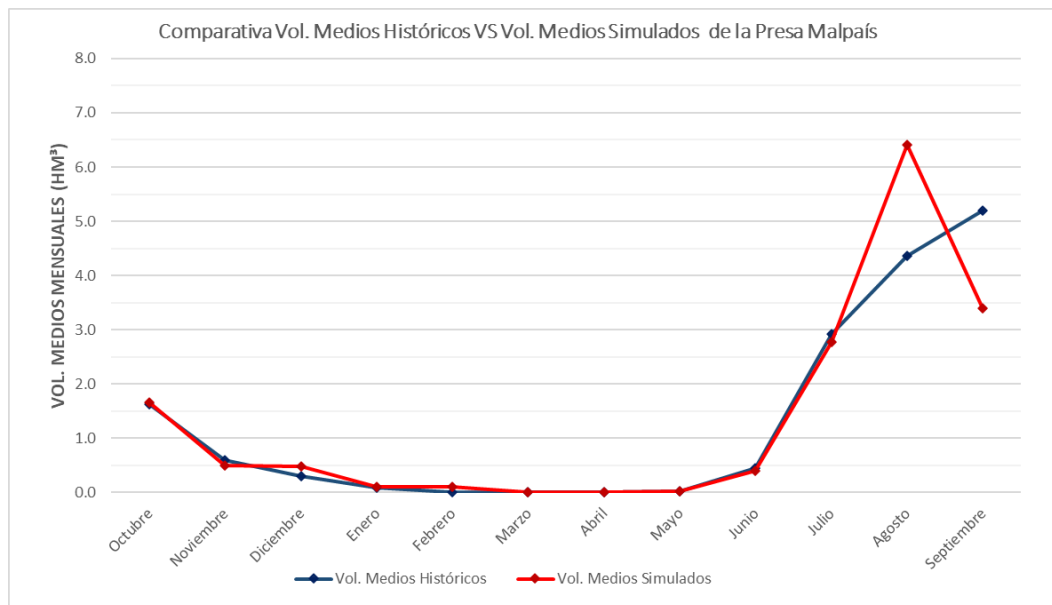




Gráfica 20. Comparativa de vol. mensuales históricos VS. vol. mensuales simulados en el embalse "Malpaís".



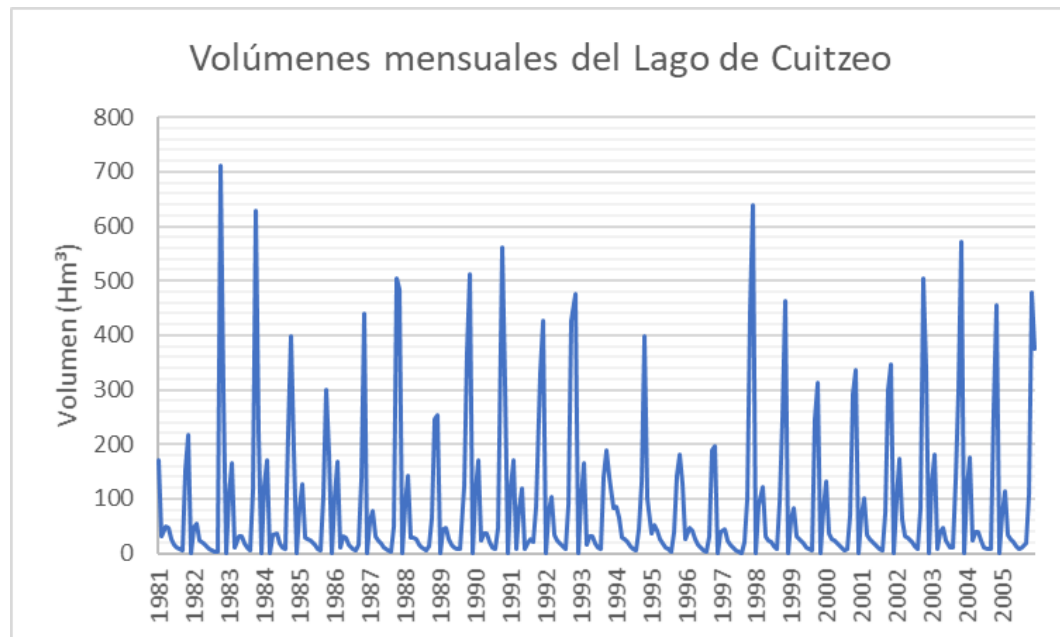
Gráfica 21. Comparativa vol. medios históricos VS. vol. medios simulados del embalse "Malpaís".



Como se observa en las tablas 40 y 42, los valores del RMSE se consideran aceptables, por lo tanto, la calibración del modelo de gestión de la Cuenca del Lago de Cuitzeo se acepta.

