



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD
HÍDRICA EN LA CUENCA DEL LAGO DE
ZIRAHUÉN, MICHOACÁN.”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
DESARROLLO SUSTENTABLE**

**PRESENTA
MAURICIO JOSÉ RÍOS**

**DIRECTOR
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN**

**CODIRECTOR
DR. ROEL SÍMUTA CHAMPO**

**ASESORES
DR. FERMÍN PASCUAL RAMÍREZ**

MTRA. ROSALVA MENDOZA RAMÍREZ

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Diciembre de 2017

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a la **Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas**, por brindarme la oportunidad de formar parte de su comunidad universitaria desde la licenciatura y desarrollarme como profesionista.

Al **Posgrado en Ciencias en Desarrollo Sustentable**, por darme la enorme oportunidad de culminar mis estudios de posgrado.

Al **Instituto de Ingeniería de la UNAM** a través del **Proyecto 6331** denominado “Evaluación de los Indicadores del Marco Estratégico de Sustentabilidad Presión-Estado-Respuesta como Herramienta de Diagnóstico e Identificación de Problemas en la cuenca del lago de Zirahuén”, me fue asignada la beca para la realización de la presente tesis.

Al Proyecto **CONACYT-2269** Cátedras CONACYT.

Al Proyecto **PDCPN-2015-640** 'Bases para mejorar el aprovechamiento sustentable del agua de uso agrícola en México'.

Sin duda, agradezco infinitamente al **Dr. Rodolfo Silva Casarín** que, sin conocerme, me brindó todas las facilidades para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A la **Mtra. Rosalva Mendoza Ramírez**, por la oportunidad y la confianza que me confirió para realizar la investigación. Agradezco con más fervor, que me regale su amistad y su apoyo incondicional.

Al **Dr. Roel Símuta Champo**, por su valioso apoyo, ya que, de no contar con él, simplemente no hubiera sido posible realizar el presente trabajo de investigación. Asimismo, éste acercamiento académico, ha permitido de alguna manera construir un lazo de amistad que dio pie a descubrir los orígenes del árbol genealógico que indica el parentesco familiar existente.

Aprovecho estas líneas para hacer una mención especial para el **Dr. Fermín Pascual Ramírez**, sin menoscabo de la importancia de lo demás, expreso mis agradecimientos infinitos, puesto que, es quien dirigió el desarrollo de la investigación no importando su estatus administrativo. Te estaré agradecido eternamente por las oportunidades, los consejos, la confianza depositada hacia mi persona, los regaños ¡¡¡claro!!! que también son parte fundamental del aprendizaje, por guiarme en este mundo de la investigación, pero aún más por tu amistad sincera. Sin duda, todo lo anterior, ha contribuido para iniciar el camino hacia la aventura llamada “doctorado”, por supuesto, con tu guía. ¡¡¡Gracias Fermín!!! **LA CASUALIDAD NO EXISTE, TODO TIENE UNA EXPLICACIÓN.**

Al **Dr. Horacio Morales Iglesias** (al jefe) y al **Dr. Sergio López Mendoza**, de quienes he recibido apoyo constante, que, sin dudar un solo momento, impulsaron la posibilidad de realizar el presente trabajo.

A la **Lic. Vianey Ozuna Molina**, asistente de la coordinación de posgrado, por todas las facilidades y paciencia brindadas para realizar los trámites administrativos.

Por último, al **Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático** de la UNICACH, a su directora la **Dra. Silvia Ramos Hernández**; en primer lugar, por darme la oportunidad de explorar el mundo de la academia; en segundo lugar, por las facilidades prestadas para la realización de las estancias en el Campus Morelia de la UNAM.

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

Martha Patricia Ríos Ruíz

Gutemberg José Blanco

Quienes, a pesar de todas las adversidades, han sabido conducirnos en el camino de la honestidad, la honradez, humildad, el amor, y el trabajo. Que aun cuando hemos crecido, seguimos siendo sus chiquillos.

A MIS HERMANOS:

Sergio y Juan Carlos

¡¡Luchadores incansables!!!, al igual que yo, han tenido que trabajar muy duro para superarse. Que siempre están a mi lado cuando los necesito. Que un abrazo suyo, alivian las penas y los problemas cotidianos. ¡¡¡LOS AMO!!!

A MIS TÍOS:

Rigoberto, Grisel y José Guadalupe

Constantemente pendientes de mí y mi familia, apoyo permanente de su parte, sin esperar algo a cambio más que el gran amor que les tengo.

A MI ESPOSA:

Adalgiza

Esta es una dedicatoria especial para ti mi amor. En verdad que las palabras se quedan cortas para expresarte mis agradecimientos. Tú que siempre vas tomada de mi mano sin titubear un solo momento, un solo instante, quien viaja conmigo por el camino de la vida, quien soporta a mi lado los buenos y malos momentos, alentando e impulsando todo el tiempo alcanzar mis sueños sin prejuicio alguno. Impresionante tu labor de madre y padre en mi constante ausencia. ¡¡Este esfuerzo y logro es tuyo también!! ¡¡¡TE AMO MÁS QUE NUNCA!!!

A MIS HIJAS:

Zuria Sofía y Kira Yatzil

Mis mágicas princesas, ésta va por ustedes, a quienes les robo tiempo para poder proveerles de un mejor futuro. Mi motor, mi vida, mi aliento, trocitos de mi alma... ¡¡¡LAS AMO!!!

CON CARÍO PARA TODOS..... MAURICIO

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló mediante la aplicación de sistemas geoespaciales con datos disponibles para la cuenca del lago de Zirahuén, con el objetivo de conocer sus características morfométricas, físicas y socioeconómicas, así como la variación espacio-temporal del balance hídrico y su disponibilidad hídrica. Se inició con la obtención de parámetros morfométricos simples, consecuentemente se realizó el análisis de las características físicas y socioeconómicas a fin de establecer las relaciones que se manifiestan en el territorio; posteriormente se efectuó la estimación de la recarga hídrica para los años 1972, 1980, 1992, 2000, 2003, 2009 y 2015. La disponibilidad hídrica fue estimada contrastando los datos de recarga respecto a los volúmenes concesionados disponibles por el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) para los años de 1992, 2000, 2003, 2009 y 2015. Los resultados revelaron que la cuenca por sus características naturales intrínsecas, provee de las condiciones ideales para el establecimiento de actividades agropecuarias, lo que está contribuyendo a la expansión de áreas para cultivo de aguacate y zarzamora principalmente, los cuales se convierten en oportunidades laborales y derrama económica importante para la región. La recarga hídrica presentó valores altos para 1992 y 2000, con tendencia decreciente hacia el año 2015. Tanto la disponibilidad hídrica subterránea como la superficial presentaron una disminución paulatina al 2015 explicada por los volúmenes de demanda comprometidos en las concesiones de agua los cuales son inversamente proporcionales a la recarga. Los resultados mostraron que las técnicas geoespaciales resultan como una alternativa confiable para los fines de caracterización y estimación de la disponibilidad hídrica en cuencas a partir de datos disponibles.

Palabras clave: Morfometría, Caracterización, Recarga Hídrica, Sistemas Geoespaciales, REPDA, Volúmenes Concesionados

ABSTRACT

The current work has been developed through the application of geospatial systems with available data for the watershed of the Zirahuén lake, with the objective of knowing its morphometric, physical and socioeconomic characteristics, as well as the space-time variation of its hydric balance and its water availability. The first step was the collection of simple morphometric parameters, consequently an analysis of the physical and socioeconomical characteristics was made in order to establish the relationships that manifest on the territory; later on the water recharge estimate was made for the years 1972, 1980, 1992, 2000, 2003, 2009 and 2015. The water availability was estimated contrasting the recharging data with respect to the available volumes given by the Registro Público de Derechos del Agua (REDPA) for the years 1992, 2000, 2003, 2009 and 2015. The results revealed that due to its intrinsic nature, the watershed provides the ideal conditions for the establishment of agricultural activities, contributing to the expansion of areas for the cultivation of avocado and blackberry mainly, which turn into job opportunities and an economic impact for the region. The water recharge presented high values for 1992 and 2000 with a decreasing trend by the year 2015. Both the underground and the superficial water availability showed a gradual decrease by 2015 explained by the volumes of committed demand in the water concessions which are inversely proportional to the recharge.

The results showed that the geospatial technics are a reliable alternative for the purposes of characterization and estimation of water availability in watersheds through available data.

Keywords: Morphometry, characterization, water recharge, geospatial systems, REDPA, Consessioned, Volumes.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	6
1.1 GENERALIDADES	6
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.3 JUSTIFICACIÓN	18
1.4 HIPÓTESIS	18
1.5 OBJETIVOS	18
1.5.1 Objetivo general.....	18
1.5.2 Objetivos particulares	18
1.6 BIBLIOGRAFIA	19
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE ZIRAHUÉN, MICHOCÁN, MÉXICO....	23
2.1 Introducción.....	24
2.2 Materiales y métodos	28
2.3 Resultados y discusión.....	34
2.4 Conclusiones	54
2.5 Bibliografía	56
CAPÍTULO 3. VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DEL BALANCE HÍDRICO	61
3.1 Introducción.....	62
3.2 Materiales y Métodos.....	64
3.3 Resultados y discusión.....	83
3.4 Conclusiones	96
3.5 Bibliografía	97
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES	101

Índice de figuras

Figura 2.1. Macrolocalización de la cuenca del lago de Zirahuén	29
Figura 2.2. Curva hipsométrica de la cuenca del lago de Zirahuén	37
Figura 2.3. Frecuencias altitudinales	37
Figura 2.4. Cuenca del lago de Zirahuén.....	39
Figura 2.5. Perfil del cauce principal.....	41
Figura 2.6. Uso de suelo y vegetación Serie V.....	43
Figura 2.7. Tipos de suelo de la cuenca del lago de Zirahuén.....	45
Figura 2.8. Geología de la cuenca del lago de Zirahuén	46
Figura 2.9. Características climáticas	48
Figura 2.10. Climograma normales climatológicas 1951-2010.	49
Figura 2.11. Distribución de la población total	54
Figura 3.1. Ubicación de la cuenca del lago de Zirahuén	66
Figura 3.2. Malla de cobertura de uso de suelo y vegetación codificados para SWB.....	74
Figura 3.3. Malla de grupos hidrológicos de suelo	76
Figura 3.4. Malla de capacidad de retención de humedad del suelo	78
Figura 3.5. Malla de direcciones de flujo	79
Figura 3.6. Estructura de la tabla de consulta de cobertura de uso del suelo	81
Figura 3.7. Archivo de configuración recharge.ctl de SWB	83
Figura 3.8. Distribución espacial y temporal de la recarga	84
Figura 3.9. Comparativo de valores para elementos del balance hídrico	86
Figura 3.10. Ecuación de regresión lineal entre la recarga-precipitación	87
Figura 3.11. Relación escurrimiento/recarga.....	88
Figura 3.12. Variación de los volúmenes de agua comprometidos	90
Figura 3.13. Comportamiento de la disponibilidad hídrica subterránea	93
Figura 3.14. Comportamiento de la disponibilidad hídrica superficial	95

Índice de cuadros

Cuadro 1.1. Tipos de lago en Michoacán	11
Cuadro 2.1 Información geográfica tabular y espacial utilizada.....	30
Cuadro 2.2. Índices morfométricos	32
Cuadro 2.3. Clasificación de las cuencas de acuerdo a	35
Cuadro 2.4. Parámetros morfométricos de la cuenca	40
Cuadro 2.5. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del lago de Zirahuén.....	42
Cuadro 2.6. Tipos de suelo en la cuenca del lago de Zirahuén	44
Cuadro 2.7. Geología de la cuenca del lago de Zirahuén	46
Cuadro 2.8. Estadísticas de producción agrícola 2013.....	50
Cuadro 2.9. Características demográficas de las localidades principales de la cuenca del lago de Zirahuén	52
Cuadro 2.10. Proyección de la población 2010-2030.....	53
Cuadro 3.1. Síntesis de información utilizada.....	67
Cuadro 3.2. Elección de fechas para la modelación	68
Cuadro 3.3. Datos raster y tabulares requeridos por el modelo.....	71
Cuadro 3.4. Codificación del tipo de uso de suelo y vegetación.....	73
Cuadro 3.5. Tasa de infiltración por grupo hidrológico de suelos	75
Cuadro 3.6. Reclasificación y codificación de los grupos hidrológicos de suelos.....	75
Cuadro 3.7. Código para la capacidad de retención de humedad.....	77
Cuadro 3.8. Datos tabulares de variables climáticas	80
Cuadro 3.9. Valores de los principales componentes de la recarga hídrica	85
Cuadro 3.10. Volúmenes de Recarga y Escurrimiento.....	88
Cuadro 3.11. Volúmenes concesionados $Mm^3/año$	89
Cuadro 3.12. Volúmenes comprometidos de aguas subterráneas $Mm^3/año$	91
Cuadro 3.13. Volúmenes comprometidos de aguas superficiales $Mm^3/año$	91
Cuadro 3.14. Disponibilidad hídrica subterránea en $Mm^3/año$	92
Cuadro 3.15. Disponibilidad hídrica superficial en $Mm^3/año$	94

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 GENERALIDADES

A) Disponibilidad hídrica

La disponibilidad hídrica, también conocida como la disponibilidad natural del agua, se refiere a la comparación entre oferta y demanda del recurso hídrico dentro de la cuenca. La estimación de la oferta hídrica para un espacio y período determinado tiene como base el modelado del ciclo hidrológico mediante el balance hídrico, lo que permite determinar la disponibilidad de agua en cada una de sus fases: precipitación, evapotranspiración, infiltración y escurrimiento (Faustino, Jiménez, Velásquez, Alpízar, y Prins, 2006).

En términos generales, a escala mundial, la disponibilidad de recurso hídrico se distribuye de la siguiente manera: 97.5% del agua es salada y el 2.5% restante agua dulce; respecto a este último el 68.9% se encuentra en forma de hielo y glaciares; 29.9% en aguas subterráneas; 0.9% en pantanos y manglares; únicamente el 0.3% considerada como la porción renovable se encuentra en cuerpos de agua como lagos y ríos (Shiklomanov, 1998).

La porción de agua dulce accesible para las diferentes actividades humanas proviene de cuerpos de agua superficiales, la humedad del suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos. En la mayoría de los casos, los núcleos de población se encuentran alejados de las zonas de afloramiento, por lo que el acceso a los recursos hídricos representa costos asociados a la captación, almacenamiento y distribución que pagan los usuarios (CONAGUA, 2015a).

En nuestro país, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha regionalizado el territorio en cuencas hidrológicas las cuales hacen un total de 731, éstas a su vez se han organizado en 37 regiones hidrológicas y agrupadas en 13 regiones hidrológico-administrativas (CONAGUA, 2015a).

En México, la disponibilidad superficial depende en gran medida de la precipitación, la cual se estimó para el año 2014 en un promedio de 760 mm anuales. Considerando la totalidad del territorio nacional y la precipitación promedio anual, el volumen de agua que se recibe es de 1, 489 hm³, de los cuales el 71.5% retorna a la atmósfera por evapotranspiración, 22.2% escurre por los afluentes superficiales y 6.3% se infiltra. Es preciso mencionar que éstas no son la única fuente de entrada y salida de agua, puesto que las cuencas transfronterizas con los países vecinos como Estado Unidos de América, Guatemala y Belice aportan y reciben flujos de importante consideración para las actividades productivas (CONAGUA, 2014).

En lo específico, con respecto al agua superficial, se estima que aproximadamente 400 hm³ de agua se escurren anualmente, de los que el 87% ocurre en 39 ríos principales. El 65% de este escurrimiento es aportado por siete ríos principales: Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá. Estas cuencas representan el 22% de la superficie nacional (CONAGUA, 2010) . Además, la acumulación de escurrimiento de los lagos alcanza aproximadamente 10,410 millones de m³. Dentro de estos, el lago de Chapala es el lago de mayor tamaño en la República Mexicana con una capacidad de almacenamiento de 8,126 millones de m³ y una superficie de 1,116 km², alcanzando profundidades hasta de 6 m.

En cuanto al agua subterránea, el territorio mexicano se divide en 653 acuíferos publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF) con fecha 5 de diciembre de 2001, las delimitaciones geográficas de estos fueron establecidas en el período 2003-2009 (CONAGUA, 2015a).

Existe preocupación debido a que el 37% del volumen total concesionado se obtiene de corrientes subterráneas, es decir, aproximadamente 28,341 millones de m³ al año. De acuerdo a registros obtenidos de CONAGUA, desde 1975 ha incrementado la cantidad de acuíferos sobreexplotados con el 60%. El agua subterránea tiene diferentes usos a) consuntivos: agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida y termoeléctricas y, b) no consuntivos:

hidroeléctricas. Por otra parte, de los 653 acuíferos 31 de ellos presentaron suelos salinos, en tanto que 15 mostraron evidencias de intrusión de agua mar y finalmente, 106 reportan condiciones de sobreexplotación (CONAGUA, 2015b).

B) Programa Nacional Hídrico

En el presente apartado se consideran aspectos plasmados en el Programa Nacional Hídrico 2014-2018 (PNH 2014-2018) el cual menciona que el objetivo es garantizar la seguridad hídrica con la visión de alcanzar el desarrollo sustentable para las futuras generaciones. Se considera como el instrumento de planificación con visión a largo plazo en el cual se define la ruta y aquellos elementos necesarios para alcanzar la sustentabilidad hídrica en nuestro país mediante la definición de objetivos, estrategias y líneas de acción, los cuales serán evaluados y actualizados en un período de dos años (CONAGUA, 2014).

Es importante mencionar que el PNH 2014-2018 se ha elaborado en apego al Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2013-2018, el cual se conoce como la hoja de ruta que el Gobierno de la República y la sociedad de manera conjunta deberán seguir para alcanzar el desarrollo del país; además está alineado a diversos programas sectoriales y a las cinco metas nacionales del PND 2013-2018 (México en paz, México incluyente, México con educación de calidad, México próspero y México con responsabilidad global). Siguiendo en estricto apego al PND 2013-2018, se han definido cinco lineamientos rectores para el sector hídrico (DOF, 2013):

1. El agua como elemento integrador de los mexicanos.
2. El agua como elemento de justicia social.
3. Sociedad informada y participativa para desarrollar una cultura del agua
4. El agua como promotor del desarrollo sustentable.
5. México como referente mundial en el tema de agua.

C) Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Michoacán de Ocampo

Los aspectos mencionados en los párrafos siguientes, provienen del Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Michoacán de Ocampo (PHV2030EMICH) (CONAGUA, 2009).

El estado de Michoacán posee una gran riqueza y diversidad de recursos naturales, principalmente ríos, lagos, humedales, acuíferos y costas que durante mucho tiempo han provisto de alimento y sustento a la población. No obstante, la situación de estos recursos se ha vuelto preocupante debido al aprovechamiento desmedido del mismo, la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, azolvamiento y degradación de hábitats acuáticos.

Como parte de los resultados obtenidos de los diagnósticos realizados a los recursos y servicios hidráulicos y, de los escenarios de manejo de las aguas en cuencas y acuíferos del estado, se elaboró el PHV2030EMICH con el propósito fundamental de proporcionar las bases que brinden la posibilidad de impulsar el desarrollo de la entidad con el fortalecimiento de las instituciones, participación social a la par de la disponibilidad del recurso hídrico, el crecimiento social y económico que permitan consolidar la planificación hídrica estatal. A partir de ello se plasman los objetivos, acciones y estrategias que orientan la política hídrica estatal de los próximos años, en congruencia con el Plan Hídrico 2007- 2012 y con los Programas Hídricos de los Organismos de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico y Balsas, partiendo del concepto de cuenca hidrográfica.

El estado de Michoacán de acuerdo a la delimitación hidrológica-administrativa de la CONAGUA territorialmente pertenece a dos organismos de cuenca: el primero denominado Lerma-Santiago-Pacífico (LSP), integrado por 68 municipios; el segundo llamado Balsas tiene 45 municipios. Estos a su vez, son divididos en subregiones de planeación los cuales ocupan un número determinado de municipios. Derivado de lo anterior, el territorio estatal está integrado por 27 cuencas con una superficie total de 112,009.82 km², de los cuales 58,643.63 km² que representan el 52.4% se encuentran en territorio michoacano. Un total de 14 cuencas se encuentran en su

totalidad dentro del estado, mientras que las 13 restantes comparten espacialmente territorios con los estados vecinos. Sin embargo, es importante mencionar que para el PHV2030EMICH se consideraron únicamente 24 cuencas, debido a que las tres sobrantes ocupan tan solo el 0.16% del territorio estatal (río Jaltepec, cuenca propia de la laguna de Yuriria y río Lerma 4 (Salamanca)).

Una importante mención que se realiza en el PHV2030EMICH es el hecho de señalar, con base en comparaciones entre los registros del Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) para 2002 y 2008, la condición de sobreexplotación de los acuíferos de Huetamo y Coahuayana y una aparente recuperación de los acuíferos de Morelia-Queréndano y Lagunillas-Pátzcuaro.

De igual manera, en este mismo documento se puntualiza que el balance hidráulico de las cuencas de la Región Hidrológica 18 del río Balsas, indica que se encuentran clasificadas en condiciones de déficit debido a que el volumen disponible aproximado de 10,859 hm³/año se localiza aguas abajo de la presa “La Villita” geográficamente ubicado en el punto de descarga del río Balsas hacia el Pacífico, esto ocasiona gran dificultad para poder aprovechar los volúmenes antes mencionados (CONAGUA, 2009).

D) Sistema lacustre Michoacano

El estado de Michoacán resguarda dos de las cuencas hidrológicas húmedas más importantes de nuestro país, la primera de ellas es el sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago, la segunda la del río Balsas. Las condiciones climáticas presentes proporcionan mantenimiento hidrológico de los ríos, lagos y presas del estado. A pesar de que prevalecen paisajes formados por fosas tectónicas en interacción con el Cinturón Volcánico Mexicano, en la zona hay alta densidad de población lo que ha propiciado el desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias e industriales (Israde, 2005). Por su tamaño se consideran como más importantes tres cuerpos de agua: lago de Chapala, lago de Cuitzeo y lago de Pátzcuaro.

De acuerdo a la génesis morfológica, los cuerpos de agua se pueden clasificar en 5 grupos: 1) lagos tectónicos, 2) lagos vulcano-tectónicos, 3) lagos cratéricos, 4) ríos, 5) artificiales. El cuadro 1.1, detalla los tipos de lago y los nombres que reciben los cuerpos de agua superficiales presentes en Michoacán.

Cuadro 1.1. Tipos de lago en Michoacán

Grupo	Cuerpo de agua
1) Lagos tectónicos	Lago de Cuitzeo
	Laguna de Zacapu
	Lago de Chapala
2) Lagos vulcano-tectónicos	Lago de Pátzcuaro
	Lago de Zirahuén
3) Lagos cratéricos	La Alberca de Zacapu
	La Alberca de Teremendo
	La Alberca de Tacámbaro
	Las Siete Luminarias
4) Ríos	Lago de Camécuaro
	Río Lerma
	Río Balsas

E) Lago de Zirahuén

El lago de Zirahuén forma parte de la región hidrológica del río Balsas, administrativamente ante la CONAGUA se encuentra dentro del organismo de cuenca Balsas, con sede en Cuernavaca, Morelos (CONAGUA, 2009). El lago está ubicado a una altitud promedio de 2,075 msnm y el vaso tiene una superficie de 9.3 km² (Israde, 2005); tiene pendientes más abruptas en relación a la

mayoría de los lagos tectónicos y su profundidad máxima es de 42 m. El lecho se encuentra constituido de cenizas volcánicas emitidas por dos volcanes de reciente formación: el Jorullo en 1759, y el Parícutín en 1943 (Davies, 2000 citado en Israde (2005)). El lago de Zirahuén es considerado como el cuerpo de agua más joven de Michoacán en relación con los lagos de Cuitzeo, Chapala, Zacapu como los más antiguos y Pátzcuaro en proceso de envejecimiento.

El lago de Zirahuén también es considerado como uno de los destinos turísticos más importantes para el estado de Michoacán, se localiza a 21 km de Pátzcuaro. En él se puede observar una belleza escénica impresionante rodeada de casa de madera conocidas como trojes. En sus riveras se ofrecen servicios turísticos de cabañas y restaurantes (Mercado y Palmerín, 2012).

F) Estudios hidrológicos en México

El recurso hídrico es de vital importancia para el desarrollo de la sociedad. Históricamente las grandes civilizaciones se han desarrollado en estricto apego a los grandes cuerpos de agua; esto ha constituido una dependencia del recurso hídrico para la evolución del ser humano. Desde etapas muy tempranas de la historia los componentes del ciclo hidrológico han sido analizados de manera aislada lo cual permitió el desarrollo del enfoque científico de la hidrología. Sin embargo es hasta el año de 1674 en que se publica el libro *De l'origine des fontaines* de Pierres Perrault, quien se considera como el precursor de la hidrología científica (Ramírez, 2012).

Por lo tanto, el monitoreo del recurso hídrico, para conocer su dinámica y comportamiento, resulta necesario para el manejo y la planeación del mismo. Los trabajos sobre el ciclo hidrológico se han desarrollado en diferentes partes del mundo y con diferentes enfoques que van desde el conocimiento de la disponibilidad hídrica hasta los impactos que estos tienen ante el cambio climático.

Actualmente, existe gran cantidad de trabajos para la estimación del balance hidrológico y la disponibilidad hídrica mediante la aplicación de métodos novedosos y herramientas geoespaciales, en particular la aplicación de los sistemas de información geográfica y el acoplamiento a las técnicas de percepción remota.

Coronel (2008) desarrolla el trabajo de investigación con el objetivo de extraer los patrones geoespaciales en algunos componentes del balance hídrico para el distrito de riego 011 para transferir información sobre este proceso a usuarios especializados. Encontró que las deficiencias en el acceso de información de las mediciones de las variables hidrológicas propician que existan vacíos en la información acerca de la capacidad de recarga de los acuíferos los cuales provocan sobreexplotación. A través de incorporar patrones espaciales en los procesos hidrológicos fue posible identificar lo que llamó dominio de la escala espacial y temporal de la precipitación y la evapotranspiración. Determinó que la asociación entre variables depende de la porción de territorio que se analiza. En función de lo anterior determinó un umbral de escala mayor a 1:80000. Como resultado extrajo patrones espacio-temporales de la precipitación y la evapotranspiración para dos periodos del año 2002, los cuales permitieron evidenciar que estos datos pueden ser adecuados y utilizados para la mejora de modelos espaciales.

Sánchez (2010) utilizó los sistemas de información geográfica para la simulación del balance hídrico en las cuencas de Tres Valles de San Luis Potosí y de Tamaulipas para el año 2007. Este modelo conocido como SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es una herramienta que permite obtener datos de diversos fenómenos hidrológicos que se presentan al interior de una cuenca de manera rápida y precisa. La simulación fue planteada para ser utilizada como alternativa para la estimación de la cantidad de agua total disponible en una cuenca en la que no se tiene información de caudales medidos. Los resultados obtenidos en la simulación del periodo de 1989

a 2007 mostraron disponibilidad por un volumen total de 4,599.611 Mm³/año con una precipitación media de 1,161.93 mm.

La tesis doctoral realizada por Fuentes (2011) trata el análisis geográfico de la oferta y demanda del agua superficial en el Pico de Tancítaro, al oeste del estado de Michoacán. Realizó el monitoreo y evaluación del recurso hídrico basándose en registros históricos; sin embargo, estos datos, como en muchos casos, resultaron ser incompletos e insuficientes lo cual obligó a la aplicación de métodos indirectos para conocer y estimar los volúmenes existentes y sus procesos. A través de la aplicación de métodos multicriterio y multifactorial fue posible estimar el recurso hídrico bajo un enfoque más práctico; incluyó además herramientas que consideran el ámbito social, tema poco abordado en este tipo de trabajos.

Rosales (2012) en el marco del proyecto denominado “Desarrollo de redes para la gestión territorial del Corredor Biológico Mesoamericano-México” elaboró el trabajo para la estimación del balance hídrico de la cuenca fronteriza Usumacinta tomando como base información referida a la cobertura vegetal, modelo digital de terreno, temperatura de superficie, evaporación potencial y precipitación. Con ellos fue posible estimar la evapotranspiración real, almacenamiento en el suelo y escurrimientos, entre otros parámetros biofísicos. Como resultado de la metodología aplicada obtuvo que, durante la época de secas, el almacenamiento de agua en el suelo es el que aporta el agua suficiente para que los niveles de escurrimiento y la evapotranspiración real sean superiores a los estimados para períodos de lluvia.

En su trabajo de investigación Aponte (2013) integró una metodología considerando los aspectos relacionados con la disponibilidad del agua y los costos que se asocian a posibles efectos causados por el cambio climático, puesto que se prevé que este último tenga repercusiones importantes para la sociedad y los ecosistemas, afectando la disponibilidad y la calidad de las fuentes de agua en el Sistema Cutzamala.

Rodríguez (2015) analizó el panorama de la situación actual que guarda el manejo de los recursos hídricos en la cuenca del río Yautepec. Hizo el estudio de las características biofísicas y socioeconómicas de la cuenca, y realizó el cálculo del balance hídrico superficial y de aguas subterráneas obteniendo como resultado una disponibilidad de 8.84 hm³ para esta última, sin embargo, para la disponibilidad superficial se determinó que no presenta disponibilidad. A partir de ello elaboró proyecciones al año 2020, encontrando que de continuar con la tendencia actual se presentará un déficit de la disponibilidad del agua.

G) Trabajos desarrollados en el área de Zirahuén

Diferentes estudios se han desarrollado en el área de Zirahuén; los resultados reportados hasta ahora, puntuales en el sentido espacio-temporal, obedecen a los diferentes objetivos particulares de cada uno de ellos. Hasta la fecha los estudios de largo plazo para conocer las interacciones a nivel de la cuenca, han estado ausentes.

Cruz (1995) recopiló trabajos diversos realizados en el lago de Zirahuén contemplando aspectos físico-químicos, biológicos, ecológicos etc.; sin embargo, muy pocos de estos han considerado a la cuenca como una unidad de estudio territorial en donde interactúan diferentes elementos del paisaje, bióticos y abióticos que permiten la transferencia de materia y energía, como lo es el caso del ciclo hidrológico. En este sentido, encontró estudios que abordaron aspectos hidrológicos y su relación con la red hidrográfica y aspectos geomorfológicos; otro estudio analizó la calidad del agua como resultado de las actividades productivas mediante mediciones del flujo del afluente principal del lago y realizó una descripción de la red hidrológica de la cuenca; más adelante encontró un estudio que analizó la relación entre la vegetación y su distribución en la cuenca; finalmente, un trabajo realizó una descripción amplia de varios aspectos de la cuenca y el lago.

Estudios realizados en épocas recientes con diversos enfoques dentro de la cuenca han proporcionado conocimiento acerca de la dinámica que se presenta.

Madrigal et al. (2004) realizaron la descripción de la flora y la vegetación acuáticas del lago, donde determinaron que se encuentran representadas por 35 familias, 55 géneros, y 93 especies; de las cuales 27 son tolerantes, 42 subacuáticas y 24 acuáticas estrictas. Identificaron que las especies se distribuyen a lo largo de la línea de costa y están presentes a partir de las zonas de inundación temporal y en algunos casos hasta los 12 m de profundidad como individuos aislados. Mencionaron que la cuenca y el lago presentan signos de deterioro que han sido ocasionados por la explotación irracional de los recursos.

Bravo et al. (2009) efectuaron la predicción de la erosión hídrica a partir de la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) asociado a diferentes sistemas de manejo agrícola en la cuenca del lago de Zirahuén. Concluyendo que el uso de la labranza de conservación en las áreas agrícolas en la cuenca, permitiría reducir la pérdida de suelo a menos de $3 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$.

Torres (2010) realizó un estudio palinológico de la secuencia sedimentaria ZIR03-I que abarca los últimos 17,000 años, colectada en la zona norte del lago de Zirahuén, Michoacán, con el objetivo de documentar los cambios paleoambientales y paleoclimáticos durante el Pleistoceno tardío-Holoceno. A partir de comparar la información con datos de diatomeas y los geoquímicos que se obtuvieron en trabajos previos, identificó seis periodos caracterizados por cambios notorios tanto en la vegetación regional como en la local.

En definitiva, es evidente que han realizado trabajos de investigación con deficiente enfoque hidrológico para la cuenca del lago de Zirahuén, con excepción del realizado por Cruz (1995) en el que se estima el balance hídrico utilizando variables hidrológicas y climáticas. Este autor, realizó la caracterización morfométrica de la cuenca con base en los valores promedio de la precipitación, evapotranspiración y temperatura que influyen en el lago, así como el

comportamiento a través del tiempo; determinó las tendencias climáticas y los cambios del nivel superficial del lago en el período de 1991 a 1992; calculó los coeficientes de infiltración en diferentes partes de la cuenca y evaluó los parámetros que influyen en el balance hídrico del lago para el período de 1991-1992.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La cuenca del lago de Zirahuén, un cuerpo de agua de particular importancia turística y ecológica, adolece de estimaciones actuales de la disponibilidad hídrica. Existen pocas publicaciones arbitradas trabajos que den cuenta sobre las condiciones hidrológicas del lago, la mayor parte de ellos, han dejado de lado el aspecto geo-espacial, y se reducen a situaciones puntuales, que están lejos de mostrar la problemática general en conjunto.

En ese contexto, la cuenca del lago de Zirahuén ha experimentado la transformación de las estructuras económicas, políticas y sociales en las comunidades rurales de esta región y de nuestro país en general, lo que ha favorecido a los cambios de los sistemas tradicionales de aprovechamiento de los recursos que ocasionan la degradación de los sistemas naturales, con énfasis en el continuo cambio de uso de suelo de vegetación natural a cultivos, particularmente el cultivo de aguacate.

De acuerdo con lo reportado en el DOF del 17 de sept. de 2007 citado en el PHV2030EMICH, el recurso hídrico en la cuenca del lago de Zirahuén está clasificado con déficit de disponibilidad de aguas superficiales de aproximadamente $-16 \text{ hm}^3/\text{año}$. Sin embargo, este dato no se encuentra actualizado, por lo que este trabajo pretende estimar la disponibilidad hídrica para fechas más recientes y a través del tiempo para diferentes períodos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La evaluación espacial de la disponibilidad hídrica de la cuenca del lago de Zirahuén, es considerada de importancia relevante para conocer la capacidad de carga que mantiene y las condiciones hídricas en la que se encuentra.

El conocimiento oportuno del comportamiento de las variables que intervienen en el ciclo hidrológico y sus interacciones en el espacio, permitirán conocer con relativa anticipación las repercusiones de las actividades de conservación y/o deterioro de la cuenca y dinámica de las actividades productivas sobre el lago de Zirahuén.

El presente trabajo se encuentra enmarcado dentro del proyecto “Evaluación de los Indicadores del Marco Estratégico de Sustentabilidad Presión-Estado-Respuesta como Herramienta de Diagnóstico e Identificación de Problemas en la cuenca del lago de Zirahuén”, aprobado en el marco de la convocatoria 2016 de Proyectos Internos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por lo que será considerado como un indicador hidrológico en dicho diagnóstico.

1.4 HIPÓTESIS

Las herramientas de análisis geoespaciales sirven para estimar la disponibilidad hídrica utilizando información sobre cobertura de usos de suelo y vegetación, edafología, precipitación, temperatura y modelo digital de elevación de la cuenca del lago de Zirahuén.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Evaluación de la cantidad de agua disponible en la cuenca del lago de Zirahuén.

1.5.2 Objetivos particulares

- Determinar las características morfométricas de la cuenca.

- Estimar la recarga hídrica en la cuenca para 1972, 1980, 1992, 2000, 2003, 2009, 2015.
- Estimar la disponibilidad hídrica para 1992, 2000, 2003, 2009 y 2015.

1.6 BIBLIOGRAFIA

Aponte, H. N. O. (2013). *Metodología para evaluar la disponibilidad de agua y sus costos bajo los escenarios de cambio climático*. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado a partir de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6131/tesis.pdf?sequence=1>

Bravo, E. M., Mendoza, C. M. E., y Medina, O. L. E. (2009). Escenarios de erosión bajo diferentes manejos agrícolas en la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Investigaciones Geograficas*, (68), 73–84. Recuperado a partir de <http://www.ejournal.unam.mx/rig/RIG068/RIG000006805.pdf>

CONAGUA. (2009). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Michoacán de Ocampo*. (S. del M. A. y R. Naturales, Ed.) (Primera ed). México, D.F. Recuperado a partir de www.conagua.gob.mx

CONAGUA. (2010). *Estadística del Agua en México, edición 2010*. México. Recuperado a partir de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/EAM2010_Espanol_16Junio2010.pdf

CONAGUA. (2014). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. México, D.F.: SEMARNAT. Recuperado a partir de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PROGRAMA_Nacional_Hidrico_2014_2018_espa%C3%B1ol.pdf

- CONAGUA. (2015a). *Estadísticas del agua en México, edición 2015*. México, D.F. Recuperado a partir de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>
- CONAGUA. (2015b). *Numeragua, México 2015*. México, D.F. Recuperado a partir de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/NUMERAGUA2015.pdf>
- Coronel, E. C. (2008). *Aplicación del proceso de descubrimiento de patrones geoespaciales al estudio sobre componentes del balance hídrico*. Centro de Investigación en Geografía y Geomática “Ing. Jorge L. Tamayo” A.C. Recuperado a partir de <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/24>
- Cruz, A. J. O. (1995). *Balance hídrico en la cuenca del Lago de Zirahuén, Michoacán, México* (Tesis de pregrado). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.
- DOF. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 (2013). México. Recuperado a partir de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5430957yfecha=24/03/2016
- Faustino, J., Jiménez, F., Velásquez, S., Alpízar, F., y Prins, C. (2006). *Curso: Gestión integral de cuencas hidrográficas*. Turrialba, Costa Rica: CATIE. Recuperado a partir de <https://es.scribd.com/document/344496594/Gestion-Integral-de-Cuencas-Hidrografica>
- Fuentes, J. J. de J. A. (2011). *Estimación del recurso hídrico superficial en el Pico de Tancítaro, Michoacán: Oferta, Demanda y Escenarios de Disponibilidad* (Tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado a partir de http://www.ciga.unam.mx/images/posgrado/tesis/jj_fuentes.pdf
- Israde, A. I. (2005). Descripción física y biótica. En L. E. Villaseñor Gómez (Ed.), *La biodiversidad en Michoacán estudio de caso* (Primera, pp. 32–38). México. Recuperado a partir de

http://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/pdf/EE_MICHOACAN_2005.pdf

Madrigal, G. X., Novelo, R. A., y Chacón, T. A. (2004). Flora y vegetación acuáticas del Lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Acta Botanica Mexicana*, 68, 1–38. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57406801>

Mercado, V. H., y Palmerín, C. M. (2012). *El estado de Michoacán y sus regiones turísticas*. (Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso, Ed.). Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso. Recuperado a partir de <http://www.eumed.net/libros-gratis/2012b/1230/michoacan-regiones.html>

Ramírez, O. A. I. (2012). *Hidrología esencial*. (E. Digital, Ed.). México: Editorial digital Tecnológico de Monterrey. Recuperado a partir de https://www.editorialdigitaltec.com/materialadicional/ID083_RamirezOrozco_HidrologiaEsencial.cap1.pdf

Rodríguez, S. R. C. (2015). *Plan de gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del Río Yautepec* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado a partir de <http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7340/tesis.pdf?sequence=1>

Rosales, A. E. R. (2012). *Metodología y estimación del balance hídrico de la cuenca del Usumacinta*. México, D.F. Recuperado a partir de https://www.google.com.mx/url?sa=tyrct=jyq=yesrc=sysource=webycd=1yved=0CBwQFjAAyurl=https://www.agua.org.mx/index.php/component/docman/doc_download/1738-metodologia-y-estimacion-del-balance-hidrico-de-la-cuenca-del-usumacinta?Itemid=yei=VzeoU_ODGOap8QHGI

Sánchez, O. S. (2010). *Caracterización morfológica y simulación del balance de la cuenca “Tres*

Valles, S.L.P.” (Tesis de maestría). Colegio de Postgraduados. Recuperado a partir de <http://text-mx.123dok.com/document/nzw5n90z-caracterizacion-morfometrica-y-simulacion-del-balance-de-la-cuencia-tres-valles-s-l-p.html>

Shiklomanov, I. A. (1998). World Water Resources. A new appraisal and assessment for the 21st century. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, 40.

Torres, R. E. (2010). *Evidencias de cambio climático durante el Pleistoceno-Holoceno en la región occidental de México a través del análisis palinológico en sedimentos del Lago de Zirahuén, Michoacán* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE ZIRAHUÉN, MICHOACÁN, MÉXICO

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló con la aplicación de técnicas geoespaciales para realizar la caracterización morfométrica y el análisis de la interacción de las variables físicas y socioeconómicas que prevalecen en la cuenca del lago de Zirahuén. El estudio se hizo con los datos cartográficos y tabulares disponibles en diversas instituciones de la administración federal. Se evaluaron parámetros morfométricos generales, de forma, de relieve y de red hidrográfica, así como las variables físicas de usos de suelo y vegetación, edafología, geología y climas. El aspecto socioeconómico y demográfico se integró con índices de marginación, proyecciones de población y datos de actividades económicas y productivas. Los resultados obtenidos revelaron que la cuenca es de tamaño intermedia pequeña de forma alargada, en fase de vejez. La cuenca es de orden 5, con un cauce de 27.9 km, pendiente media de 5.4%, patrones de drenaje de tipo radial centrífugo y subparalelo. El origen geológico de tipo volcánico, presenta una litología constituida por basaltos que dan origen a suelos de tipo andosol que sustentan una cobertura vegetal formada por coníferas y latifoliadas. El régimen de precipitación anual es de 1,162.20 mm y la temperatura media anual es de 16.1 °C. Las actividades productivas son principalmente el cultivo de aguacate, maíz, avena y zarzamora. En cuanto a población se refiere, Santa Clara del Cobre y Opopeo son las únicas localidades que albergan más de 10,000 habitantes. Las proyecciones de población al 2030, indican que Santa Clara del Cobre tendrá una disminución del 7.8 %, mientras que para Zirahuén se pronostica un aumento del 19.3%. Por último, se puede concluir que la integración de los diferentes elementos presentes en la cuenca a través de los SIG permite el entendimiento de la dinámica de los mismos orientados al manejo integrado de cuencas.

2.1 Introducción

El agua es el recurso natural del que dependen todas las actividades socioeconómicas y funciones ecosistémicas (United Nations, 2012) para el desarrollo de la vida en el planeta y el progreso social. Además es considerado como el recurso natural insustituible, agotable y máspreciado, por lo que su uso irresponsable puede causar graves problemas a las presentes y futuras generaciones (Saldívar, 2007).

A escala mundial, la disponibilidad de recurso hídrico se distribuye de la siguiente manera: 97.5% del agua es salada y el 2.5% restante agua dulce; respecto a este último el 68.9% se encuentra en forma de hielo y glaciares; 29.9% en aguas subterráneas; 0.9% en pantanos y manglares; únicamente el 0.3% se encuentra en cuerpos de agua como lagos y ríos, es decir la porción renovable.(Shiklomanov, 1998).