En la simulación se logra observar el comportamiento del lago, en función de los volúmenes finales que se obtienen del modelo de gestión, cuyos resultados son los siguientes:

Gráfica 22. Comportamiento de los volúmenes del Lago de Cuitzeo del modelo SIMGES calibrado.



Se puede observar en la gráfica anterior como el lago tiene un comportamiento con drásticas fluctuaciones en sus volúmenes y como va disminuyendo en los últimos años, esto indica una alteración que se debe a factores tales como el azolve del vaso del lago, a la variación en los eventos de lluvia y el cambio climático.

En el presente estudio no se puede realizar una comparativa de los resultados obtenidos con lo real debido a la inexistencia de datos actuales de caudales diarios e información sobre la volumetría del lago.

7.6 Índices de Alteración Hidrológica (IAH)

Los resultados obtenidos al aplicar esta metodología se presentan por río y se muestran de manera particular los tramos más representativos del estudio.

Como ya se ha mencionado, uno de los principales afluentes de la Cuenca del Lago de Cuitzeo es el Río Grande de Morelia, enseguida del Río Queréndaro, siendo el segundo el que muestra un mayor grado de alteración hidrológica, debido a que la metodología de los IAH realiza una ponderación con base a los caudales, dándole mayor peso a los tramos de río que tienen mayor caudal (aportación), sin embargo los tramos con mayor alteración



analizados de manera particular, están presentes en el Río Grande ya que este es el que presenta más demandas a lo largo de su cauce.

Figura 58. IAH del Río Grande de Morelia.

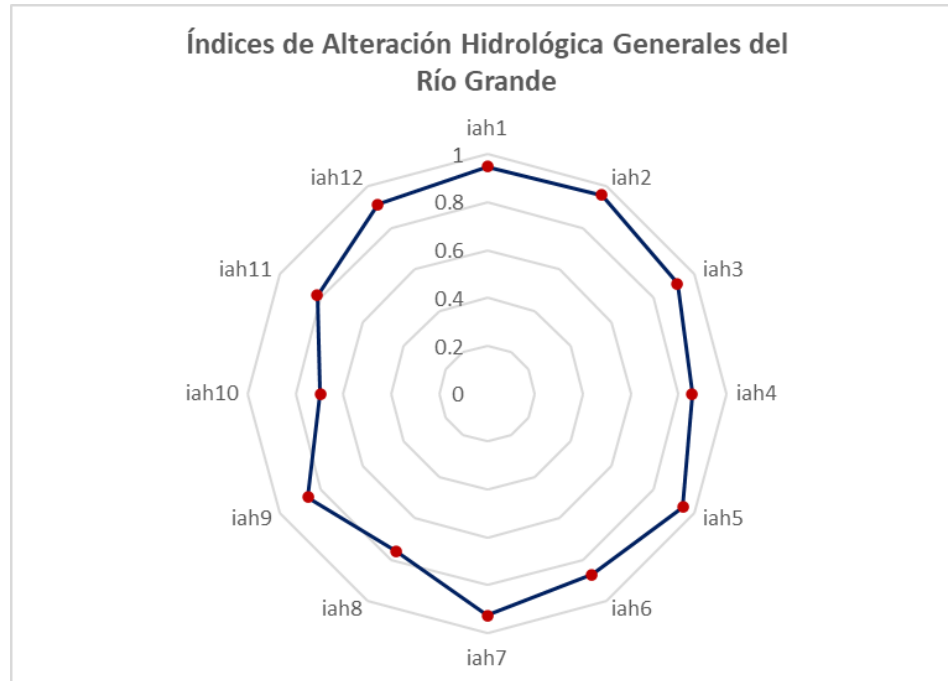


Tabla 43. Valores de los IAH del Río Grande de Morelia.

RÍO GRANDE DE MORELIA			
Evaluación de Alteración Hidrológica			Valor
VALORES HABITUALES	Magnitud	IAH1	0.9486
		IAH2	0.9572
	Variabilidad	IAH3	0.9188
		IAH4	0.8562
	Estacionalidad	IAH5	0.9447
		IAH6	0.8734
VALORES EXTREMOS MÁXIMOS	Magnitud	IAH7	0.9260
	Variabilidad	IAH8	0.7598
	Estacionalidad	IAH9	0.8650
VALORES EXTREMOS MÍNIMOS	Magnitud	IAH10	0.6963
	Variabilidad	IAH11	0.8194
	Estacionalidad	IAH12	0.9125
Promedio de los IAH		IAH_Aritm.	0.8732



Se puede observar que el estatus hidrológico general que mantiene el Río Grande está en un nivel 1, que corresponde a un muy buen estado haciendo un promedio de todos los IAH correspondientes a los 24 tramos que conforman a este río en el modelo SIMGES y que solamente el IAH8 y el IAH10 presentan un nivel 2 (buen estado), los cuales corresponden a los indicadores de variabilidad de los valores extremos máximos y a los de variabilidad de los valores extremos mínimos que demuestran una alteración mayor en periodos de avenidas y sequías.