En el mundo, la disponibilidad de agua dulce según las estadísticas del agua FAO (2016) cuenta con 108,963 hm³/año de precipitación; 42,810 hm³/año de recursos hídricos renovables internos (RHRI) el cual representa el 100%. La distribución del volumen de precipitación a escala continental se manifiesta de la siguiente manera: Americano 44,408 hm³/año, Asiático 26,855 hm³/año, Africano con 20,371 hm³/año, Europeo 12,564 hm³/año, Oceanía 4,765 hm³/año. Mientras tanto, el volumen de RHRI está representado por 19,536 hm³/año (45.6%) para América, 11,865 hm³/año (27.7%) para Asia, 6,576 hm³/año (15.4%) para Europa, 3,931 hm³/año (9.2%) para África y 902 hm³/año (2.1%) para Oceanía.

Si bien existe disponibilidad de RHRI en el mundo, la distribución de este recurso sobre el planeta no es equitativo, Shiklomanov (2000) después de haber comparado y analizado la disponibilidad específica del agua en diferentes regiones y países en un período de tiempo, concluye que la disponibilidad del recurso hídrico no coincide con la distribución de la población y el desarrollo económico.

En México, la disponibilidad superficial depende en gran medida de la precipitación, la cual se estimó para el año 2014 en un promedio de 760 mm anuales. Considerando la totalidad del territorio nacional y la precipitación promedio anual, el volumen de agua que se recibe es de 1, 489 hm³/año, de los cuales el 71.5% retorna a la atmósfera por evapotranspiración, 22.2% escurre por los afluentes superficiales y 6.3% se infiltra. Es preciso mencionar que estas no son las únicas fuentes de entradas y salidas de agua, puesto que las cuencas transfronterizas con los países vecinos como Estado Unidos de América, Guatemala y Belice aportan y reciben flujos de importante consideración para las actividades productivas (CONAGUA, 2014).

En cuanto al agua subterránea, el territorio mexicano se divide en 653 acuíferos los cuales fueron publicados en el DOF con fecha 5 de diciembre de 2001. Por otra parte, de los 653 acuíferos 31 de ellos presentaron suelos salinos, en tanto que 15 mostraron evidencias de intrusión de agua mar y finalmente, para el 31 de diciembre del 2014 se han reportado 106 acuíferos en condiciones de sobreexplotación. Respecto al uso del recurso hídrico, se ha estimado que el volumen concesionado para usos consuntivos en el período comprendido entre el 2005 y 2014, el 61.3% se obtiene de aguas superficiales; las aguas subterráneas presentan sustancial importancia en México debido a que el 38.7% (32.906 hm³/año) del volumen total concesionado para usos consuntivos es obtenida de esta. Aunado a lo anterior, las condiciones futuras no son muy alentadoras en la disponibilidad de agua renovable en México, de acuerdo a las proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO) para el período 2014-2030 la población aumentará en 17.8 millones de personas; se estima que el 78.3% del total de la población en el 2030 se asentará en localidades urbanas, lo que indica que abandonarán los ambientes rurales, provocando el aumento del consumo y la disminución del agua renovable per cápita para México. En relación a ello el agua renovable se ha estimado que decrecerá de los 3,736 m³/hab/año para el 2014 a 3,253 m³/hab/año para el 2030 (CONAGUA, 2015).

El estado de Michoacán de acuerdo a la delimitación hidrológica-administrativa de la CONAGUA territorialmente pertenece a dos organismos de cuenca: el primero denominado Lerma-Santiago-Pacífico (LSP), integrado por 68 municipios; y el segundo, llamado Balsas, formado por 45 municipios. Estos a su vez, son divididos en subregiones de planeación las cuales ocupan un número determinado de municipios. Derivado de lo anterior, el territorio estatal está integrado por 27 cuencas con una superficie total de 112,009.82 km², de los cuales 58,643.63 km² (52.4%) se localizan en territorio michoacano. Un total de 14 cuencas se encuentran completamente dentro del estado, mientras que los 13 restantes comparten espacialmente territorios con los estados vecinos. Sin embargo, es importante mencionar que en el PHV2030EMICH se consideraron únicamente 24 cuencas, debido a que las tres restantes ocupan tan solo el 0.16% del territorio estatal (río Jaltepec, cuenca propia de la laguna de Yuriria y río Lerma 4 (Salamanca)) (CONAGUA, 2009).

Una importante mención que se realiza en el PHV2030EMICH es el hecho de señalar, con base en comparaciones entre los registros del REPDA para 2002 y 2008, la condición de sobreexplotación de los acuíferos Huetamo y Coahuayana y una aparente recuperación de los acuíferos de Morelia-Queréndano y Lagunillas-Pátzcuaro. Así mismo es significativo enfatizar que el balance hidráulico de las cuencas de la Región Hidrológica 18 del río Balsas, se encuentran clasificadas en condiciones de déficit (CONAGUA, 2009).

Existen muchas definiciones por diversos autores de cuenca hidrográfica alrededor del mundo. Petts y Amoros (1996) citado en Toledo (2006) la definen como la más eficiente y fascinante organización de la naturaleza. En tanto, mediante una visión más integral y desde el punto de vista hidrológico, es el área en donde las diferentes fases del ciclo hidrológico depende de las características naturales y antrópicas presentes; la cuenca no es simplemente la unidad hidrológica, sino también la entidad socio-político-ecológica, que desempeña un papel crucial en

la determinación de la seguridad alimentaria, social y económica y proporciona servicios de apoyo vital a la población rural (Wani *et al.*, 2008).

Para conocer las características de una cuenca y el comportamiento a través del tiempo de los componentes biofísicos que la integran, es importante aplicar estudios cuantitativos y cualitativos. La morfometría como un análisis cuantitativo de una cuenca, permite definir características de la misma mediante la aplicación de ecuaciones matemáticas para la obtención de índices los cuales determinan el estado y la transformación que ha sufrido a través del tiempo (Rai, Mohan, Mishra, Ahmad, y Mishra, 2014). La morfometría es considerada como el medio esencial en el análisis geomorfológico de cierto territorio, se define como la medición y la configuración de la superficie terrestre, de su forma y sus dimensiones topográficas (Esquivel, Bueno, Sánchez, Velásquez y Muñoz, 2015).

Para las ciencias hidrológicas, conocer las características morfométricas de una cuenca es de suma importancia en la evaluación del potencial de las aguas subterráneas y superficiales. Estas características requieren el análisis de parámetros propios de la cuenca y de su red de drenaje, por mencionar el cálculo del área y perímetro de la cuenca, el orden de corriente la longitud de las corrientes, la densidad de drenaje, etc.(Rai *et al.*, 2014). Además de los parámetros geomorfológicos, considera los aspectos geológicos, edáficos y la cobertura vegetal para caracterizar una cuenca; las características edáficas condicionan la permeabilidad y la capacidad de infiltración; por último, la cobertura vegetal (bosques y cultivos) controla la capacidad de retención, evapotranspiración y el escurrimiento dentro de una cuenca.

El presente trabajo presenta especial importancia ya que se integró la evaluación morfométrica bajo la aplicación y el uso de los SIG respondiendo al desarrollo tecnológico de las investigaciones actuales en el campo de la hidrología. Además, el conocimiento de la interacción entre los elementos socioeconómicos y el comportamiento de las variables naturales en el espacio,

permitirá establecer las bases científicas para un análisis hidrológico más detallado que posibilite la conservación y el manejo del recurso hídrico en la cuenca del lago de Zirahuén.

2.2 Materiales y métodos

a) Ubicación de área de estudio

Geográficamente, la cuenca del lago de Zirahuén se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas extremas Latitud Norte 19°21'09.43" y 19°29'50.28" y, Longitud Oeste - 101°29'11.38" y -101°46'21.22", en la porción central norte del estado de Michoacán de Ocampo (figura 2.1); pertenece a la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico y a la subprovincia Neovolcánica Tarasca (INEGI, 2001).

De acuerdo con la regionalización hidrológica de la CONAGUA, está ubicada en la cuenca R. Tepalcatepec-Infiernillo dentro de la Región Hidrológica 18 Balsas; la superficie oficial de la cuenca es de 273.07 km² y el perímetro de 90.34 km, es de tipo cerrada (endorreica); su afluente principal es el río El Silencio también conocido como La Palma (CONAGUA, 2009); colinda al suroeste con la subcuenca río La Parota, al sureste con la subcuenca río Tacámbaro, al noreste con la subcuenca del lago Cuitzeo y al norte con la subcuenca del lago de Pátzcuaro. Abarca una extensión territorial cuya superficie pertenece a los municipios de Salvador Escalante (73.66%), Pátzcuaro (24.79%) y una pequeña porción al municipio de Tacámbaro (1.55%) (INEGI, 2016).

El parteaguas está conformado por un sistema de montañas y lomeríos que alcanzan alturas que van de los 2311 msnm a los 3283 msnm; resalta al este el cerro El Burro con la máxima elevación, mientras que el cerro El Puerto ubicado al oeste presenta la elevación menor de los cerros. Adicionalmente, en la parte alta de la cuenca se encuentran otras elevaciones como los cerros El Janamo (3,025 msnm), La Tapada (3008 msnm), El Frijol (2979 msnm), Zirahuén (2969 msnm), El Cantón (2943 msnm) y El Morillo (2921 msnm) (INEGI, 2014).

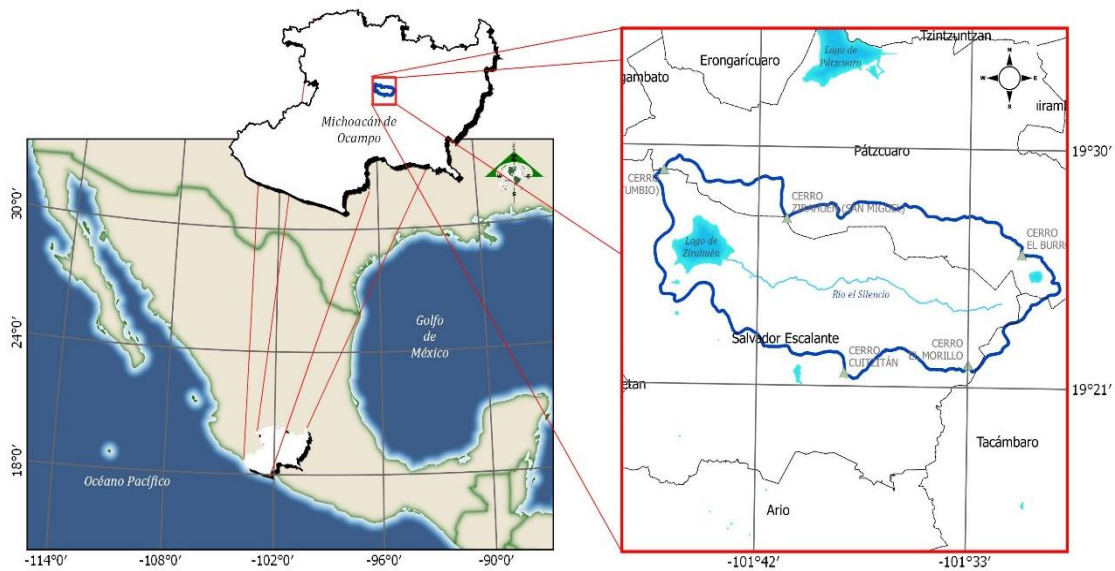


Figura 2.1. Macrolocalización de la cuenca del lago de Zirahuén

b) Materiales

La mayor parte de la información cartográfica utilizada en el presente trabajo fue obtenida a través de consultas a la página web y solicitudes de información al Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)¹. Los datos correspondientes a índices de marginación y proyección de la población fueron tomados del Consejo Nacional de la Población (CONAPO)². Con respecto a los indicadores de pobreza, la información fue tomada del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL)³. La información sobre actividades productivas y económicas, fue obtenida de conformidad con los datos presentados en el Sistema de Consulta de Información Geoestadística Agropecuaria (SCIGA)⁴ y el Servicio de

¹ <http://www.inegi.org.mx/>

² http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Quehacer_Institucional

³ <http://coneval.org.mx/>

⁴ SCIGA: <http://gaia.inegi.org.mx/sciga/viewer.html>

Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)⁵. El cuadro 2.1, resume fechas y fuentes de información utilizadas en este trabajo.

Cuadro 2.1 Información geográfica tabular y espacial utilizada

Tipo	Formato	Versión	Escala	Clave carta	Fuente	Nombre
Topográfico	Shapefile	Serie III	1:50,000	E14A31, E14A32	INEGI (2014)	Conjunto de datos vectoriales topográficos
Edafología	Shapefile	Serie II	1:250,000	Continuo Nacional	INEGI (2013)	Conjunto de datos vectoriales edafológicos
Geología	Shapefile	Serie I	1:250,000	E1401	INEGI (1983)	Conjunto de datos geológicos vectoriales
Climas	Shapefile	NA	1:1,000,00 0	Continuo Nacional	INEGI (2008)	Conjunto de datos vectoriales
Climas	Shapefile	NA	1:250,000	E1401	INEGI (1988)	Conjunto de datos vectoriales efectos climáticos regionales
Límite municipal	Shapefile	Versión 6.2	NA	Continuo Nacional	INEGI (2014)	Marco geoestadístico 2014 versión 6.2
Límite de cuenca	Shapefile	Edición 2	1:50,000	RH18	INEGI (2010)	Red hidrográfica escala 1:50,000
Uso de suelo y vegetación	Shapefile	Serie V	1:250,000	Continuo Nacional	INEGI (2013)	Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación Serie V
Rezago social	Excel	NA	NA	Nacional	CONEVAL (2010)	Rezago social por localidades
Marginación	Shapefile	NA	NA	Nacional	CONAPO (2012)	Mapa de grado de marginación por localidad 2010
Proyecciones de la población	Excel	NA	NA	Michoacán	CONAPO (2014)	Michoacán localidades
Censo de población y vivienda 2010	Excel	NA	NA	Nacional	INEGI (2010)	ITER_2010
Estadística de producción agrícola 2013	Excel	NA	NA	Municipal	SAGARPA (2015)	Agt_cierre_2013

⁵ SIAP: <http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/default.aspx>

c) Metodología

El análisis de las coberturas de información en formato vectorial, se hizo utilizando el software ArcGIS 10.3⁶; el procesamiento de la información se detalla a continuación:

- **Recopilación de información.** Se realizó la búsqueda de información existente y disponible para el área de trabajo, tomando en consideración aspectos de escala, fechas de publicaciones recientes y disponibilidad.
- **Homologación del sistema de referencia espacial.** En la integración de la base de datos geoespacial, se utilizó información de diferente fuente, fecha de publicación y marco de referencia. Por ello, fue necesario hacer la homologación bajo el marco de referencia geodésico del INEGI, ajustando sistemas de coordenadas y de referencia geodésica al marco de referencia internacional ITRF2008 época 2010.
- **Homologación de límites geográficos.** Se ejecutaron procesos geoespaciales para delimitar las capas temáticas y cartas topográficas acorde con los límites espaciales que ocupa el polígono de la subcuenca del lago de Zirahuén.
- **Análisis de la información.** Se realizaron procedimientos de geoprocésamiento y análisis espacial para el cálculo de las características geométricas de las entidades espaciales temáticas, operaciones algebraicas y algoritmos matemáticos para la obtención de parámetros morfométricos de la subcuenca.

Morfometría

Se seleccionaron los parámetros más comunes utilizados para conocer la naturaleza morfológica de las cuencas, que se mencionan en el cuadro 2.2 donde también aparece la fuente primitiva de los criterios de cálculo. Es preciso notar que la delimitación de la cuenca se tomó de

⁶ ESRI: *Environmental Systems Research Institut*. <http://www.esri.com/>

la información de cuencas generada por SIATL⁷ (Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas).

Cuadro 2.2. Índices morfométricos

Parámetros	Ecuación	Unidad	Referencia
Generales			
Área (A)	A	km ²	
Perímetro (P)	P	km ²	
Longitud de la Cuenca (La)	La	km	Horton (1932)
Ancho máximo (Am)	Am		
Ancho promedio (Ap)	$Ap=A/La$	km	
De Forma			
Coefficiente de compacidad (Kc)	$0.282 P/A^{0.5}$		
Índice de alargamiento (Ia)	La/Am		
De Relieve			
Curva hipsométrica	CH		Horton (1932)
Pendiente media de la cuenca	Pm	%	Horton (1954)
De la Red Hidrográfica			
Numero de orden (Oc)	Oc	ADI	Strahler (1964)
Densidad de drenaje (Dd)	Lt/A	Km/ Km ²	Horton (1954)
Frecuencia de drenaje (Fd)	Nt/A	Km ²	Horton (1932,1954)
Longitud del cauce principal (Lc)	Lc	Km	Horton (1932)
Pendiente media del cauce (Pmc)	$\Delta h/Lc$	ADI	Horton (1932)

⁷ http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/

Usos de suelo y vegetación

Para la caracterización de la cobertura de uso de suelo y vegetación, se utilizó la Serie V a escala 1:250,000 del producto denominado ‘uso de suelo y vegetación’. Este producto, detalla las condiciones más recientes y actualizadas a lo largo del territorio mexicano sobre los diferentes tipos de vegetación, así como la ocupación en las actividades agropecuarias (INEGI, 2015).

Edafología

La caracterización edafológica se realizó mediante la capa Edafológica Serie II a escala 1:250,000, que representa la distribución geográfica de los tipos de suelos en el país. La clasificación de los suelos está referida a la base referencial mundial del recurso suelo 2014 (WRB, 2014) publicada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (INEGI, 2004).

Geología

En la caracterización geológica, se utilizó el conjunto vectorial de datos geológicos escala 1:250,000 con énfasis en la información sobre los tipos de roca que afloran en la cuenca caracterizadas por la génesis y edad (unidades cronoestratigráficas) y las estructuras geológicas conformadas por ejes estructurales, estructura tabular, fallas y fracturas (INEGI, 2005b).

Climas

Para la caracterización climática, se usaron las capas vectoriales en formato digital de unidades climáticas escala 1:1000,000 y efectos climáticos regionales escala 1:250,000. La primera presenta los tipos de climas definidos mediante la metodología de clasificación de Köppen (1936) modificado por Enriqueta García (1964) y complementada con aportaciones hechas por el INEGI

(1980) para la República Mexicana. La segunda presenta las isoyetas, isotermas y dirección del viento generados a partir de datos de archivos climatológicos de temperatura media y precipitación (INEGI, 2000).

Aspectos socioeconómicos y demográficos

La caracterización socioeconómica se realizó utilizando el censo de población y vivienda 2010 del INEGI mediante los principales resultados por localidad 2010 (ITER 2010), que consiste en indicadores de población y vivienda a nivel de localidad (INEGI, 2013). Los índices de marginación por localidad fueron tomados de los productos generados por CONAPO a partir del ITER 2010, que se consideran como la medida-resumen del impacto global de las carencias que la población presenta en función al acceso a la educación, vivienda y carencia de bienes y servicios (CONAPO, 2012a). Por lo que respecta a la dinámica poblacional, se tomaron en cuenta los datos demográficos 1990-2010, así como las proyecciones de población para el periodo 2010-2030 realizados por CONEVAL. Las actividades económicas y productivas, se analizaron a partir de los datos presentados por el SCIGA.

2.3 Resultados y discusión

a) Morfometría

Los métodos morfométricos, aunque simples, han sido utilizados y aplicados para relacionar la altura-área, superficies de erosión, pendiente, y características particulares del terreno (Nongkynrih y Husain, 2011). Particularmente, la morfometría es fundamental en las características de drenaje de una cuenca, ya que estos determinan el comportamiento de la velocidad con que las aguas circulan sobre la superficie y condicionan la capacidad de respuesta de la cuenca ante las precipitaciones (Esper y Perucca, 2014).

Los parámetros morfométricos seleccionados han sido evaluados a través de procesamiento digital de información cartográfica bajo la plataforma SIG ArcGIS 10.3 para la cuenca del lago de Zirahuén (cuadro 2.4). Estos parámetros han sido organizados en tres grupos y se exponen de la siguiente manera:

Generales

La cuenca está representada con una área (A) de 273.4 km²; esta magnitud es considerada como la medida de la superficie cerrada por la divisoria de aguas que determina el tamaño de la cuenca, además es indispensable para el cálculo de otras variables (Jardí, 1985). De acuerdo a la propuesta de clasificación de Campos (1998), la cuenca manifiesta ser intermedia pequeña (cuadro 2.3); su Perímetro (P) es de 90.7 km; posee una longitud (La) de 26.3 km, este parámetro también conocido como longitud axial o eje de la cuenca, representa la longitud existente entre el punto más lejano y el punto de desfogue o desembocadura; tiene un ancho máximo (Am) de 12.8 km y un ancho promedio (Ap) de 10.4 km. Estos parámetros por sí solos no proporcionan información relevante, sin embargo, son útiles para la definición de otros parámetros más adelante.

Cuadro 2.3. Clasificación de las cuencas de acuerdo a su tamaño. Adaptado de Campos (1998)

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia pequeña
500 a 2,500	Intermedia grande
2,500 a 5,000	Grande
>5,000	Muy grande

Forma

El coeficiente de compacidad (K_c) o índice de Gravelius obtenido es de 1.6, de acuerdo a Campos (1998) manifiesta tener forma oval-oblonga a rectangular-oblonga, es decir de forma alargada; el índice de alargamiento (I_a) resultante es de 2.1, el cual indica que la cuenca es de forma alargada, (Horton, 1932). Esta condición coadyuva a que esté menos sujeta a avenidas intensas (cuadro 2.4).