En el río Grande de Morelia los tramos con mayor alteración son los que se encuentran enseguida de la Presa de Cointzio, siendo el primero el afectado por la demanda urbana de Morelia y por los retornos agrícolas que regresan el agua de las demandas agrícolas pero que no es la misma cantidad. Los tramos con mayor grado de alteración son del 102 al 106 (figura 59).

Figura 59. IAH para los tramos 102 al 106 del Río Grande de Morelia.

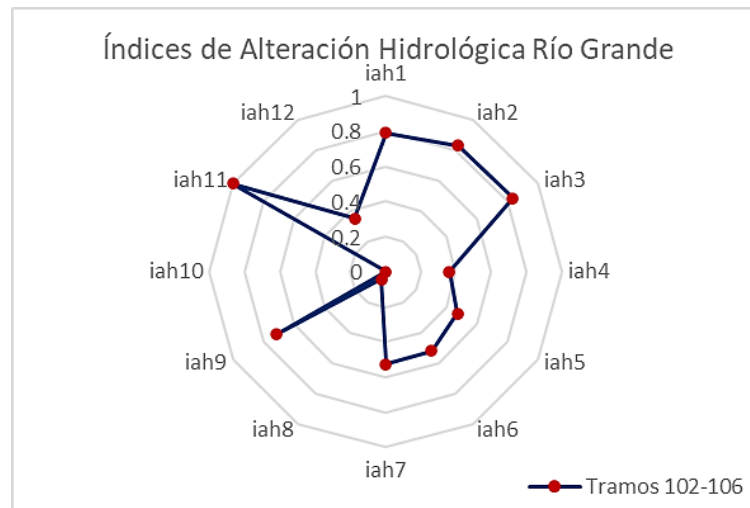
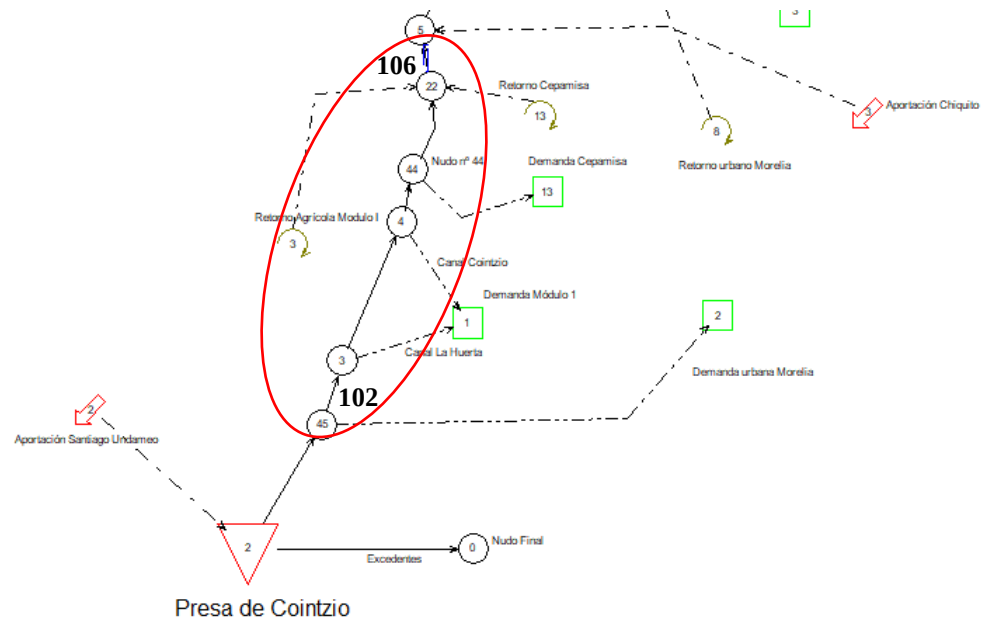




Tabla 44. Valores de los IAH para los tramos 102-106.

RÍO GRANDE DE MORELIA TRAMOS 102-106			
Evaluación de Alteración Hidrológica			Valor
VALORES HABITUALES	Magnitud	IAH1	0.7885
		IAH2	0.8268
	Variabilidad	IAH3	0.8364
		IAH4	0.3608
	Estacionalidad	IAH5	0.4733
		IAH6	0.5200
VALORES EXTREMOS MÁXIMOS	Magnitud	IAH7	0.5250
	Variabilidad	IAH8	0.0502
	Estacionalidad	IAH9	0.7167
VALORES EXTREMOS MÍNIMOS	Magnitud	IAH10	0.0000
	Variabilidad	IAH11	1.0000
	Estacionalidad	IAH12	0.3500
Promedio de los IAH			IAH_Aritm. 0.5373

Figura 60. Esquema de los tramos con mayor afectación.



Estos tramos muestran una completa alteración en la magnitud de sequías (valores extremos mínimos), ya que está circulando menos agua que en condiciones habituales y a pesar de esto, los requerimientos de las demandas urbanas y agrícolas son los mismos durante todo el periodo histórico que se está modelando, de la misma manera que en los índices generales del Río Grande, muestran el mismo comportamiento, pero se compensan con los retornos agrícolas y las aportaciones.



Figura 61. IAH del Río Queréndaro.

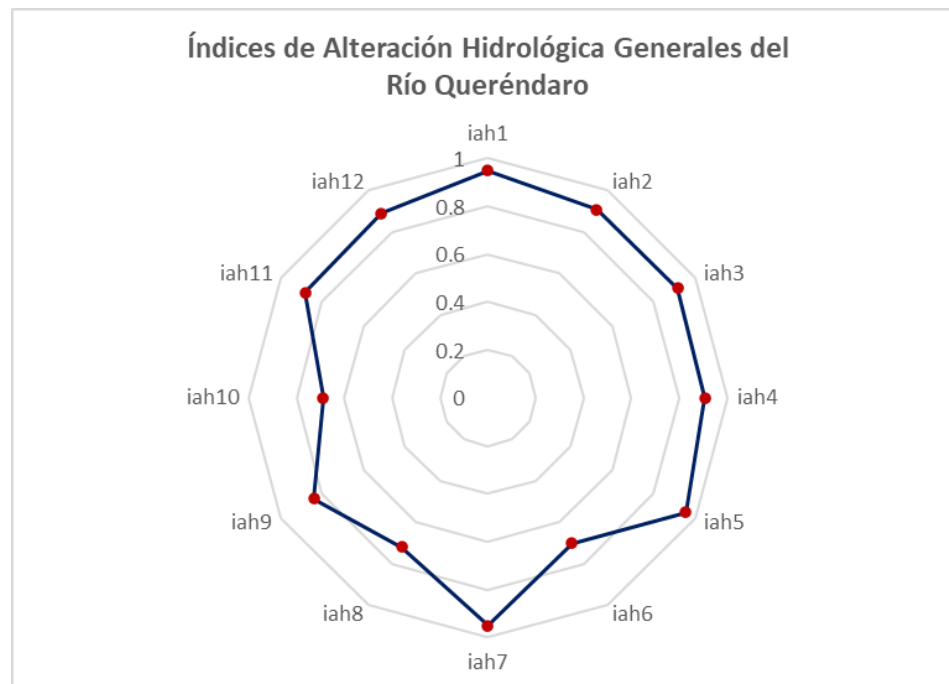


Tabla 45. Valores de los IAH del Río Queréndaro.

RÍO QUERÉNDARO			
Evaluación de Alteración Hidrológica			Valor
VALORES HABITUALES	Magnitud	IAH1	0.9490
		IAH2	0.9088
	Variabilidad	IAH3	0.9142
		IAH4	0.9070
	Estacionalidad	IAH5	0.9540
		IAH6	0.7007
VALORES EXTREMOS MÁXIMOS	Magnitud	IAH7	0.9517
	Variabilidad	IAH8	0.7187
	Estacionalidad	IAH9	0.8400
VALORES EXTREMOS MÍNIMOS	Magnitud	IAH10	0.6875
	Variabilidad	IAH11	0.8807
	Estacionalidad	IAH12	0.8902
Promedio de los IAH		IAH_Aritm.	0.8585



Figura 62. IAH para los tramos 202 y 203 del Río Queréndaro.