Relieve

La pendiente media (P_m) de la cuenca es de 13.7 %; en cuanto a la curva hipsométrica, parámetro que representa la distribución de los rangos de altura presentes en la cuenca, mediante una gráfica cartesiana en donde el eje de las ordenadas (y) corresponde a los 10 rangos altitudinales en los que fue dividida la cuenca; el eje de las abscisas (x) indica el porcentaje acumulado de la superficie ocupada de la cuenca por cada rango. Expresa además la evolución de la cuenca en función a los procesos erosivos a los que ha sido expuesta a través del tiempo (Strahler, 1957). En ese sentido, la cuenca presenta un proceso de vejez o senectud lo que indica que mantiene un grado de desarrollo avanzado (Gaspari et al., 2012), es decir, es una cuenca con bajo potencial erosivo considerada como una cuenca sedimentaria (figura 2.2), esto se muestra en la gráfica de frecuencias de alturas, en la que se observa que las elevaciones bajas de la cuenca entre 2071msnm a 2320 msnm ocupan casi el 50% de la cuenca (figura 2.3).

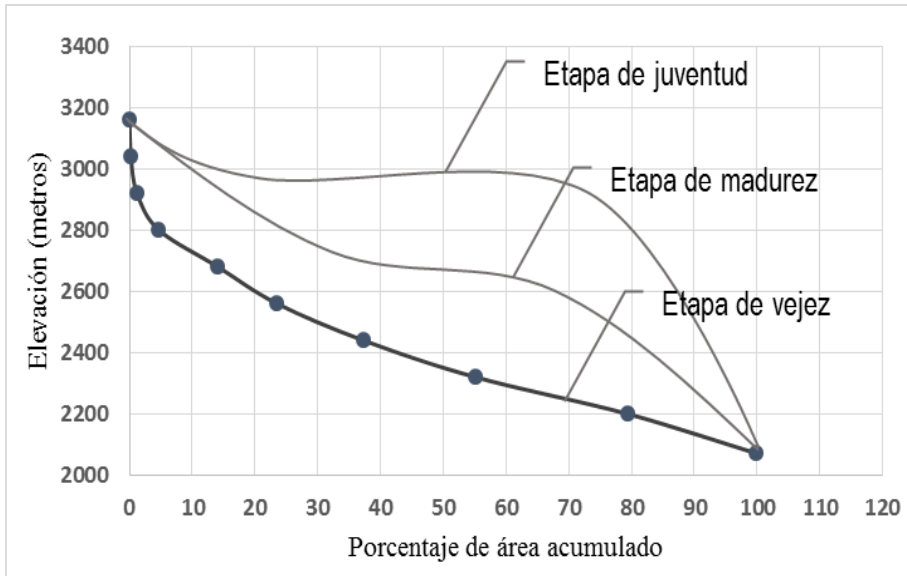


Figura 2.2. Curva hipsométrica de la cuenca del lago de Zirahuén

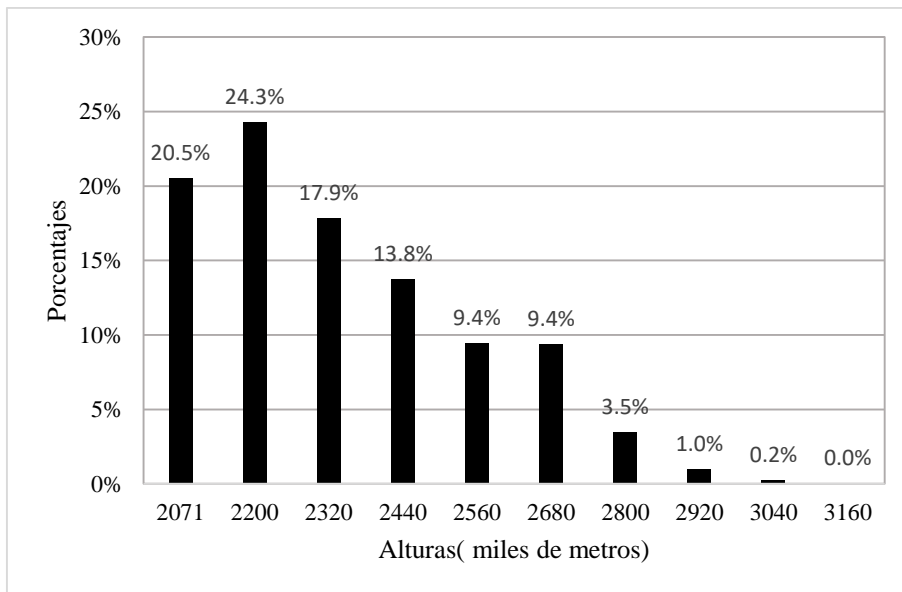


Figura 2.3. Frecuencias altitudinales

Drenaje

Los patrones de drenaje reflejan el grado de ramificación que presenta una cuenca (Horton, 1932). En la cuenca del lago de Zirahuén se presentan de dos tipos: *el primero* de tipo radial centrífugo, caracterizados por corrientes que parten de un punto central hacia afuera, procedentes del punto más alto y con pendientes fuertes que van de los 20° a $> 45^\circ$ como resultado de las formaciones montañosas que corresponde a los cerros Zirahuén, El Burro y La Anona; *el segundo* de tipo subparalelo, los cuales se caracterizan por ser controlados o influenciados por planicies inclinadas, valles inclinados y lomeríos con pendientes bajas en el rango de 1° a 20° localizados hacia la parte central de la cuenca que ocupa el valle aluvial del afluente principal (río El Silencio) el cual posee una longitud de cauce (L_c) de 27.9 km, bajo una estructura geológica de origen volcánico formada por basaltos los cuales prevalecen en prácticamente toda la cuenca y que favorece a una mayor resistencia al desgaste hídrico. El grado jerárquico de la red de drenaje de acuerdo a la propuesta de Strahler (1964) indica que el grado de ramificación de las corrientes orden (O_c) de la cuenca es de 5, lo que significa un buen sistema de drenaje; la densidad de drenaje (D_d) es de 1.5 km/km^2 , que de acuerdo a Horton (1932) indica que los valores entre 1.5 y 2.0 se presentan en zonas escarpadas e impermeables en regiones de alta precipitación, esto se ve reflejado espacialmente ya que las concentraciones mayores de las escorrentías se encuentran hacia las partes altas de las cuencas originadas por las formaciones montañosas de origen volcánico que delimitan el parte aguas, caso contrario se presenta en las zonas cuyas pendientes son menores; la frecuencia de drenaje (F_d) es de 1.7, este parámetro relaciona el total de los segmentos entre el área de la cuenca, el resultado señala un valor muy similar a la D_d lo que permite inferir que al incrementar este valor aumentará el valor de la D_d (Nongkynrih y Husain, 2011) (figura 2.4). Por otro lado, se obtuvo la pendiente media del cauce principal (P_m) con valor de 5.4 % lo que corresponde a 3.1° , este valor muestra que prevalece una topografía suave de acuerdo a la

clasificación propuesta por Nongkynrih and Husain (2011) lo que implica considerar volúmenes bajos de escurrimiento y velocidades bajas (figura 2.5).

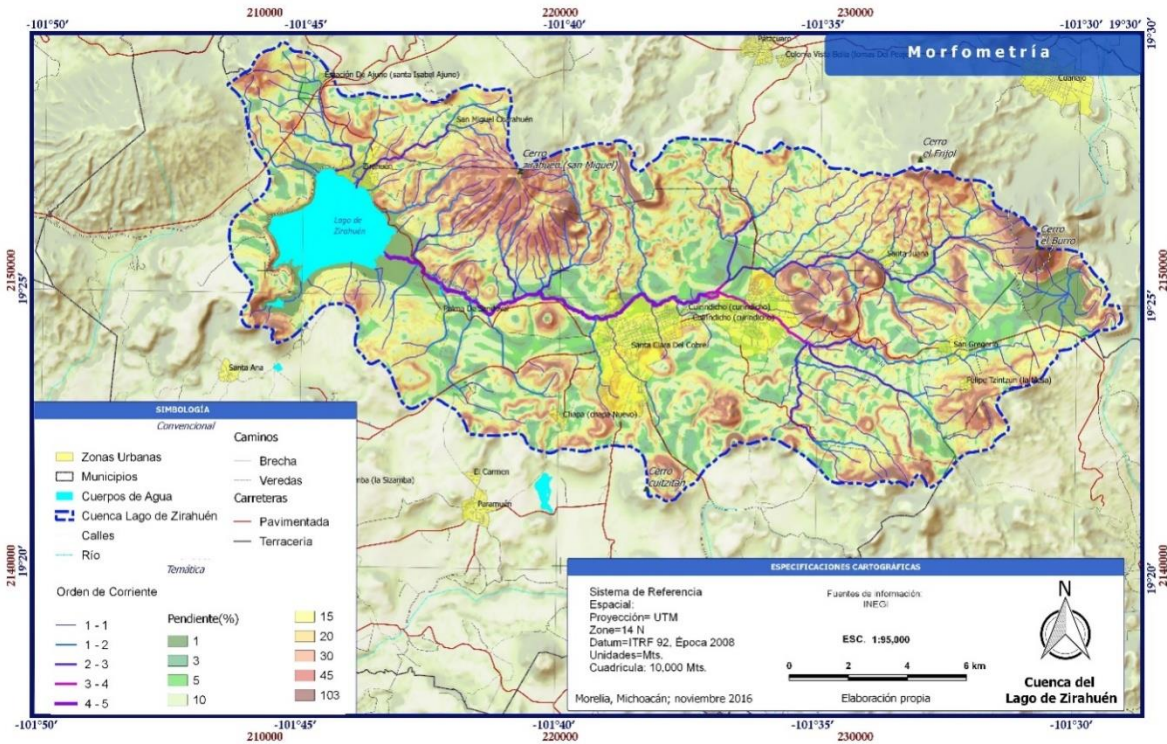


Figura 2.4. Cuenca del lago de Zirahuén

Cuadro 2.4. Parámetros morfométricos de la cuenca

Generales		
Área	A	273.4 km ²
Perímetro	P	90.7 km ²
Longitud de la cuenca	La	26.3 km
Ancho máximo	Am	12.8 km
Ancho promedio	Ap	10.4 km
De forma		
Coefficiente de compacidad	Kc	1.6
Índice de alargamiento	Ia	2.1
De relieve		
Pendiente media de la cuenca	Pm	13.7 %
De la red hidrográfica		
Numero de orden	Oc	5
Densidad de drenaje	Dd	1.5 km/km ²
Frecuencia de drenaje	Fd	1.7 km ²
Longitud del cauce principal	Lc	27.9 km
Pendiente media del cauce	Pmc	5.4 %

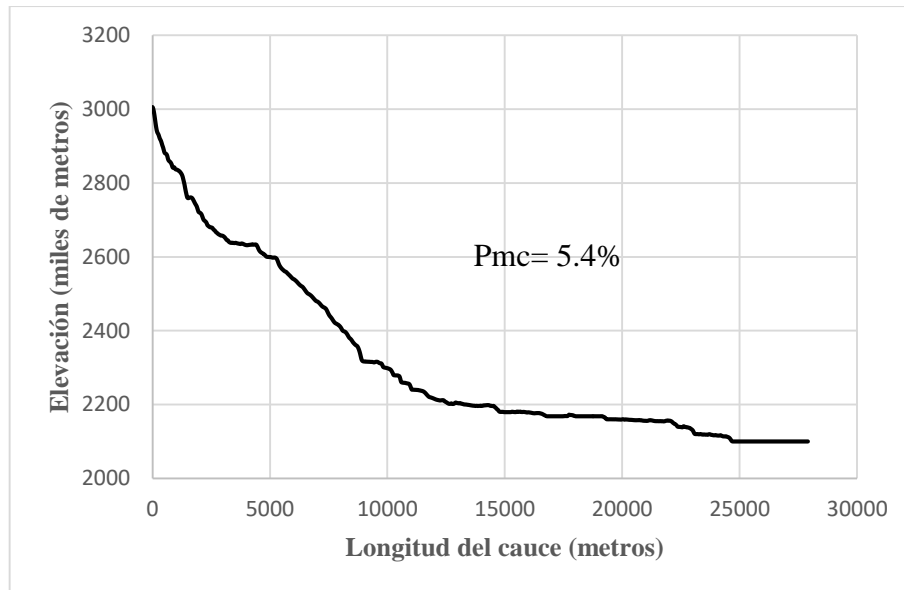


Figura 2.5. Perfil del cauce principal

b) Uso de suelo y vegetación

La distribución espacial de la cobertura vegetal sobre el área de la cuenca de acuerdo al INEGI (2015) (figura 2.6) indica que el 35.19 % está cubierto aún por vegetación primaria que incluye los tipos de vegetación bosque de pino-encino, bosque mesófilo de montaña, bosque de encino-pino, bosque de pino y bosque de encino. En lo respectivo a las sucesiones secundarias, éstas ocupan el 9.03 % y se presentan principalmente en bosques de encino-pino con fase arbórea, y en fase sucesiva arbustiva bosque mesófilo de montaña, bosque de pino-encino y bosques de encino-pino. Las actividades agrícolas representan aproximadamente la mitad del territorio de la cuenca con el 49.49% los cuales se desglosan de acuerdo a la temporalidad de la cosecha principalmente en agricultura de temporal anual y en mucha menor medida en agricultura anual permanente y permanente, está última clasificada en riego y temporal. Los asentamientos humanos y zonas urbanas ocupan el 2.42%; finalmente, los cuerpos de agua ocupan el 3.88 % de los cuales el 3.63% corresponde al vaso del lago de Zirahuén (cuadro 2.5).

Cuadro 2.5. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del lago de Zirahuén

Clave	Tipo de Vegetación	Superficie (ha)	%
BM	Bosque mesófilo de montaña	1346.80	4.93
BP	Bosque de pino	36.05	0.13
BPQ	Bosque de pino-encino	6821.72	24.95
BQ	Bosque de encino	298.56	1.09
BQP	Bosque de encino-pino	1116.94	4.09
BM/Vsa	Bosque mesófilo de montaña/Veg. secundaria arbustiva	58.27	0.21
BPQ/VSa	Bosque de pino-encino/Veg. secundaria arbustiva	2162.53	7.91
BQP/VSa	Bosque de encino-pino/Veg. secundaria arbustiva	228.10	0.83
BQP/VSA	Bosque de encino-pino/Veg. secundaria arbórea	18.48	0.07
H2O	Cuerpo de agua	1060.93	3.88
RP	Agricultura de riego permanente	213.05	0.78
TA	Agricultura de temporal anual	13056.04	47.76
TAP	Agricultura de temporal anual permanente	139.06	0.51
TP	Agricultura de temporal permanente	119.61	0.44
AH	Asentamientos humanos	188.09	0.69
ZU	Zona urbana	472.54	1.73
	Superficie total	27336.77	100.00

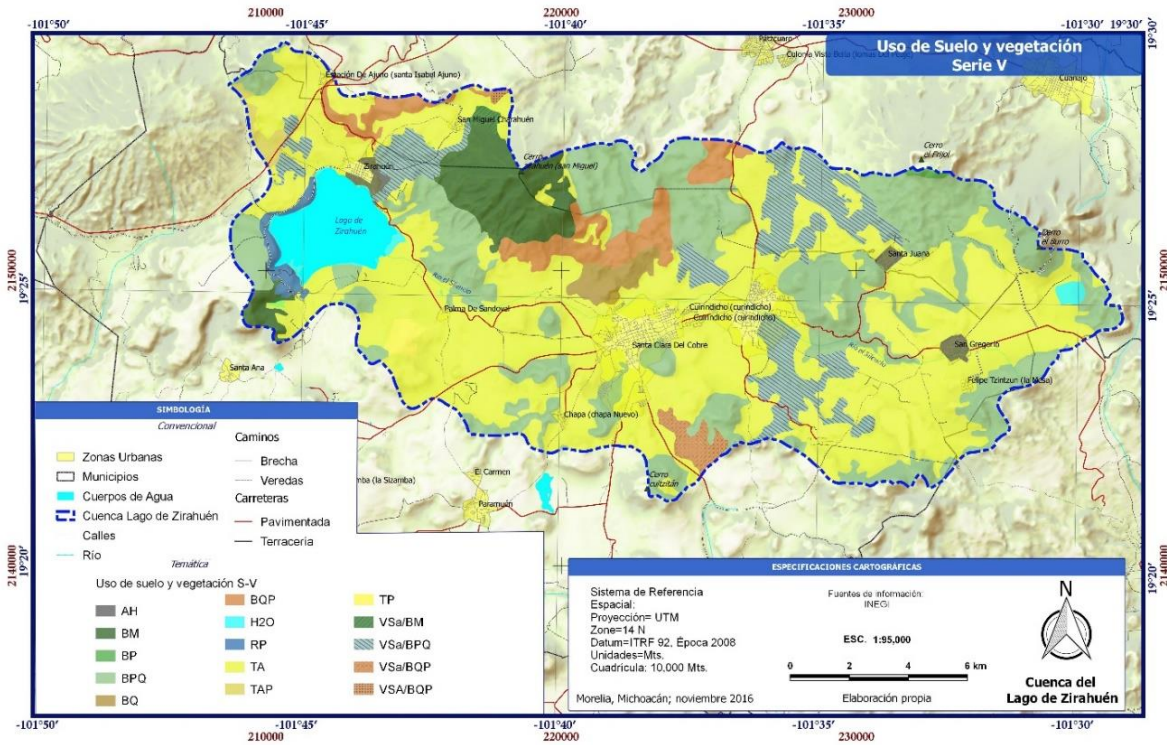


Figura 2.6. Uso de suelo y vegetación Serie V

c) Edafología

De acuerdo a la clasificación de suelos obtenidos del conjunto vectorial de datos edafológicos de la Serie II del INEGI, la cuenca está cubierta principalmente por suelo de tipo andosol que representa más del 50% de la superficie de la cuenca. En menor medida se encuentra leptosol en las porciones centro y oriente de la cuenca mayormente en partes altas. En porciones demasiado pequeñas, se encuentran luvisol (en dos elevaciones) y phaeozem, éste último en las partes bajas de la cuenca junto al cauce principal. El cuadro 2.6, detalla la información numérica sobre la cobertura por tipo de suelo, en tanto que la figura 2.7, muestra la distribución espacial y se puede inferir que las actividades agropecuarias en la cuenca guardan relación con los andosoles debido a que estos presentan alto potencial para la producción agrícola ya que se consideran fértiles en su totalidad. Son de origen volcánico, de ambientes ondulados a montañosos distribuidos de las

regiones árticas hasta las regiones tropicales y dan origen a diversos tipos de vegetación, presentan propiedades favorables para el cultivo, enraizamiento de las plantas y retención de humedad (IUSS Working Group WRB, 2014). En México se distribuye principalmente en las regiones de Mil Cumbres y la Neovolcánica Tarasca. En Michoacán se presenta en las regiones aguacateras, sin embargo, estos suelos son tratados con adecuados programas de fertilización ya que retienen el fósforo el cual no puede ser absorbido por las plantaciones (INEGI, 2004), lo que explica la distribución territorial de las actividades agropecuarias en la cuenca.

Cuadro 2.6. Tipos de suelo en la cuenca del lago de Zirahuén

Clave	Tipo de Suelo	Superficie (ha)	%
AN	Andosol	20,558.39	75.20
LP	leptosol	4,526.51	16.56
LV	Luvisol	238.52	0.87
PH	Phaeozem	291.80	1.07
H2O	Cuerpos de agua	1,060.92	3.88
ZU	Zonas urbanas	660.62	2.42
	Superficie total	27,336.77	100.00

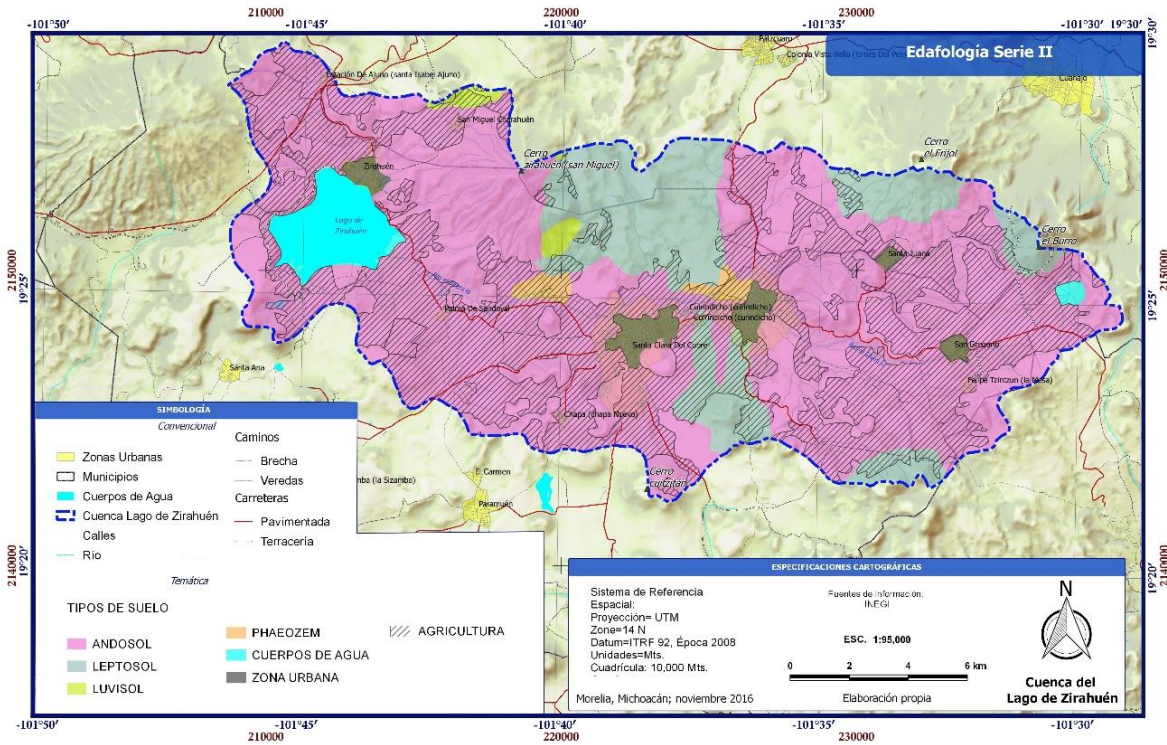


Figura 2.7. Tipos de suelo de la cuenca del lago de Zirahuén

d) Geología

La caracterización litológica indica que la cuenca está integrada por rocas ígneas intrusivas correspondientes a la era del Cenozoico, constituidas principalmente por basaltos que cubre la mayor parte de la superficie; en muy pequeñas cantidades relativas se encuentran brechas volcánicas básicas, el basalto-brecha volcánica, aluvial, dacita y toba básica (cuadro 2.7).