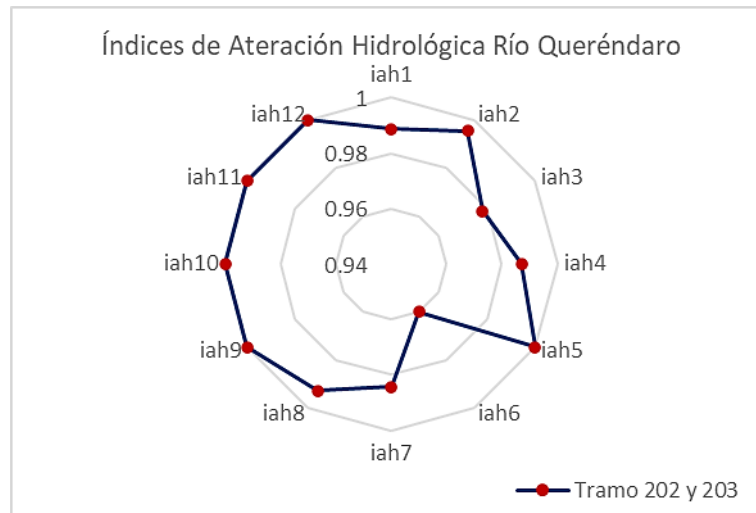
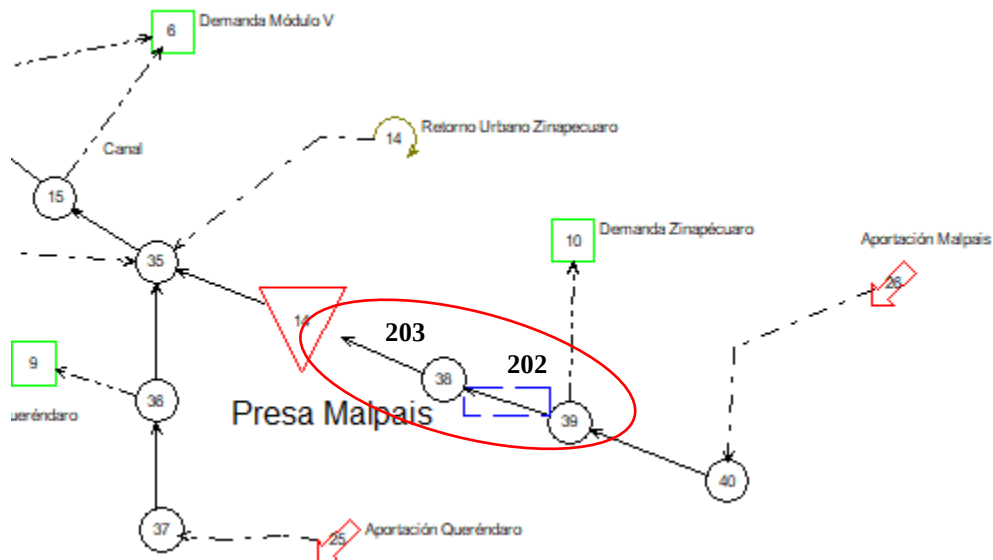


Tabla 46. Valores de los IAH para los tramos 202 y 203.

RÍO QUERÉNDARO TRAMOS 202 Y 203			
Evaluación de Alteración Hidrológica			Valor
VALORES HABITUALES	Magnitud	IAH1	0.9888
		IAH2	0.9953
	Variabilidad	IAH3	0.9781
		IAH4	0.9870
	Estacionalidad	IAH5	1.0000
		IAH6	0.9600
VALORES EXTREMOS MÁXIMOS	Magnitud	IAH7	0.9843
	Variabilidad	IAH8	0.9929
	Estacionalidad	IAH9	1.0000
VALORES EXTREMOS MÍNIMOS	Magnitud	IAH10	1.0000
	Variabilidad	IAH11	1.0000
	Estacionalidad	IAH12	1.0000
Promedio de los IAH		IAH_Aritm.	0.9905

Se puede observar que los IAH en el Río Queréndaro no muestran una alteración notable, ya que este río aporta solamente la décima parte que aporta el Río Grande, es por esto que al no transitar mucho caudal a través de su cauce y no tener demandas significativas, la alteración hidrológica es mínima.

Figura 63. Esquema de los tramos con menor afectación.



Tal y como se puede ver en el esquema, los tramos 202 y 203 están antes del embalse y solamente están afectados por una demanda que es la de Zinapécuaro que, al ser muy pequeña, no afecta de manera drástica los caudales del río, además que es compensada por la aportación de Malpaís.



8. CONCLUSIONES

El análisis de la hidrología superficial de una zona de estudio, requiere de diversos conocimientos en diferentes ciencias, criterios y condiciones que permitan elaborar modelos para estudiar situaciones difícilmente observables en la realidad y que estos modelos sean lo más exactos posibles. El elaborar un modelo que sea igual a la realidad resulta demasiado complejo, ya que hay muchos factores que influyen en los resultados de dicha modelación.

Un modelo depende directamente de los datos de entrada, datos que en el presente estudio son los correspondientes a la climatología (precipitación y temperatura) que son capturados por las estaciones climatológicas, al igual que los datos de escurrimiento (aforados en ríos) que sirven para realizar la calibración del modelo, estos datos corresponden a la información de las estaciones hidrométricas.

No obstante, en México existe una carencia de esta información, a pesar de que hay estaciones climatológicas e hidrométricas en casi todo el país, esto impacta de manera directa en la adecuada elaboración de modelos de precipitación-escorrentía, de gestión de recursos hídricos y estudios hidrológicos hechos con otras metodologías, sobreentendiendo entonces que, a mayor carencia de información, mayor será la diferencia que haya entre lo observado y lo modelado.

La información climatológica y de escurrimientos disponible en México presenta en algunos casos, series desactualizadas e incompletas de datos históricos debido a estaciones obsoletas, en mal estado o que fueron descontinuadas, sin embargo, la aplicación de métodos estadísticos y probabilísticos, permiten realizar un llenado de datos para obtener series completas y más recientes. En la actualidad, existen softwares que hacen de esta labor algo más sencillo, pero que si no se tiene el criterio y conocimientos adecuados se puede caer en el error de no interpretar adecuadamente los resultados.

Un estudio hidrológico no sólo consta de datos numéricos, sino que también para facilitar su elaboración, análisis e interpretación de resultados, requiere de información geográfica que se traslada a mapas para lograr visualizar de mejor manera la zona de estudio, así como las características geomorfológicas de la cuenca, esta información obtenida



principalmente de INEGI y CONABIO es procesada mediante softwares de información geográfica (GIS) para la elaboración de dichos mapas.

Como se mencionó anteriormente, se requieren datos observados para lograr la calibración de los modelos, esto con la finalidad de conocer la divergencia entre lo que se simula y lo que es real, para el modelo de precipitación-escorrentía la calibración se realiza de manera semiautomática con apoyo de el algoritmo SCE-UA, a diferencia de la calibración que se realiza en el modelo de gestión que es de manera manual y presenta el inconveniente de no saber con exactitud cuando dar por terminado este proceso ya que se debe tener un conocimiento completo para determinar que parámetros son más susceptibles al cambio y ver cual ajusta mejor la modelación, ya que para un mismo modelo puede haber diferentes combinaciones de parámetros que pueden llegar a ser mejores con base a una mayor experiencia.

En la Ingeniería Civil, para obras de almacenamiento o captación de agua es de suma importancia un análisis hidrológico exhaustivo y lo más exacto posible que permita conocer los volúmenes que escurren en una cuenca, por seguridad y para conocimiento de la disponibilidad de este recurso.

En la actualidad debido al grave problema de la escasez de agua, también se requiere de estudios hidrológicos y modelos de gestión que permitan conocer la disponibilidad de recursos hídricos existentes, esto con la finalidad de administrarlos y disminuir una sobreexplotación de ellos para mantener un nivel similar de llenado y vaciado de los embalses, tal es el caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo que presenta un desorden hidrológico causado por factores como el cambio climático, el azolve del vaso del lago provocado por el arrastre de sedimentos, la sobreexplotación del agua subterránea, la retención del escurrimiento superficial en ríos y arroyos intermitentes, obras de infraestructura, entre otras acciones antropogénicas.

A partir de los resultados del modelo de gestión, el cual se considera como un régimen alterado, se logra observar en el lago que los volúmenes presentan un comportamiento con drásticas fluctuaciones y que poco a poco han ido disminuyendo a causa de los factores mencionados con anterioridad. Tal y como se muestra en los años 1982 y 1983 donde se tienen volúmenes entre 710 hm³ y 628 hm³ y se aprecia claramente como van aminorándose



hasta los años 2003, 2004 y 2005 donde los volúmenes oscilan entre 572 hm³ y 477 hm³, teniendo una disminución del 19.4% al 24% en un periodo de tiempo de 23 años.

A partir de la restitución de los caudales de ríos se logra estimar un régimen natural (que es el que define los recursos existentes), para con ello realizar una comparativa y poder calcular los Índices de alteración Hidrológica presentes en los principales afluentes de la cuenca que son el Río Grande de Morelia y el Río Queréndaro, dando como resultado que no hay una gran alteración en cuanto a los escurrimientos superficiales en condiciones normales de lluvia (valores habituales) ya que los valores varían entre 0.85 y 0.95, más no en periodos de sequías donde se presentan IAH de 0.68 a 0.90.

La evaluación de los recursos hídricos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, permite no solamente conocer cuánta agua escurre, se precipita, infiltra o evapotranspira, sino que también permite identificar metodologías que pueden ser aplicables o adaptadas a otros casos de estudio, y en lo personal el aprendizaje para utilizar herramientas tecnológicas como EvalHID y SIMGES para aplicarlos en el ámbito laboral o académicos, además del desarrollo de un criterio más estricto para futuras líneas de investigación.