Por otra parte, desde el punto de vista estructural, en la cuenca existe la presencia de una falla de tipo normal, que indica la existencia de una ruptura de la corteza terrestre y con ella un desplazamiento entre los bloques. Está ubicada en la porción noroeste entre los cerros Zirahuén y El Borrego (figura 2.8).

Cuadro 2.7. Geología de la cuenca del lago de Zirahuén

Clave	Entidad	Clase	Tipo	Era	Sistema	Superficie (ha)	%
Q(al)	Suelo	N/A	Aluvial	Cenozoico	Cuaternario	258.00	0.94
Q(B-Bvb)	Unidad cronoestratigráfica	Ígnea extrusiva	Basalto-Brecha volcánica básica	Cenozoico	Cuaternario	556.82	2.04
Q(Bvb)	Unidad cronoestratigráfica	Ígnea extrusiva	Brecha volcánica básica	Cenozoico	Cuaternario	1216.35	4.45
Q(Tb)	Unidad cronoestratigráfica	Ígnea extrusiva	Toba básica	Cenozoico	Cuaternario	15.29	0.06
Tpl-Q(B)	Unidad cronoestratigráfica	Ígnea extrusiva	Basalto	Cenozoico	N/A	25100.97	91.82
Ts(Da)	Unidad cronoestratigráfica	Ígnea extrusiva	Dacita	Cenozoico	Neógeno	189.34	0.69

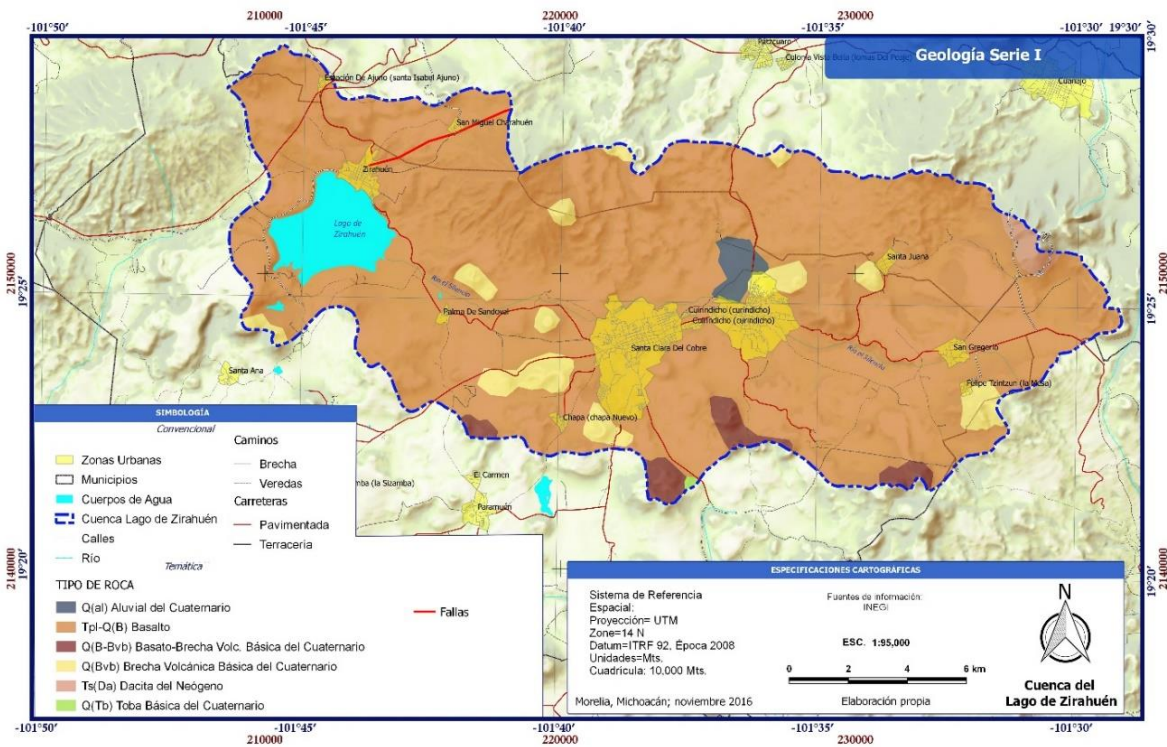


Figura 2.8. Geología de la cuenca del lago de Zirahuén

e) Clima

De acuerdo con la cartografía oficial, la cuenca tiene un clima templado subhúmedo C (w2)(w) siendo del subtipo de los más húmedos de los subhúmedos en donde el cociente de la precipitación total en mm sobre la temperatura media anual es mayor de 55.0 mm.

El régimen de precipitación oscila entre los 1,000 a 1,200 mm totales anuales; la temperatura máxima registra valores de los 18°C a los 21°C, mientras que las isoyetas de temperatura mínima presentan valores de 6°C a los 9°C (figura 2.9).

En relación a la información climática, los datos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (SNM) de las normales climatológicas para la estación 16146 Zirahuén en el período 1951-2010 revelan que la cuenca presenta un régimen de precipitación anual de 1,162.20 mm, con una temperatura media anual de 16.1 °C, temperatura máxima de 25.2 °C y una mínima de 7 °C; así mismo, mediante el análisis del climograma expuesto en figura 2.10, se establece que cuenta con un periodo de estiaje (sequía) entre los meses de febrero a abril y una época húmeda que supone la recarga y el mantenimiento del nivel de aguas del lago de Zirahuén comprendido entre los meses de mayo a noviembre. Esto guarda una relación intrínseca con los sistemas productivos en la zona, puesto que las condiciones climáticas óptimas favorecen a los principales cultivos: aguacate, maíz, zarzamora y avena forrajera. Estos requieren una precipitación de entre 250 mm de la avena forrajera hasta los 1000 mm-2000 mm que requieren la zarzamora y el aguacate; con una temperatura de entre los 5°C como mínimo requerido por la avena hasta los 17°C-24°C del aguacate y de 17°-37°C necesarios para la zarzamora (Pérez y Vázquez, 2004; SAGARPA, 2011; Jurado y Lara, 2014). En relación al maíz, es una planta que es originaria de tierras calientes y húmedas, sin embargo, se desarrolla en condiciones óptimas en temperaturas >20°C con precipitaciones que van desde los 600 mm a 1000 mm por año (Cruz Delgado, GómezValdéz, Ortiz Pulido, y Suárez Hernández, 2007). De igual manera esta producción se desarrolla en suelos

fértiles que permiten la retención de humedad, tal es el caso de los andosoles presentes en la cuenca y explica la ocupación territorial de las áreas de cultivo favorecido por la interacción de los elementos climáticos, edáficos, litológicos, topográficos y latitudinales del área de estudio.

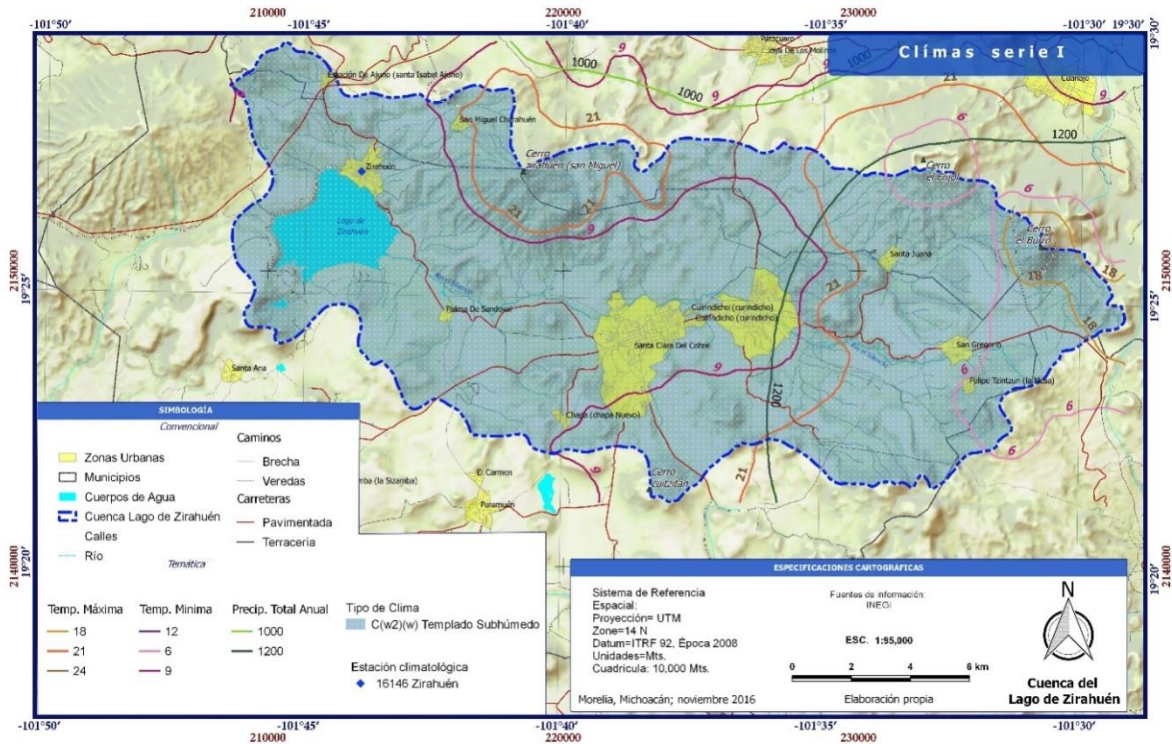


Figura 2.9. Características climáticas

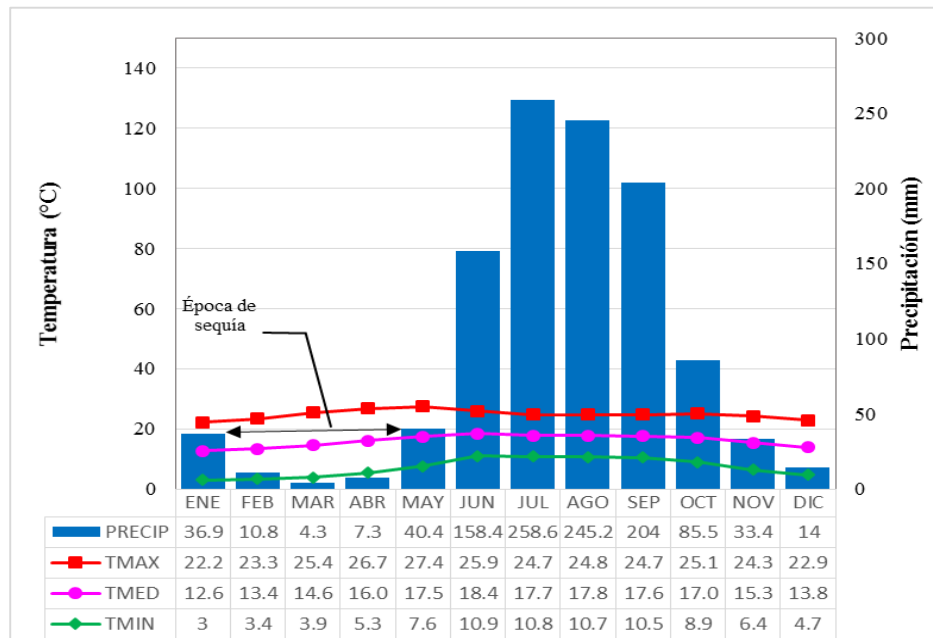


Figura 2.10. Climograma normales climatológicas 1951-2010. Estación 16046 Zirahuén

f) Aspectos socioeconómicos y demográficos

Actividades productivas

En los municipios de Salvador Escalante y Pátzcuaro las principales actividades productivas en el sector agropecuario están representados por la agricultura (maíz, aguacate, avena forrajera, frijol, frutales), ganadería (explotación de bovinos para producción de carne, leche y otros) y forestal (tala de árboles, sistemas agrosilvopastoriles con aprovechamiento forestal) (INEGI, 2011). El Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), órgano desconcentrado de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), reporta en las estadísticas de la producción agrícola para el año 2013 la superficie de cultivos para los municipios de Pátzcuaro y Salvador Escalante (cuadro 2.8). Lo anterior pone de manifiesto que el aguacate y el maíz para el municipio de Salvador Escalante en conjunto ocupan 16,780 ha, que

representan en términos monetarios \$2, 175, 352,233.00, sin embargo, para los sistemas naturales constituye un riesgo debido a la expansión de huertas aguacateras en la zona por las condiciones idóneas presentes.

Cuadro 2.8. Estadísticas de producción agrícola 2013

Municipio	Cultivo	Superficie (ha)	Volumen (ton)	Valor (pesos)
Pátzcuaro	Maíz grano	1980	5346	\$15,964,011.00
	Avena forrajera en verde	1294	11821	\$10,429,820.00
	Ebo (janamargo o veza)	199	2175	\$1,927,350.00
	Aguacate	198	1902	\$27,320,315.00
	Durazno	174	1454	\$10,628,107.00
	Haba grano	75	126	\$512,410.00
	Alfalfa verde	50	1925	\$1,771,019.00
	Frijol	48	62	\$502,560.00
	Trigo grano	25	39	\$141,525.00
	Calabacita	6	43	\$211,440.00
	Tomate verde	5	38	\$177,450.00
Salvador Escalante	Aguacate	12900	146836	\$2,142,755,018.00
	Maíz grano	3880	10864	\$32,597,215.00
	Zarzamora	1174	12852	\$189,796,502.00
	Avena forrajera en verde	890	8825	\$7,396,652.00
	Frijol	80	100	\$802,650.00
	Durazno	62	496	\$3,399,720.00
	Arándano	40	320	\$28,025,600.00
	Espárrago	29	116	\$3,193,480.00
	Guayaba	12	96	\$561,340.00
	Chirimoya	8	66	\$336,000.00
	Frambuesa	8	64	\$3,606,400.00
	Calabacita	5	40	\$204,000.00
	Tomate rojo (jitomate)	4	78	\$530,400.00

De particular importancia para la cuenca es el turismo, representado principalmente por la artesanía de cobre martillado de Santa Clara del Cobre y la pesca en el lago de Zirahuén como actividades relevantes (Mercado y Palmerín, 2012).

Población

El territorio ocupado por la cuenca pertenece principalmente al municipio de Salvador Escalante (73.66%); dentro de éste se encuentran asentadas 40 localidades con un total de 33,803 habitantes que representan el 74.8% del total de la población del municipio y el 0.8% respecto al total estatal. Las principales localidades son: Santa Clara del Cobre, Opopeo, Zirahuén, San Gregorio, Chapa (Chapa Nuevo), Felipe Tzintzun (La Mesa) y Palma de Sandoval. Por otro lado, la cuenca ocupa parte del municipio de Pátzcuaro (24.78%) abarcando 7 localidades que representan el 3.8% del total de población del municipio y con muy baja proporción respecto del total estatal; las localidades más importantes son: Santa Juana, San Miguel Carahuén, Estación de Ajuno (Santa Isabel Ajuno) y Las Palmitas (figura 2.11).

Respecto a los índices de marginación del 2010 para el municipio de Salvador Escalante se encontró un grado de marginación medio, mientras que para el municipio de Pátzcuaro el grado de marginación es bajo (CONAPO, 2012a). Sin embargo, cuando se analizan los indicadores de marginación para las localidades dentro de la cuenca, la situación es diferente puesto que, todas las localidades de ambos municipios presentan grado de marginación alto. En contraste, el índice de rezago social (CONEVAL, 2011) indica valores medios para la mayoría de las localidades, únicamente la localidad de Santa Clara del Cobre presenta un grado de rezago social bajo (cuadro 2.9).

Cuadro 2.9. Características demográficas de las localidades principales de la cuenca del lago de Zirahuén

Localidad	Pob. total	Pob. masculina	Pob. femenina	Índice de Margin.	Grado de Margin.	Índice de rezago social	Grado de rezago social
Salvador Escalante							
Santa Clara del Cobre	14,359	6,931	7,428	-0.72	Alto	-0.76	Bajo
Opopeo	10,055	4,804	5,251	-0.32	Alto	-0.16	Medio
Zirahuén	2,942	1,386	1,556	-0.35	Alto	-0.10	Medio
San Gregorio	1,180	594	586	-0.40	Alto	-0.07	Medio
Chapa (Chapa Nuevo)	1,066	526	540	-0.53	Alto	-0.22	Medio
Felipe Tzintzun (La Mesa)	381	185	196	-0.16	Alto	0.30	Medio
Palma de Sandoval	289	137	152	-0.59	Alto	-0.05	Medio
Pátzcuaro							
Santa Juana	1,956	971	985	0.31	Alto	0.64	Medio
San Miguel Charahuén	631	317	314	0.30	Alto	0.80	Medio
Estación de Ajuno (Santa Isabel Ajuno)	393	189	204	-0.62	Alto	-0.28	Medio
Las Palmitas	261	133	128	0.16	Alto	0.54	Medio

Por otra parte, la dinámica de la población en referencia a las proyecciones al 2030, con base en la tendencia del período 1990-2010 realizada por el CONAPO (2012b), se observa que para las localidades del municipio de Salvador Escalante, los escenarios son contrastantes. Así, para la localidad de Santa Clara del Cobre se estima que su población disminuirá en un 7.8%,

mientras que para Zirahuén y Opopeo se pronostica un crecimiento del 19.3% y 8.6%, respectivamente. En la localidad de Santa Juana que pertenece al municipio de Pátzcuaro, su escenario es preocupante ya que, se pronóstica un crecimiento de la su población en 100.6% (cuadro 2.10), esta condición tiende a convertirse en un problema futuro puesto que las actividades agrícolas y ganaderas (bovinos, equinos) demandarán mas tierras para su expansión, lo que conlleva al cambio de uso de suelo y con ello impactos negativos sobre la biodiversidad, aumento de la erosión, disminución en la captura de carbono, regulación del clima regional y disminución de la recarga hídrica.

Cuadro 2.10. Proyección de la población 2010-2030

Municipio	Localidad	Proyección			
		2010	2020	2025	2030
Salvador Escalante	Santa Clara del Cobre	14,603	14,094	13,464	12,748
Salvador Escalante	Opopeo	10,226	11,007	11,104	11,103
Salvador Escalante	Zirahuén	2,992	3,430	3,571	3,685
Pátzcuaro	Santa Juana	1,988	3,196	3,988	4,930

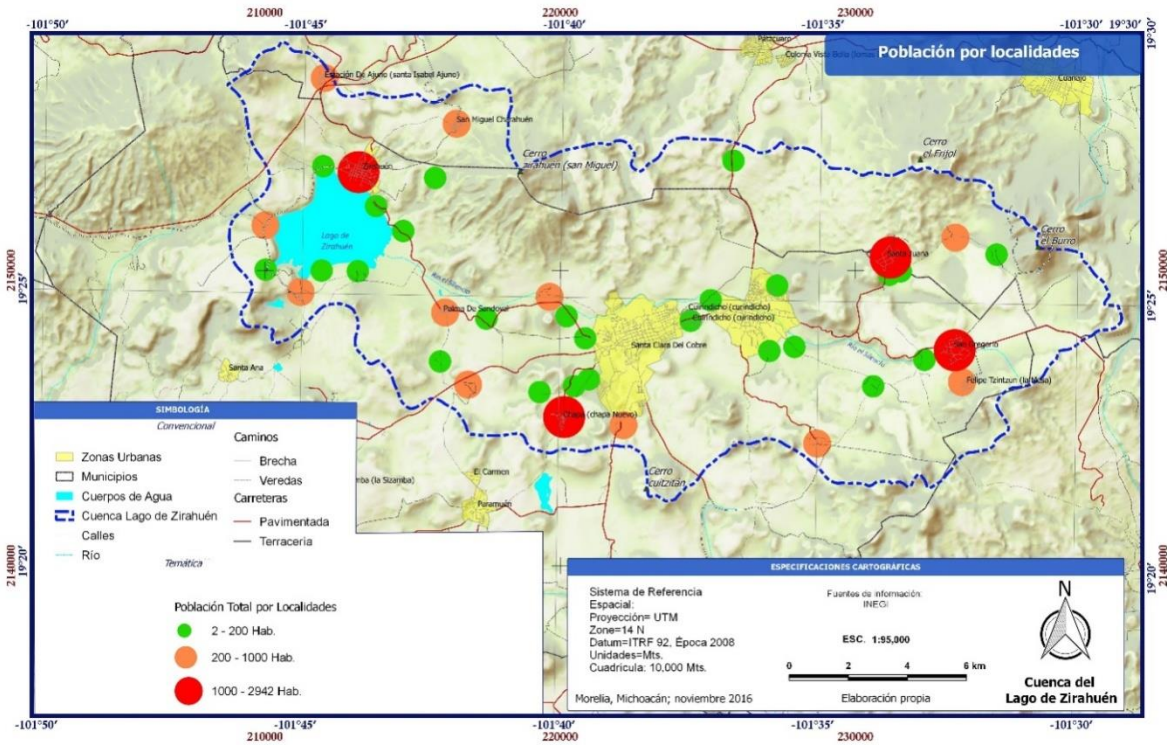


Figura 2.11. Distribución de la población total

2.4 Conclusiones

La caracterización obtenida para la cuenca del lago de Zirahuén mediante la aplicación de los SIG, ha permitido conocer e integrar todos los aspectos que influyen en la apropiación del territorio, desde sus características morfométricas hasta las características demográficas presentes lo cual permite concluir en lo siguiente:

Desde el punto de vista hidrológico, la morfometría revela que la cuenca por su forma alargada, por la organización y jerarquía que presenta la red de drenaje, por su distribución altitudinal y pendientes, influenciadas por la cobertura vegetal y su litología sólida y fuerte, ponen de manifiesto que su respuesta hidrológica ante eventos de precipitación extraordinaria, evita posibles inundaciones y crecidas en las partes bajas de la misma. Además, el análisis hipsométrico

manifiesta que se encuentra en una fase de vejez, expuesta teóricamente a procesos de erosión bajos, considerada como una cuenca sedimentada.