9. RECOMENDACIONES

En el presente estudio se tuvo la limitante de información carente y desactualizada, provocando que el periodo de análisis no fuera tan actual, por lo que se hace hincapié en obtener información directamente de CONAGUA, ya que los datos procesados fueron de la plataforma CLICOM y estos no son datos que se mantienen al día. Emplear series de datos con estas condiciones implica ser más estricto en las pruebas de validación y métodos de llenado de datos para corregir las posibles variaciones que puedan interferir en los resultados.

El elaborar un MPE o un modelo de gestión con esta información no proporciona datos reales especialmente en la restitución a régimen natural, pero se desarrollan metodologías que pueden ser aplicadas o adaptadas a estudios futuros y mejorar en gran parte los modelos para obtener mejores resultados.

Para los Índices de Alteración Hidrológica, factores como la falta de datos de aforo, causan en la gran mayoría de casos, que los valores obtenidos sean superiores a los que en realidad han sido provocados por acciones antrópicas.

Elaborar una propuesta de una red de monitoreo adecuada y su mantenimiento para presentarla ante las dependencias o autoridades competentes para el cuidado y mantenimiento de las estaciones climatológicas e hidrométricas, así como la instalación de ellas en puntos estratégicos que permitan obtener más y mejor información para mejorar la calidad y exactitud de los modelos.



10. REFERENCIAS

Andreu, J., Capilla, J., & Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177(3–4), 269–291. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-x](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-x)

Andreu, J., Solera, A., Capilla, J., & Ferrer-Polo, J. (2021). Herramienta EvalHID para la evaluación de recursos Hídricos. Manual Técnico, V1.1, Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.

Andreu, J., Solera, A., Capilla, J., & Ferrer-Polo, J. (2021). Modelo SIMGES para simulación de cuencas. Manual de usuario, v 3.0. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.

Antares.inegi.org.mx. 2020. SIATL v4 | Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. Disponible en: https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/

Aparicio Mijares, F., (1997). Fundamentos de Hidrología de superficie, México, DF. Edit. Limusa,

Arthington, A. H., Bunn, S. E., Poff, N. L., & Naiman, R. J. (2006). The Challenge of Providing Environmental Flow Rules. *Journal of Ecological Applications*, 16(4), 1311–1318. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[1311:TCOPEF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1311:TCOPEF]2.0.CO;2)

Bâ, K. M., Díaz, C., Llamas, J., & Llanos, H. (1995). Zonas semiáridas y su modelación hidrológica (lluvia-escorrentía). *Ingeniería Hidráulica En México*, (2), 21–31.

BANDAS. (2017 y 2018). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Obtenido de Conagua: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>

Bergström, S. (1991), "Principles and confidence in hydrological modeling", *Nordic Hydrology*.

Bravo-Espinoza, M, G. Barrera-Camacho, M.E. Mendoza, J.T. Sáenz, F. Bahaena-Juarez y R. Sánchez-Martínez (eds.). 2012. Contribuciones para el Desarrollo sostenible de la Cuenca



del Lago de Cuitzeo, Michoacán. INIFAP-Campo Experimental Uruapan, Michoacán. UNAM-Centro de investigaciones en Geografía Ambiental. Morelia, Michoacán, México.

Brooks, K. P. F. Ffolliott, H M. Gregersen y J. L. Thamnes (1992), Hydrology and the management of watersheds, Iowa University Press/AMES Iowa.

Campos Aranda, D. F. (1992). Procesos del Ciclo Hidrológico, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S. L. P.

Carlón Allende, T. and Mendoza, M., 2007. Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo. Investigaciones Geográficas. México.

CasasMas, A. G., Paredes Arquiola, J., (2013). Evaluación del recurso hídrico en la cuenca del río Turia (España) mediante la aplicación de modelos semiagregados de Precipitación-Escorrentía (memoria y anejos). Universitat Politècnica de València. Valencia, España.

Castelán, Enrique (2001), La participación de la sociedad civil y los gobiernos locales en el manejo de los recursos hídricos en México: la experiencia del Estado de Guanajuato, IV Diálogo Interamericano sobre Administración de Aguas (Foz de Iguaçu, Brasil, 2 al 6 de septiembre de 2001) (disponible en Internet: <http://www.ivdialogo.com/.%5Ctrabalhos%5Cdial044.pdf>)

Cázares Rodríguez, S. E., Rodríguez Licea, D., Sánchez Quispe, S. T., (2019). Validación, selección y llenado de datos de climatológicos por medio de una interfaz gráfica en MatLAB. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México

CICESE. (diciembre, 2019). Información de base de datos climatológicos: <http://clicom-mex.cicese.mx/>

CONABIO. (diciembre, 2019). Clima en Michoacán: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no

Diario Oficial de la Nación, Tercera Sección, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y alimentación, Ciudad de México, 15 de marzo de 2004.