En lo que respecta a los elementos naturales que definen el paisaje, su génesis responde a procesos volcánicos que dieron origen a una estructura litológica de rocas ígneas intrusivas de tipo Basalto, que en constante interacción con el clima predominantemente templado subhúmedo con un régimen de precipitación de 1000 mm a 1,200 mm anuales y una temperatura media anual de 16.1 °C, han favorecido al desarrollo de suelos como los andosoles con alto potencial agrícola y retención de humedad los cuales albergan y dan sustento a formaciones de coníferas y latifoliadas de tipo pino, pino-encino, encino-pino, encinos y mesófilo de montaña. Respecto al análisis de los datos recogidos de la estación climatológica de Zirahuén a través del climograma, hace suponer que el mantenimiento de los niveles de agua del lago se efectúa durante 7 meses del año considerados como el período húmedo (mayo-noviembre).

Sin embargo, las condiciones anteriormente descritas, por su propia naturaleza, han sido fundamentales para el desarrollo de las actividades agropecuarias dentro de la cuenca, dado que, se da el ambiente ideal para el establecimiento de huertas para la producción principalmente de aguacate, maíz, avena forrajera y zarzamora, y la producción de ganado bovino y equino para la comercialización de carne y leche. Esta situación, aun cuando representa oportunidades de trabajo para la población, además de lo que significa en términos monetarios no solo a nivel local si no nacional, puede ocasionar severos daños de carácter irreversible a los elementos que constituyen el paisaje de la cuenca y, con ello, su desempeño hidrológico. Se prevé de acuerdo a las proyecciones de población, el constante aumento de los habitantes, por lo que la necesidad de contar con mayor territorio para la labranza, establecimiento de huertos, campos para ganadería, implica principalmente el avance de la pérdida de cobertura vegetal. En consecuencia, la necesidad

vital para destinar mayor recurso hídrico para los diferentes usos consuntivos en la cuenca, pueden someter al colapso de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas.

Finalmente, mediante la integración de los elementos morfométricos, naturales y socioeconómicos en cuencas, a través de los SIG revelan aporte significativo para el entendimiento de la dinámica de los mismos, orientados en la investigación de las ciencias hidrológicas con el objeto de encaminar el manejo integrado del territorio.

2.5 Bibliografía

Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. (U. A. de S. L. Potosí, Ed.) (3a. Reimpr). San Luis Potosí, S.L.P., México.

CONAGUA. (2009). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Michoacán de Ocampo*. (S. del M. A. y R. Naturales, Ed.) (Primera ed). México, D.F. Recuperado a partir de www.conagua.gob.mx

CONAGUA. (2014). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. México, D.F.: SEMARNAT. Recuperado a partir de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PROGRAMA_Nacional_Hidrico_2014_2018_espa%C3%B1ol.pdf

CONAGUA. (2015). *Estadísticas del agua en México, edición 2015*. México, D.F. Recuperado a partir de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>

CONAPO. (2012a). *Índice de marginación por localidad* (Primera ed). Mexico: Consejo Nacional de Población. Recuperado a partir de http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010

CONAPO. (2012b). *Proyecciones de la población de México 2010-2050* (Primera ed). Mexico:

Consejo Nacional de Población.

CONEVAL. (2011). *Comunicado de prensa no. 012*. México, D.F. Recuperado a partir de www.coneval.gob.mx

Cruz Delgado, M. S., Gómez Valdéz, M. M., Ortiz Pulido, M. E., y Suárez Hernández, C. Y. (2007). *Situación actual y perspectivas del maíz en México 1996-2010*. (D. M. S. Cruz, V. M. E. Gómez, P. M. E. Ortiz, y H. C. Y. Suárez, Eds.) (SIAP). México, D.F.: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Recuperado a partir de [http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Integracion/EstadisticaDerivada/Comercio Exterior/Estudios/Perspectivas/maiz96-12.pdf](http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Integracion/EstadisticaDerivada/ComercioExterior/Estudios/Perspectivas/maiz96-12.pdf)

Esper, A. M. Y., y Perucca, L. P. (2014). Caracterización morfométrica de la cuenca del Río Seco a propósito de las fuertes precipitaciones de enero de 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 235–245. Recuperado a partir de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5310404&info=resumen&idioma=ENG>

Esquivel, A. G., Bueno, H. P., Sánchez, C. I., Velásquez, V. M. A., y Muñoz, V. J. A. (2015). Delimitación y análisis morfométrico de tres cuencas del norte-centro de México. *AGROFAZ*, 15(2), 151–161.

Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, I., y Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143–158.

Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 350–361.

INEGI. (2000). *Diccionario de datos climáticos escala 1:250,000 y 1:1000,000* (Vol. 0). Aguascalientes, Ags. Recuperado a partir de

http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223885/702825223885_1.pdf

INEGI. (2001). Conjunto de datos vectoriales fisiográficos escala 1:1,000,000 serie I. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

INEGI. (2004). *Guía para la interpretación de cartografía: Edafología*. Aguascalientes, Ags. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

INEGI. (2005a). *Guía para la interpretación de cartografía: Climatológica*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

INEGI. (2005b). *Guía para la interpretación de cartografía geológica*. Aguascalientes, Ags.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

INEGI. (2011). Sistema de consulta de información geoestadística agropecuaria. Recuperado el 28 de noviembre de 2016, a partir de <http://gaia.inegi.org.mx/sciga/viewer.html>

INEGI. (2013). Censos y conteos. Recuperado el 20 de julio de 2016, a partir de http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/iter2010.aspx?c=27329ys=est

INEGI. (2014). Conjunto de datos vectoriales topográficos Escala 1:50,000 serie III. E14A31 (Taretan). Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado a partir de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825268695>

INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía : uso del suelo y vegetación : escala 1:250, 000 : serie V*. Aguascalientes, Ags.: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usuarios/doc/guia_interusuarios.pdf

INEGI. (2016). SIATL. Recuperado el 20 de junio de 2008, a partir de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#

- IUSS Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106*. <https://doi.org/10.1017/S0014479706394902>
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19, 41–68. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.003>
- Jurado, G. P., y Lara, M. C. R. (2014). *Paquete tecnológico para la producción de avena forrajera en Chihuahua (Primera)*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias INIFAP. México, D.F. Recuperado a partir de <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/handle/123456789/4307>
- Mercado, V. H., y Palmerín, C. M. (2012). *El estado de Michoacán y sus regiones turísticas*. (Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso, Ed.). Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso. Recuperado a partir de <http://www.eumed.net/libros-gratis/2012b/1230/michoacan-regiones.html>
- Nongkynrih, J. M., y Husain, Z. (2011). Morphometric analysis of the Manas river basin using earth observation data and Geographical Information System. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2(2), 647–654.
- Pérez, B. M. H., y Vázquez, V. V. (2004). *Zarzamora (Rubus spp.) su cultivo y producción en el trópico mexicano*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias INIFAP. Nayarit. Recuperado a partir de http://www.cofupro.org.mx/cofupro/images/contenidoweb/indice/publicaciones-nayarit/PUBLICACIONES_DEL_INIFAP/PUBLICACIONES_EN_PDF/FOLLETOS_TECNICOS/folleto_tecnico_2_ZARZAMORA_SU_CULTIVO_Y_PRODUCION_EN_EL_TR.pdf

- Rai, P. K., Mohan, K., Mishra, S., Ahmad, A., y Mishra, V. N. (2014). A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. *Applied Water Science*, (November), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0238-y>
- SAGARPA. (2011). *Monografía de cultivos: Aguacate*. (SAGARPA, Ed.). Recuperado a partir de <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/pablo/Documentos/Monografias/Monograf%C3%ADa%20del%20aguacate.pdf>
- Saldívar, A. (2007). *Las aguas de la ira: Economía y cultura del agua en México ¿sustentabilidad o gratuidad?* (Vol. 64). México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Shiklomanov, I. A. (1998). World Water Resources. A new appraisal and assessment for the 21st century. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, 40.
- Shiklomanov, I. A. (2000). International Water Resources Association Appraisal and Assessment of World Water Resources. *Online Journal Water International*, 25(11), 250–8060. <https://doi.org/10.1080/02508060008686794>
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Toledo, A. (2006). *Agua, hombre y paisaje*. (INE-SEMARNAT, Ed.) (Primera ed). México, D.F. Recuperado a partir de <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/488.pdf>
- United Nations. (2012). *Managing water under uncertainty and risk. The United Nations World Water Development report 4* (Vol. 1). Luxembourg.
- Wanl, S. P., y Garg, K. K. (2009). Watershed Management Concept and Principles. *Icrisat*, (October 2014), 11.

CAPÍTULO 3. VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DEL BALANCE

HÍDRICO

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló aplicando el modelo Soil-Water-Balance (SWB) con datos de la cuenca del lago de Zirahuén, con el objetivo principal de evaluar la situación de la disponibilidad hídrica en la zona de estudio. La modelación se llevó a cabo utilizando información correspondiente a los años 1972, 1980, 1992, 2000, 2003, 2009 y 2015, con lo que se realizó la estimación de la recarga; consecuentemente se analizó la disponibilidad hídrica respecto a los volúmenes concesionados registrados en el REPDA. Los años de 1992 y 2000 presentaron los valores más altos de recarga, mientras que 2009 y 2015 presentaron los volúmenes más bajos. La disponibilidad hídrica superficial y subterránea presentó una tendencia decreciente ocasionada por el volumen de demandas comprometidas en las concesiones de agua, que presentan un comportamiento inversamente proporcional a la disponibilidad. Después de analizar la información, se calculó la disponibilidad relativa (D_r) que resultó en 0.9215, muy cerca de las cifras oficiales utilizando el procedimiento oficial en México, con excepción al cálculo del escurrimiento superficial; situación similar ocurrió al calcular el índice de disponibilidad de aguas subterráneas, que resultó en 0.82 muy cercano a las cifras oficiales. Al calcular el D_r , con los resultados del modelo de simulación, se encontró que la cuenca cuenta con suficiente disponibilidad de agua superficial aun considerando el caudal ecológico, puesto que resulta en 133.346 Mm³/año. El modelo se utilizó de manera confiable para simular la disponibilidad de recursos hídricos a nivel de cuencas, poniendo énfasis en la recomendación de calibrar los resultados con respecto de aforos en los escurrimientos

3.1 Introducción

El recurso hídrico y su disponibilidad, constituyen la base del desarrollo de las sociedades. Sin embargo, su distribución dista mucho de estar relacionado al crecimiento y expansión de la población y, en todo caso, al desarrollo económico (Shiklomanov, 1998). En México se presenta un caso similar ya que, la distribución del agua renovable, se presenta de manera inversamente proporcional con el desarrollo socioeconómico. En la regiones del sureste, que en conjunto aportan la quinta parte del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, poseen dos terceras partes del agua renovable; en contraste, las regiones del centro, norte y noroeste aportan cuatro quintas partes del PIB nacional y cuentan únicamente con una tercera parte del agua renovable (CONAGUA, 2015). La disponibilidad específica de agua se define como la cantidad de agua renovable total per cápita y se determina dividiendo los recursos hídricos brutos entre el número habitantes (Shiklomanov, 1998).

En México, en términos regulatorios, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través de la norma oficial mexicana NOM-011-CONAGUA-2005 define en su apartado 3.12 la disponibilidad media anual de agua del subsuelo como el volumen que se puede extraer de un acuífero para diversos usos, adicional a las extracciones concesionadas y a la descarga comprometida, sin comprometer el equilibrio de los ecosistemas. Además, en su apartado 3.15 considera el escurrimiento natural como el volumen medio anual de agua superficial que es captada por la red de drenaje natural de la cuenca.

El balance hídrico (BH), es la evaluación de los diferentes factores que intervienen en el ciclo del agua y existen diferentes maneras de abordarlo. Sokolov y Chapman (1981) describen diversos métodos en función del período de análisis; así, para los componentes principales del BH (precipitación, caudal, evaporación y almacenamiento), BH para zonas (cuencas, países, regiones y continentes); BH de grandes masas de agua (lagos, embalses, aguas subterráneas, glaciares, et.);

BH para zonas o cuencas con características especiales (superficies de bosque importantes, zonas de regadío) los cuales suelen afectar de manera importante al BH.

Uno de los métodos más aplicados en diferentes lugares, es el de Thornthwaite y Mather (1957) el cual se caracteriza por considerar la precipitación como entrada y como salidas a la evapotranspiración y la escorrentía. La disponibilidad hídrica es obtenida a partir de la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración.

Con respecto a la recarga hídrica, al igual que para el BH, se ha estimado por diferentes vías. Touhami et al. (2014) hacen una revisión extensa cuando realizaron la comparación de cuatro modelos de BH del suelo para evaluar el desempeño de cada uno en la estimación de la recarga de un acuífero semiárido. Estos autores mencionan a Hydrobal model (HB), concebido para explorar el efecto de la vegetación en los procesos de infiltración; Visual Balan model (VB) desarrollado para calcular BH en el suelo, la zona no saturadas y niveles del acuífero; Thornthwaite; y, por último, Lumped ground Water model, es un modelo más simple que representa el flujo de agua subterránea a través de estratos kársticos; sin embargo, el hecho de proveer simulaciones rápidas tiene como consecuencia la falta de resultados significativos en el aspecto espacial y la estimación de las tasas de flujo de aguas subterráneas.

La estimación de la disponibilidad media anual de aguas superficiales y subterráneas en México se estima con fundamento en lo establecido en la NOM-011-CONAGUA-2015. En el apartado 4, indica que el volumen de aguas superficiales se determinará mediante la diferencia del volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo menos el volumen actual comprometido aguas abajo. Respecto a la disponibilidad media anual del agua del subsuelo en un acuífero, la estimación se obtiene de la recarga total anual menos la descarga natural comprometida y la extracción de aguas subterráneas. Para el caso de volúmenes anuales de extracción estarán referidos a los asignados y concesionados por la CONAGUA mediante el REPDA (DOF, 2015).

En la Ley Federal de Derechos en su última reforma publicada el 7 de diciembre de 2016, en capítulo VIII-Agua en su artículo 223 indica la obligación de las personas físicas y morales para el pago de derechos por la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales de acuerdo a la zona de disponibilidad que pertenezca. En ese sentido, establece los procedimientos generales para la estimación de las zonas de disponibilidad tanto para aguas superficiales como para aguas subterráneas. Para el caso de aguas superficiales, se determina mediante la disponibilidad relativa (D_r), en tanto que para aguas subterráneas se determina mediante el cálculo del índice de disponibilidad de aguas subterráneas (I_{das}) (DOF, 2016a).

En el presente trabajo se efectúa un análisis simultáneo superficial y subterráneo aplicando un modelo computacional mediante el cual se calcula el balance hídrico superficial y se hace la estimación de la capacidad de recarga y los volúmenes de escurrimiento. Los valores obtenidos, son comparados con los volúmenes de agua concesionados de acuerdo con la base del REPDA y se analizan para estimar la disponibilidad hídrica en la cuenca del lago de Zirahuén.

3.2 Materiales y Métodos

La metodología utilizada se describe a continuación. En vista de la ausencia de datos específicos para la cuenca y a la dificultad de realizar el balance hídrico de manera simultánea, se decidió utilizar el modelo Soil-Water-Balance (SWB) (Westenbroek, Kelson, Dripps, Hunt, y Bradbury, 2010) a través de un análisis multitemporal que permita estimar el balance hídrico geoespacial en cada caso. El modelo SWB, calcula los componentes del balance hídrico a nivel diario a través de una versión modificada de la aproximación de Thornthwaite-Matter para el cálculo del balance de agua en el suelo (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite y Mather, 1957). Para su adecuado funcionamiento, el modelo requiere información tabular y matrices de datos en formato raster sobre: precipitación y temperatura, clasificación de uso del suelo, grupo hidrológico

de suelo, dirección de flujo y, capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. El modelo está diseñado para aprovechar las ventajas de los sistemas de información geográfica (Westenbroek et al., 2010) y calcula el balance hídrico a nivel pixelar para después hacer la integración de resultados a nivel de la cuenca en diferentes resoluciones temporales.

a) Ubicación de área de estudio

El estudio se realizó tomando en consideración información geoespacial que abarca la cuenca del lago de Zirahuén, que se ubica entre los paralelos 19°21'09" y 19°29'50" de Latitud Norte y, los meridianos 101°29'11" y 101°46'21" de Longitud Oeste, en el estado de Michoacán de Ocampo (figura 3.1); pertenece a la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico y la subprovincia Neovolcánica Tarasca (INEGI, 2001). La cuenca, está ubicada en la cuenca R. Tepalcatepec-Infiernillo dentro de la Región Hidrológica 18 'Balsas'; la superficie oficial de la cuenca es de 273.07 km² y el perímetro de 90.34 km, se trata de una cuenca de tipo cerrada (endorreica). El afluente principal es el río El Silencio (CONAGUA, 2009); colinda al suroeste con la subcuenca río La Parota, al sureste con la subcuenca del río Tacámbaro, al noreste con la subcuenca del lago de Cuitzeo y al norte con la subcuenca del lago de Pátzcuaro. Abarca una extensión territorial que pertenece a los municipios de Salvador Escalante (73.66%), Pátzcuaro (24.79%) y una pequeña porción al municipio de Tacámbaro (1.55%) (INEGI, 2016).

El parteaguas está conformado por un sistema de montañas y lomeríos que alcanzan alturas que van de los 2311 msnm a los 3283 msnm (INEGI, 2014); respecto a las condiciones climáticas, prevalece en su mayoría el clima templado subhúmedo C (w2) (w) perteneciendo a los más húmedos de los subhúmedos. El régimen de precipitación que se presenta estriba entre los 1000 y 1200 mm anuales con temperaturas máximas registradas de 18°C a 21°C y temperaturas mínimas que oscilan entre los 6°C y 9°C (INEGI, 2005a); en cuanto a cobertura vegetal, los más

representativos son el bosques de pino-encino ocupando el 24.95 % , el bosque mesófilo de montaña con 4.93% y el bosque de encino-pino con el 4.09% de ocupación, además el bosque de pino-encino en su estadio secundario representa el 7.91%; respecto a los usos del suelo, predominantemente en la cuenca se realizan actividades agrícolas de temporal anual, ocupando aproximadamente la mitad de la superficie de la cuenca (47.76 %)(INEGI, 2015); en el contexto geológico presenta una litología basada en rocas ígneas intrusivas del Cenozoico, constituida principalmente por basaltos en un 91.82%, el resto se distribuye entre brechas volcánicas básicas, basalto-brecha volcánica básica, aluviones, dacita y toba básica (INEGI, 2005b); demográficamente el territorio se encuentra ocupado por 47 localidades con 37,137 habitantes , 40 pertenecen al municipio de Salvador Escalante y las 7 restantes al municipio de Pátzcuaro; las localidades representativas son Santa Clara del Cobre, Opopeo, Zirahuén en el municipio de Salvador Escalante, y Santa Juana y San Miguel Carahuén en el municipio de Pátzcuaro.

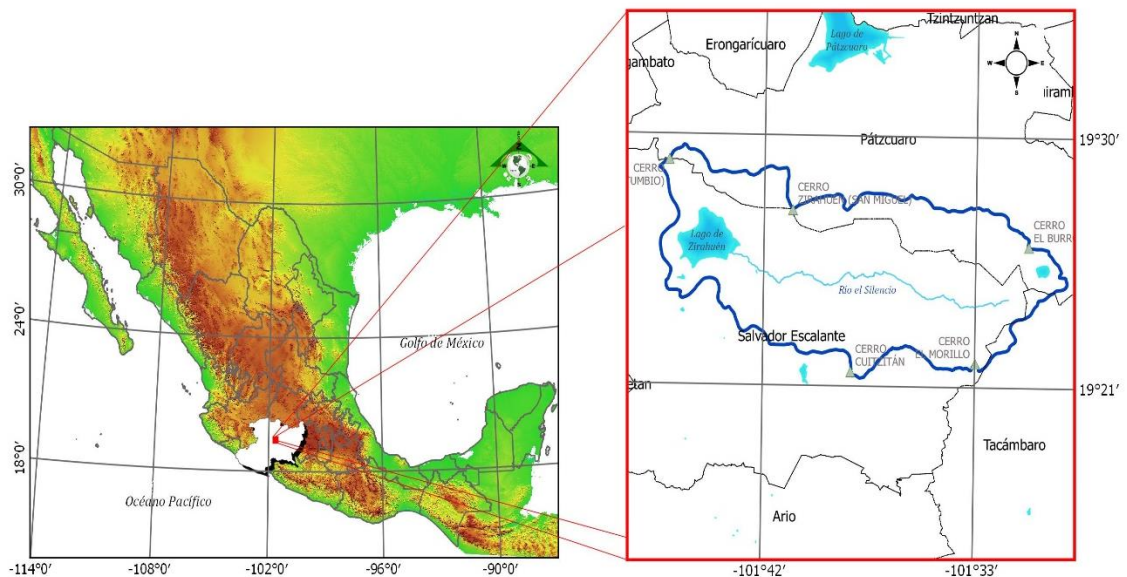


Figura 3.1. Ubicación de la cuenca del lago de Zirahuén

b) Materiales

Los datos y la información cartográfica utilizada en el presente trabajo fueron obtenidos a través de consultas a la página web y solicitudes de información al Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Los datos correspondientes a los registros diarios de elementos climatológicos para la estación climatológica 16146 Zirahuén, se obtuvieron mediante solicitud realizada a la dirección general de la CONAGUA (cuadro 3.1). Las coberturas vectoriales fueron convertidas a matrices de datos de formato raster ASCII a resolución de 100 metros por pixel. Por otro lado, la información meteorológica a nivel diario, fue convertida a unidades inglesas, debido a que el modelo precisa que los datos se encuentren en ese sistema de unidades.