Disponible en: <https://concepto.de/base-de-datos/#ixzz6hQPrZLOW>



ESRI. (febrero, 2021), Introducción a ArcGIS. Disponible en: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

Estrela, T. (1992). Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. Centro de Estudios Hidrográficos y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX.

Gallardo, J. s.f. Introducción al Análisis Clúster. Universidad de Granada, Granada, España. Disponible en <http://www.ugr.es/~gallardo/pdf/cluster-g.pdf>

Gutiérrez, R.; González, A.; Torres, F. y Gallardo, J.A. (1994). Técnicas de Análisis de datos multivariable. Tratamiento computacional. Servicio de Reprografía de la Facultad de Ciencias. Universidad de Granada.

Gutiérrez, R.; González, A.; Torres, F. y Gallardo, J.A. (1994). Técnicas de Análisis de datos multivariable. Tratamiento computacional.

Hassing, J., Ipsen, N., Clausen, T. J., Larsen, H., & Lindgaard-Jørgensen, P. (2009). Integrated Water Resources Management in Action The United Nations World Water Development Report 3 Water in a Changing World.

INEGI. (agosto,2019). Información de modelos digitales de elevaciones: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>

INEGI. (diciembre, 2020), Información de INEGI. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/inegi/quienes_somos.html

Israde Alcántara, I., Buenrostro Delgado, O., Garduño Monroy, V., Hernández Madrigal, V. and López Granados, E., (2008). Problemática geológico-ambiental de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, norte del estado de Michoacán. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, México.

LÓPEZ TRIGAL, L. (2015): Diccionario de Geografía aplicada y profesional. Terminología de análisis, planificación y gestión del territorio. Universidad de León, Servicio de Publicaciones.

LOPEZ, F., M. BLANCO, 1976. Hidrología Forestal, 1a Parte. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid, España.



Martínez Arroyo, Amparo, (2006). El agua en la atmósfera. Universidad Autónoma de México, Ciudad de México.

Mas Magdaleno, Fernando (2005): Caudales ecológicos: conceptos, métodos e interpretaciones. España, Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX.

Mendoza, M., Bocco, G., López Granados, E. and Bravo, M., 2002. Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. Investigaciones Geográficas.

Meneses, J., (2019). Introducción al análisis multivariante. Universitat Oberta de Catalunya. Barcelona.

Olaya Ferrero, V. (2012). Sistemas de información geográfica. España: CreateSpace Independent Publishing Platform.

Ortín león, Antonio (2017): Estudio de alteración hidrológica en cuencas con elevado estrés hídrico: el caso de la cuenca del río Júcar (tesis de Licenciatura). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Pardo Loaiza, J., (2016). GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO, ANTE EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO (tesis de Maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.

Raffino M. E., Concepto de “Base de datos”. Diciembre de 2020, Argentina

Revolución 3.0, 2020. Capítulo II sobre el Lago de Cuitzeo: El "viejo" y el desorden hidrológico. [video] Disponible en: <<https://fb.watch/6uoTpM9xAN/>> [Accessed 29 November 2018].

Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. Conservation Biology, 10(4), 1163–1174. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>



Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R., & Braun, D. (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37(1), 231–249. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x>

Salvador Figueras, M (2000): "Introducción al Análisis Multivariante", [en línea] 5campus.com, Estadística <<http://www.5campus.com/leccion/anamul>> (febrero del 2021).

SAS Institute Inc. (ener, 2021), Introducción a JMP. Disponible en: https://www.jmp.com/es_es/support/help/Discovering_JMP_9.shtml

Singh, V. P. (1995). *Computer models of watershed models* (Taylor & F). USA.

Témez, J. R. (1977). *Modelo Matemático de transformación “precipitación-escorrentía”*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. ASINEL. Madrid.

Thorntwaite CW (1948) *An approach toward a rational classification of climate*. American Geographical Society.

Toledo Ocampo, A., 2006. *Agua, hombre y paisaje*. México: SEMARNAT.

Vente Chow, Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1994). *Hidrología aplicada*. Mc Graw Hill.

Verdú, JM.; Batalla, RJ.; Martínez Casasnovas, JA. (2006). Estudio hidrológico de la cuenca del río Isábena (Pirineos, España). II: respuesta hidrológica. *Ingeniería del agua*. 13(4):331-343. <https://doi.org/10.4995/ia.2006.10498>

Viessman, W., Lewis G., Knapp, J. (1989). *Intorucyion to Hidrology*. New York, Harper and Row Publishers.