Cuadro 3.1. Síntesis de información utilizada

Tipo	Formato	Versión	Escala	Clave carta	Fuente	Nombre
Topográfico	Shapefile	Serie III	1:50,000	E14A31, E14A32	INEGI (2014)	Conjunto de datos vectoriales topográficos
Edafología	Shapefile	Serie II	1:250,000	Continuo Nacional	INEGI (2013)	Conjunto de datos vectoriales edafológicos
Límite de cuenca	Shapefile	Edición 2	1:50,000	RH18	INEGI (2010)	Red hidrográfica escala 1:50,000
Uso de suelo y vegetación	Shapefile	Serie I,II,III, IV,V	1:250,000	Continuo Nacional	INEGI (2013)	Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación
Datos climatológicos	Tabular	2016	N/A	N/A	CONAGUA A (2016)	Registro de elementos diarios climatológicos
Registro público de derechos del agua	Tabular	2016	N/A	N/A	CONAGUA A (2016)	REPDA

c) Metodología

La evaluación de la variación espacio-temporal de la recarga hídrica se realizó para los años 1972, 1980, 1992, 2000, 2003, 2009 y 2015; la elección de los años analizados se realizó con base en la disponibilidad de datos confiables sobre la cobertura de uso de suelo y vegetación (USV), seleccionando el año de publicación de las diferentes versiones de USV y la disponibilidad de datos de elementos climatológicos para los mismos años. Los años 1970, 1990 (año de publicación de la Serie I) y 2010 (año de publicación de la serie IV), fueron desechados ante la ausencia de datos climatológicos correspondientes. Esta situación orilló a seleccionar los años de 1972, 1992 y 2010 por contar con la temporalidad de elaboración de dichas series de USV, además de los registros climatológicos necesarios. Al respecto en el cuadro 3.2 se resume la elección de los años con datos climatológicos y su respectiva capa de USV seleccionada para su modelación en relación a la fecha de edición de dicho dato espacial.

Una vez conocida la recarga hídrica para la cuenca, se estimó la disponibilidad hídrica respecto a los volúmenes concesionados del REPDA de la CONAGUA (CONAGUA, 2016).

Cuadro 3.2. Elección de fechas para la modelación de la recarga hídrica

Uso de suelo y vegetación	Fecha de elaboración	Disponibilidad de datos climáticos
Serie I	1978-1991	1972, 1980, 1992
Serie II	1994-1999	2000
Serie III	2002-2003	2003
Serie IV	2007-2010	2009
Serie V	2011-2015	2015

Aspectos generales del modelo Soil Water Balance (SWB)

El modelo SWB, fue codificado originalmente en Visual Basic para ser ejecutado a través de Microsoft Excel ® (Dripps, 2003); posteriormente, debido a su funcionalidad y principales resultados obtenidos, en el 2006 el U.S. Geological Survey (USGS) transcribió el código original al lenguaje Fortran 95 (Westenbroek et al., 2010) para convertirlo en una plataforma de ejecución independiente.

El modelo se alimenta con 5 variables indispensables: 1) precipitación y temperatura, 2) clasificación de uso de suelo y vegetación, 3) grupo hidrológico de suelo, 4) dirección de flujo calculado a partir de un modelo digital de elevaciones, y 5) capacidad de agua en el suelo.

La recarga se calcula por separado en cada unidad mínima de análisis, esto es a nivel de pixel o celda de la malla. Las fuentes y sumideros de agua para cada celda, son determinados con base en los datos climáticos de entrada y las características del terreno aportadas por el modelo digital de elevaciones; la recarga es calculada como la diferencia entre los procesos de pérdida y la precipitación, los conceptos asociados a la recarga son los siguientes:

- **Recarga (R):** volumen de agua que entra en sistema de flujo de aguas subterránea en determinado territorio.
- **Precipitación (P):** cantidad de agua que cae a la tierra en forma de lluvia, aguanieve, nieve o granizo.
- **Deshielo (D):** la precipitación que cae en un día en el que la temperatura media menos un tercio de la diferencia entre las temperaturas altas y bajas diarias es menor o igual al punto de congelación del agua se considera que cae como nieve (Dripps y Bradbury, 2005).

- **Flujo de entrada (I):** calculado a partir del raster de direcciones de flujo derivado del modelo digital de elevación, para dirigir el flujo de salida (escorrentía superficial) a las celdas adyacentes.
- **Intercepción (Int):** Cantidad de lluvia específica que se encuentra atrapada, utilizada, evaporada o transpirada por las plantas. Los valores de precipitación diaria deben exceder la cantidad de intercepción especificada antes de que se asuma que cualquier agua alcanza la superficie del suelo. Pueden especificarse valores de intercepción para cada tipo de uso del suelo y temporada (creciente y latente).
- **Escurrimiento (E):** Flujo de salida o escorrentía superficial de una celda, calculada utilizando el método de número de curva de lluvia-escorrentía (SCS, 1985). Esta relación lluvia-escorrentía se basa en cuatro propiedades de la cuenca: tipo de suelo, uso de la tierra, topografía y antecedente de condición de escorrentía.
- **Evapotranspiración (Etp):** la evapotranspiración potencial se estima a través de la selección de uno de los cinco métodos que el modelo ofrece: 1) Thornthwaite-Mather (1957), 2) Jensen-Haise (1963), 3) Blaney-Criddle (Blaney y Criddle, 1966; Allen y Pruitt, 1986; Jensen et al., 1990), 4) Turc (1961), y 5) Hargreaves y Samani (1985).
- **Humedad del suelo (ΔH_s):** la humedad del suelo se calcula mediante la aplicación de los métodos de balance suelo-agua publicados en Thornthwaite (1948) y Thornthwaite-Mather (1955, 1957). Para ello es necesario calcular valores intermedios como la precipitación menos la evapotranspiración potencial (P-EP), la pérdida de agua potencial acumulada (APWL), evapotranspiración actual, exceso de humedad del suelo y déficit de humedad del suelo.

El cálculo de la recarga se realiza con la ecuación 1 (Hart, Schoephoester, y Bradbury, 2008), los componentes de la ecuación se utilizan de manera continua a lo largo del modelo dependiendo de la fase del proceso de cálculo en que se encuentre.

$$R = (P + D + I) - (Int + E + Etp.) - \Delta Hs \quad (1)$$

Donde:

R, recarga (pulg); P, Precipitación (pulg); D, Deshielo (pulg); I, Flujo de entrada (pulg); Int, Intercepción (pulg); E, Escurrimiento (pulg); Etp, Evapotranspiración (pulg); ΔHs , Humedad del suelo (pulg).

Formato de datos de entrada del modelo SWB

El modelo, para su funcionamiento, requiere que la información sea organizada y proporcionada de acuerdo con el tipo de datos que se trate. Así, en algunos casos se requiere de matrices bidimensionales de tipo raster (grid) en formato ASCII, y en otra información de tipo tabular en formato de archivo de texto plano. El cuadro 3.3, muestra los tipos de información y formatos reservados para las variables de entrada.

Cuadro 3.3. Datos raster y tabulares requeridos por el modelo

Tipo de dato	Descripción
Grid ASCII	Cobertura de uso de suelo
	Grupo hidrológico de suelo
	Capacidad de retención de humedad del suelo
	Dirección de flujo
Tabular	Datos climáticos diarios
	Tabla de consulta de propiedades de tipo y uso de suelo
	Matriz de retención de agua en el suelo para cada pérdida potencial de agua acumulada

Cobertura de uso de suelo

El modelo utiliza información referida sobre cobertura y uso del suelo de manera conjunta con los datos de capacidad de retención de humedad para el cálculo del escurrimiento superficial y, con ello, asignar la capacidad máxima de retención de humedad del suelo para cada celda de la malla (Lanya, 2013). El modelo SWB tiene la capacidad de utilizar diferentes métodos de clasificación de uso del suelo; para su correcto funcionamiento se debe anexar una tabla de consulta que indique el número de curva, intercepción, recarga máxima y profundidad de raíces en cada tipo de uso de suelo. El sistema de clasificación adaptado para el modelo es la clasificación de Anderson et al., (1976) modificado en el nivel II por Dripps (2003) y se encuentra codificado en el manual de usuario del modelo (Westenbroek et al., 2010).

Para la generación de la malla de uso de suelo, se utilizaron como base las coberturas de uso de suelo y vegetación editadas por el INEGI [Series: I (1992), II (1997), III (2003), IV (2007) y V (2013)] a escala 1:250, 000 de los productos denominados “uso de suelo y vegetación”. Estos productos, detallan las condiciones del territorio mexicano sobre los diferentes tipos de vegetación a lo largo de 21 años, así como la ocupación en las actividades agropecuarias (INEGI, 2015).

En la preparación de los datos para el modelo SWB, las coberturas de información fueron codificadas de conformidad con los valores referidos en la tabla de referencia; para ello, fue necesario agrupar y homologar las diferentes clases presentes en cada serie, utilizando como referencia la tabla de valores de referencia del modelo (Westenbroek et al., 2010). El cuadro 3.4, muestra el resumen de los usos de suelo codificados en cada una de las series de uso de suelo y vegetación; debido a la diferente calidad espacial entre los insumos utilizados en la elaboración de la cartografía, se tienen diferentes niveles precisión espacial y temática de la información cartográfica, lo anterior originó la ausencia o existencia de algunas clases presentes para cada serie.

Cuadro 3.4. Codificación del tipo de uso de suelo y vegetación

Cobertura de uso de suelo y vegetación					
Ecosistema	Estrato/Formación	Sub Estrato	Comunidad vegetal	Clave	Código
BOSQUES	Coníferas	Vegetación primaria	Bosque oyamel	BA	161
			Bosque de pino	BP	161
	Coníferas y latifoliadas	Vegetación primaria	Bosque de pino-encino	BPQ	190
			Bosque de encino-pino	BQP	190
		Vegetación secundaria	Bosque de pino-encino	BPQ/VSa	190
			Bosque de encino-pino	BQP/VSa	190
	Latifoliadas	Vegetación primaria	Bosque mesófilo de montaña	BM	175
			Bosque de encino	BQ	175
		Vegetación secundaria	Bosque mesófilo de montaña	BM/VSa	175
	OTROS	Humedales	NA	Vegetación tular	VT
Cuerpo de agua		NA	NA	CA	200
Pastizales		NA	NA	PI	150
Agricultura		NA	NA	E-TA,RP,TA,TAP,TP	110
Zona urbana		NA	NA	AH, ZU	101

Después de codificar los usos de suelo y vegetación en sus diferentes versiones, se generaron los mapas, la figura 3.2, que muestran la dinámica del cambio de uso de suelo utilizado en el presente trabajo.

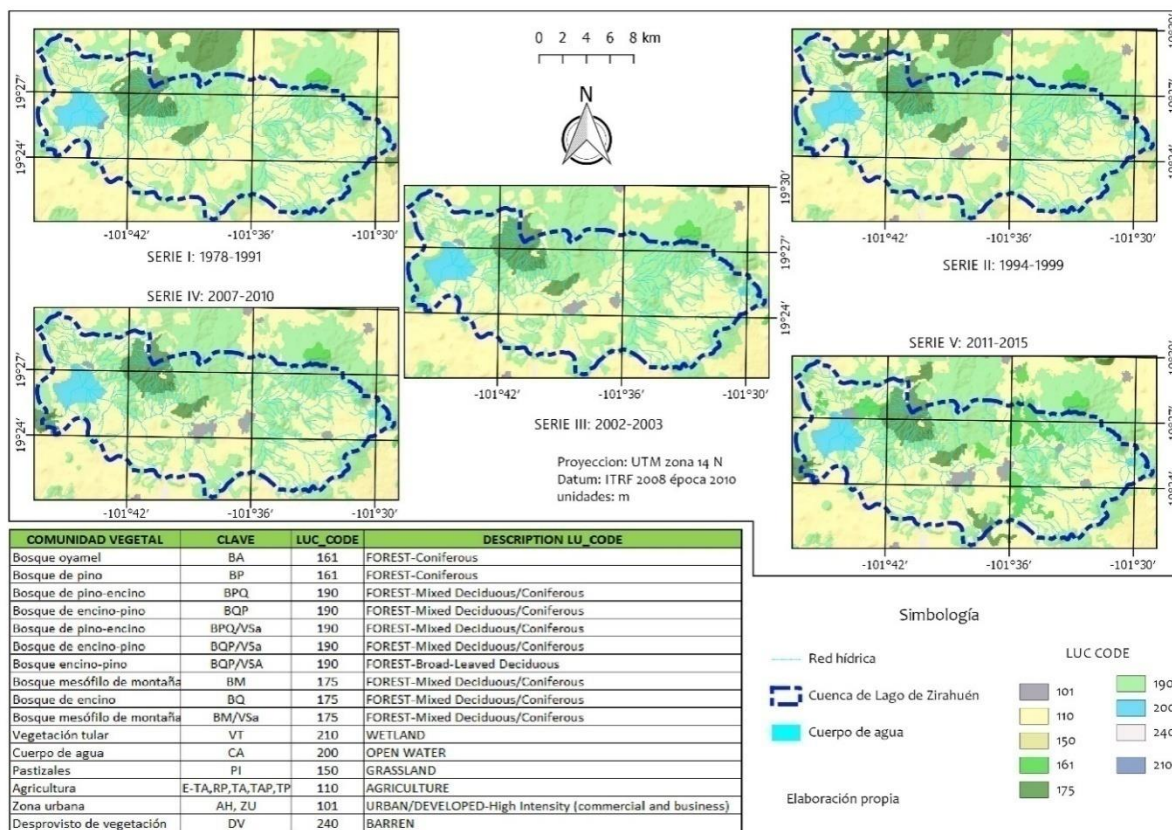


Figura 3.2. Malla de cobertura de uso de suelo y vegetación codificados para el modelo SWB

Grupo hidrológico de suelo

El modelo SWB hace referencia a cuatro grupos hidrológicos de suelos (A, B, C, D) en función de la capacidad de infiltración (NRCS, 1986). De acuerdo a lo anterior, los suelos de tipo A presentan alta capacidad de infiltración, con una tendencia decreciente hasta los suelos tipo D, con baja capacidad de infiltración y mayor capacidad de flujo superficial (cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Tasa de infiltración por grupo hidrológico de suelos

Grupo de suelos	Tasa de infiltración
A	> 0.3 pulgadas por hora
B	0.15 a 0.3 pulgadas por hora
C	0.05 a 0.15 pulgadas por hora
D	< 0.05 pulgadas por hora

Para la construcción de la malla de grupo hidrológico de suelos, se tomó como base la caracterización edafológica que representa la distribución geográfica de los tipos de suelos en el país, expuesta en la capa de unidades edafológicas y puntos de perfiles de suelos serie II a escala 1:250,000. La clasificación de los suelos está referida a la base referencial mundial del recurso suelo 2014 (WRB, 2014) publicada por la FAO (INEGI, 2004).

Se identificaron cuatro unidades edáficas: andosoles, leptosoles, luvisoles y phaeozem. A partir del cruce de la información de unidades edáficas y perfiles de suelos se definieron tres clases texturales lo que corresponde a tres grupos hidrológicos, cuadro 3.6, lo que permitió la construcción de la malla de la figura 3.3.

Cuadro 3.6. Reclasificación y codificación de los grupos hidrológicos de suelos

Unidad edáfica	Textura	Clase textural	Grupo hidrológico	Código
Andosol	Moderadamente gruesa	Ca = Franco-arenosa	A	1
Leptosol	Moderadamente fina	Cra=Franco-arcillosa-arenosa	C	3
Luvisol	Moderadamente fina	Cr= Franco-arcillosa	D	4
Phaeozem	Moderadamente fina	Cr= Franco-arcillosa	D	4

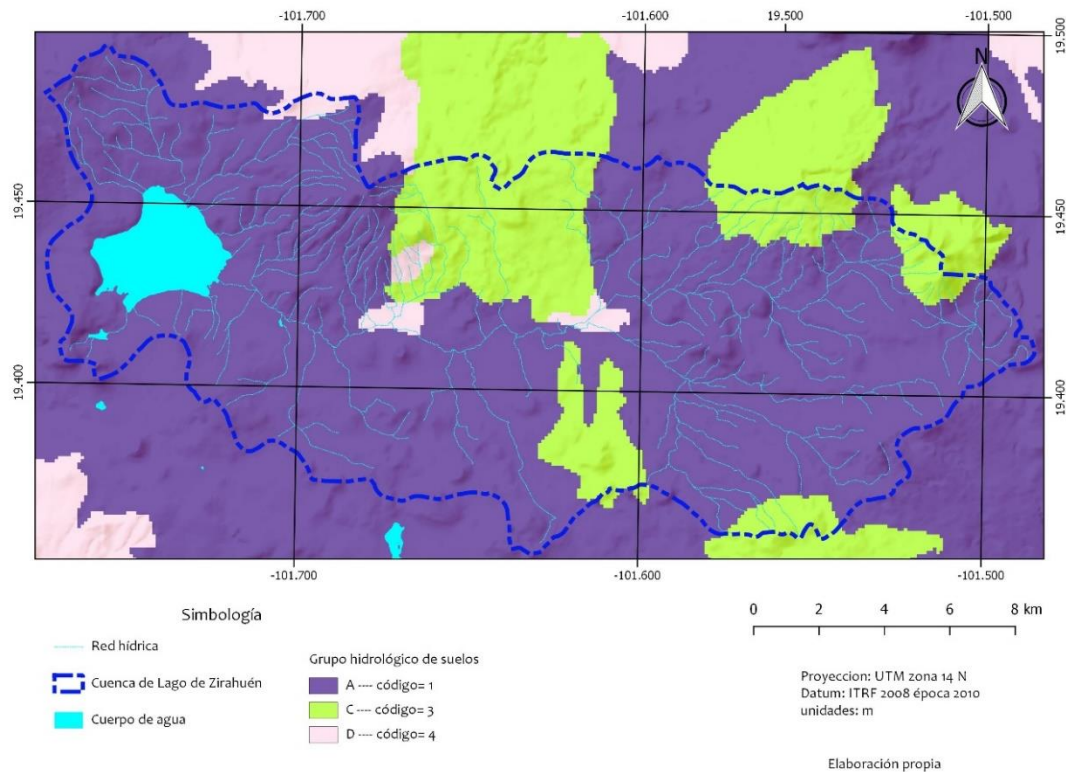


Figura 3.3. Malla de grupos hidrológicos de suelo

Capacidad de retención de humedad del suelo (Available soil water capacity)

La cantidad de agua disponible en un suelo se expresa comúnmente lámina unitaria expresada en pulgadas de retención de agua por pie de espesor del suelo (Westenbroek et al. 2010). Por lo anterior, si un suelo presenta una capacidad de agua disponible de 2 pulgadas/pie y la profundidad de la zona raíz es de 2.5 pies, entonces la capacidad máxima de agua será de 5.0 pulgadas, el agua añadida a la columna del suelo en exceso de este valor se convertirá en recarga. El modelo SWB utiliza información de tipos de suelos y, cobertura de uso de suelo y vegetación para el cálculo de la capacidad máxima de humedad del suelo en cada celda de la malla. El cálculo se realiza mediante la ecuación 2:

$$\text{MCHS} = \text{CRH} * \text{Pr} \quad (2)$$

Dónde: MCHS, máxima capacidad de humedad del suelo (pulg); CRH, capacidad de retención de humedad del suelo (pulg); Pr, profundidad radicular (pie)

Los valores correspondientes a la capacidad de humedad disponible del suelo, se encuentran tabulados para cada tipo de suelo. En la cuenca del lago de Zirahuén, éstos valores fueron asignados utilizando la información tabular (Westenbroek et al. 2010) y la textura del suelo de cada caso en particular (cuadro 3.7) (figura 3.4).

Cuadro 3.7. Código para la capacidad de retención de humedad del suelo

Unidad edáfica	Clase textural	Capacidad de agua disponible
Andosol	Ca = Franco-arenosa	1.6
Leptosol	Cra= Franco-arcillosa-arenosa	2.7
Luvisol	Cr= Franco-arcillosa	3
Phaeozem	Cr= Franco-arcillosa	3

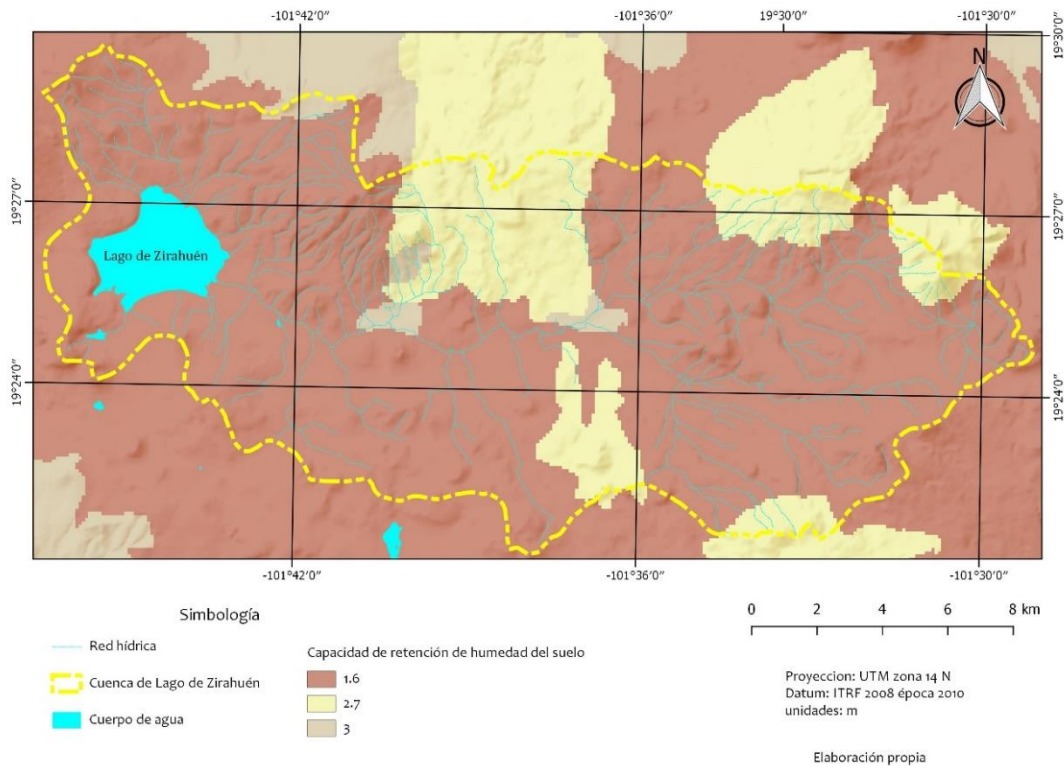


Figura 3.4. Malla de capacidad de retención de humedad del suelo

Dirección de flujo

Las direcciones de flujo expresan la dirección que puede tomar el agua a partir de una celda central para el cálculo del patrón de movimiento de esta. El modelo SWB plantea este cálculo mediante el modelo D8 (O'Callaghan y Mark, 1984). Cuando se encuentra una celda con más de una dirección de flujo posible, se identifica como una depresión cerrada. El código SWB impide que se produzca escorrentía superficial adicional o acumulación de agua superficial, en lugar de ello, requiere agua en exceso de la capacidad de humedad del suelo para contribuir a la recarga (Westenbroek et al., 2010).

Respecto a las condiciones topográficas que condicionan el escurrimiento, se elaboró la malla de direcciones de flujo, obtenida a partir del modelo digital de elevación construido con base

en las curvas de nivel del conjunto de datos topográficos escala 1:50000 de INEGI. Este proceso fue realizado mediante la aplicación de la herramienta hydrology de Arcmap 10.3® (Figura 3.5).

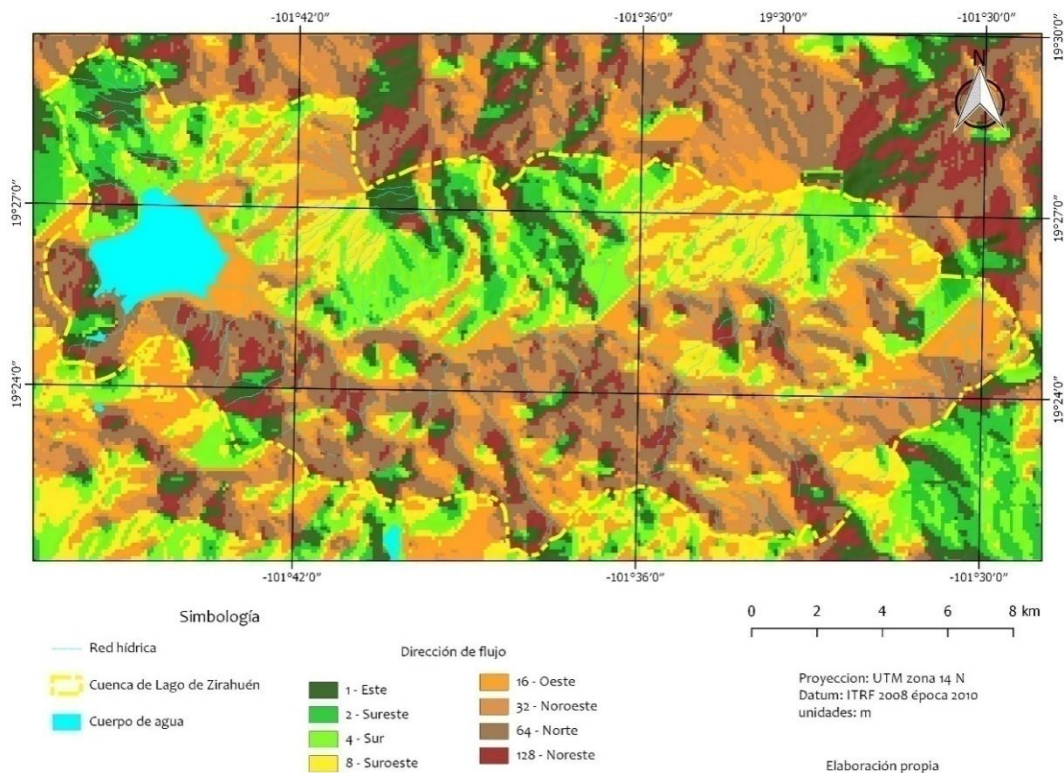


Figura 3.5. Malla de direcciones de flujo

Datos climáticos diarios

El modelo SWB requiere un archivo tabular que contenga datos climáticos. El código contiene rutinas que calculan la fecha gregoriana, el día juliano y los años bisiestos de manera automática. A los elementos de datos no utilizados se les asigna un valor de -99999, porque todos los campos deben tener algún valor. Los datos mínimos necesarios son los de temperatura mínima y máxima en grados Fahrenheit (°F) y el valor de precipitación diaria en pulgadas. Para el cálculo de la evapotranspiración ofrece varios métodos, no obstante, con los datos mínimos mencionados anteriormente, se puede elegir el método de Thornthwaite-Mather o Hargreaves-Samani. El resto

de los métodos requieren datos adicionales como el porcentaje de insolación, humedad relativa mínima, humedad relativa media y velocidad del viento.

Los datos climáticos fueron obtenidos del registro de elementos diarios climáticos para la estación climatológica 16146 Zirahuén, a través de la CONAGUA. La base de datos integra información de valores diarios de temperatura mínima y máxima en grados Celsius (°C), y precipitación en milímetros (mm) para los años de 1972, 1980, 1992, 2000, 2003, 2009 y 2005. Sin embargo, para la correcta lectura de los datos por el modelo, se realizó la conversión de las unidades a grados Fahrenheit (°F) para el caso de las temperaturas y pulgadas (in) para la precipitación. Con ello, se elaboró el archivo tabular para cada uno de los años correspondientes respetando el formato y el orden de la tabla sugerida para el modelo SWB (Westenbroek et al., 2010), el cual se muestra en el cuadro 3.8.

Cuadro 3.8. Datos tabulares de variables climáticas

Mes	Día	Año	Temp. media (°F)	Precip. (pulg)	Humedad relativa (%)	Temp. máxima (°F)	Temp. mínima (°F)	Velocidad del viento (m/s)	Humedad relativa mínima (%)	Insolación
1	1	1972	55.9	0	-99999	65.3	46.4	-99999	-99999	-99999
1	2	1972	58.1	0.2	-99999	64.4	51.8	-99999	-99999	-99999
1	3	1972	53.4	0	-99999	63.1	43.7	-99999	-99999	-99999
1	4	1972	52.3	0	-99999	63.5	41	-99999	-99999	-99999
1	5	1972	57.2	0	-99999	66.2	48.2	-99999	-99999	-99999

diferentes capacidades del suelo-agua. De particular importancia mencionar que esta tabla no debería ser modificada por el usuario.

Ejecución del modelo

Una vez integrados los datos de entrada, el siguiente paso lo constituyó la configuración del modelo, en donde se establecen los parámetros bajo los cuales se procederá a realizar la modelación (figura 3.7). Este procedimiento se realiza mediante la edición del archivo *recharge.ctl* que se puede hacer en cualquier editor de archivos de texto plano, considerando los siguientes aspectos principales: a) Model domain definition: se definen las características de las mallas (número de filas y columnas, coordenadas extremas, tamaño de pixel o resolución espacial); b) Flow direction: se indica el nombre de la malla que corresponde a las direcciones de flujo; c) Soil group: se ingresa el nombre de la malla de los grupos hidrológicos de suelos; d) Land use/cover classification: indicar el nombre de la malla que tiene la codificación de la cobertura de uso de suelo y vegetación; e) Base soil water capacity: dar el nombre de la malla correspondiente a la capacidad de retención de humedad de los suelos; f) Evapotranspiration method: se elige el método para el cálculo de la evapotranspiración, en este caso, se eligió el método de Hargreaves-Samani (1985); g) Begin solution: sección en la que se inicia la corrida del modelo indicando el archivo tabular de los datos climáticos que corresponda al año de análisis. Las matrices de datos en formato ráster, deben estar en un mismo directorio, en este caso denominado 'input'; en tanto que la información tabular en archivos de texto, debe ir en un directorio denominado 'climate'; en todo caso, la estructura de directorios debe estar al interior de la carpeta que contiene al programa ejecutable principal del modelo.

```
1 # SWB Model annotated control file
2 #
3 # This test case covers a grid centered on the Black Earth Creek
4 # watershed in south-central Wisconsin. Atmospheric data for this
5 # case is derived from the climate station at the Dane County
6 # Regional Airport.
7 #
8 #-----
9 # MODEL DOMAIN DEFINITION
10 #
11 # Definition of the model domain. Units of meters are assumed.
12 # All subsequent input grids must match the specified model domain exactly.
13 #
14 #           Lower LH Corner      Upper RH Corner      Grid
15 #           |                   |                   | Cell
16 #           NK NY XO             Y0             X1             Y1             Size
17 GRID 311 164 208319.1448 2141781.439 239419.1448 2158181.439 100.0
18 #-----
19 # LENGTH UNITS
20 #
21 # Must specify whether grid coordinate are given in METERS or FEET.
22 # This affects conversion of values from inches to acre-ft.
23 #
24 GRID_LENGTH_UNITS METERS
25 #-----
26 # OUTPUT CONTROL
27 #
28 # If running SWB in batch mode, it may be desirable to turn off the
29 # daily mass balance summary that is normally printed to the screen.
30 #
31 # Screen output and DISLIN messages may be suppressed by uncommenting
32 # the directives below.
33 #
34 # TURN OFF SCREEN OUTPUT?
35 #SUPPRESS_SCREEN_OUTPUT
36 #
37 # TURN OFF INTEGRATED OUTPUT (i.e. use external SWERead program after run completion)
38 #SUPPRESS_INTEGRATED_OUTPUT
39 #
40 # TURN OFF SUPPLEMENTAL MASS BALANCE / DAILY REPORT FILES?
41 #SUPPRESS_DAILY_FILES
42 #
43 # TURN OFF DISLIN MESSAGES
44 #SUPPRESS_DISLIN_MESSAGES
45 #-----
46 # GROWING SEASON
```

Figura 3.7. Archivo de configuración recharge.ctl de SWB

3.3 Resultados y discusión

Los principales resultados al realizar las corridas de simulación con el modelo SWB, se muestran a continuación. La figura 3.8, presenta la distribución espacio-temporal de las láminas unitarias de recarga. Se observa que los mayores volúmenes (área por lámina unitaria) se tienen en las corridas de los años 1992 y 2000, y los valores más bajos en las corridas de los años 2009 y 2015.

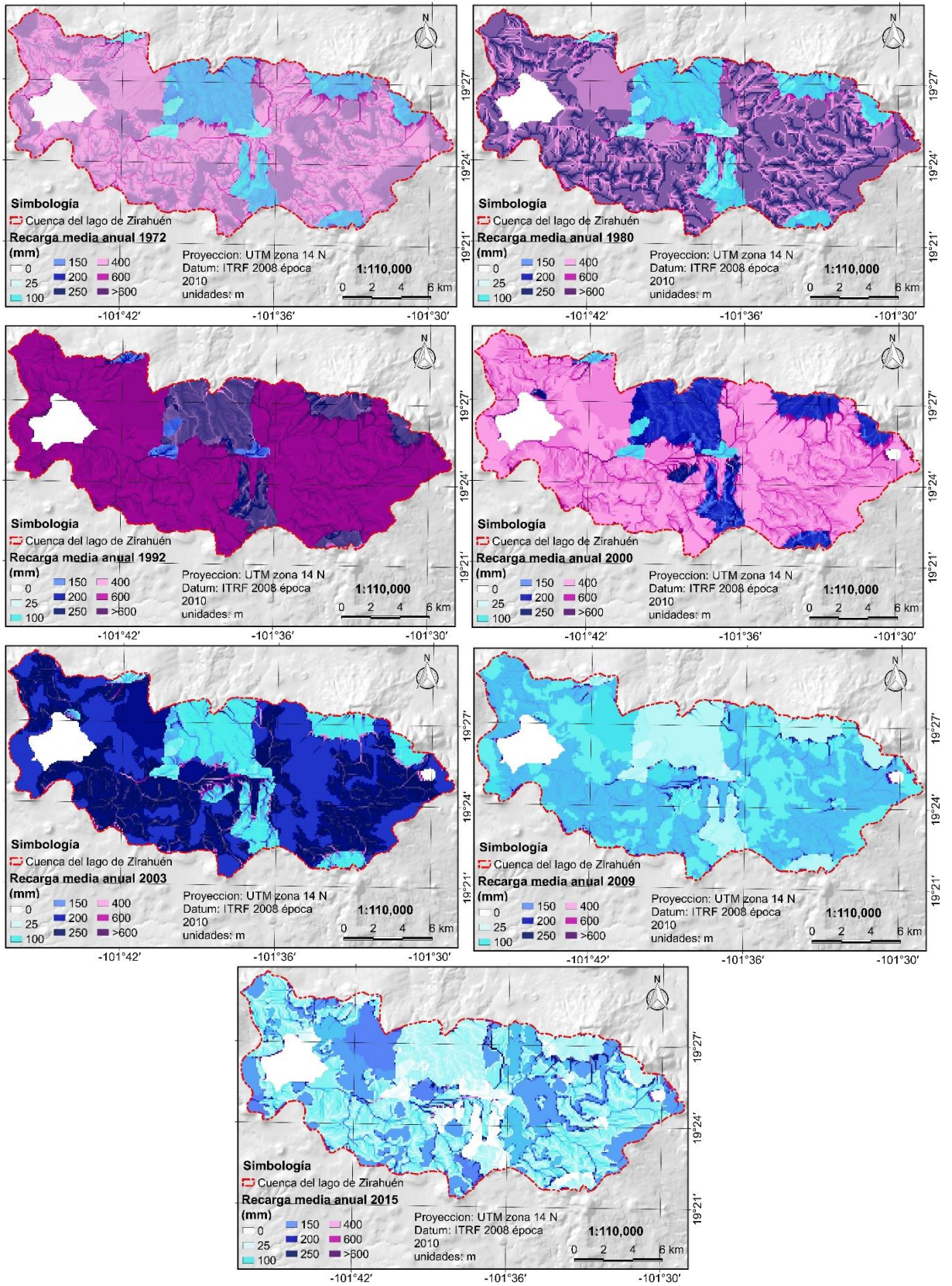


Figura 3.8. Distribución espacial y temporal de la recarga

Los resultados antes descritos están fuertemente influenciados por el régimen de precipitación y el térmico, en particular por los efectos del Niño y Niña, así como los cambios de uso de suelo presentes en la cuenca, tal como pudo observarse en la figura 3.2. El cuadro 3.9, detalla los resultados de las variables más importantes del ciclo hidrológico integrados al nivel de la cuenca.

Cuadro 3.9. Valores de los principales componentes de la recarga hídrica

Año	R (mm/año)	Int (mm/año)	E (mm/año)	Etp potencial (mm/año)
1972	178.816	26.924	484.124	1238.25
1980	156.464	27.178	596.9	1771.65
1992	415.798	32.512	935.228	1560.068
2000	206.756	31.242	681.736	1695.704
2003	107.696	44.45	519.684	1555.496
2009	53.086	43.18	465.582	1613.154
2015	45.212	41.402	487.426	1636.268
Promedio	166.26	35.27	595.81	1581.51

Nota: R=Recarga; Int=Intercepción; E=Escorrentía; Etp potencial=Evapotranspiración potencial.

El análisis conjunto de los resultados de la simulación con respecto a la precipitación y la temperatura, se puede observar en la figura 3.9, donde se aprecia que los años con precipitación por debajo de los 1000 mm anuales son 1972, 2008 y 2015, en tanto que los de mayor volumen de precipitación y de recarga son 1992 y 2002, tal como se anticipaba al analizar la figura 3.8. Sin embargo, a pesar de que 1972, tiene valores muy similares de precipitación que 2015, los valores de recarga son del orden de tres veces menor en 2015 que en 1972, lo anterior, de acuerdo con lo que se observó en la figura 3.2, se debe a los cambios de uso de suelo, pues hubo un importante

cambio de áreas provistas de bosques de coníferas y latifoliadas a bosques de coníferas y latifoliadas con vegetación secundaria; por otro lado, hubo un 30% de cambio de áreas de pastizales a áreas agrícolas, principalmente aguacate, con marcada influencia directa en la cantidad y calidad del agua hasta ahora no evaluadas.

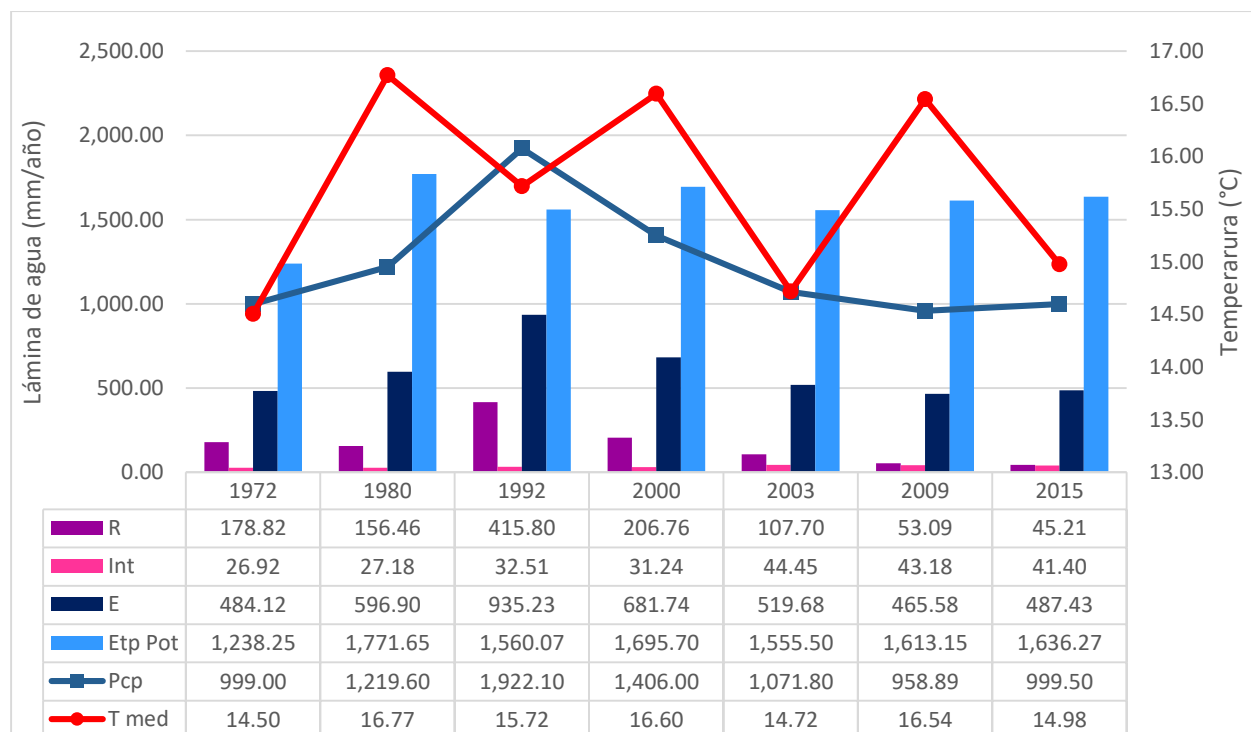


Figura 3.9. Comparativo de valores para elementos del balance hídrico. R=Recarga; Int=Intercepción; E=Escurrimiento; Etp potencial=Evapotranspiración potencial; Pcp=Precipitación; T med=Temperatura media.

Analizando el comportamiento conjunto de la lámina de precipitación y la lámina de recarga para cada uno de los años, se encontró un coeficiente de determinación R^2 de 0.88 (figura 3.10), lo anterior implica que en el 88% de los casos, la recarga puede ser explicada con base en la precipitación (Montgomery y Runger, 2009). La excepción es el caso del año 1972 que al tener

valores menores 1000 mm de precipitación anual, presenta valores altos de recarga media anual para el acuífero, situación similar se tiene para el caso de los escurrimientos.

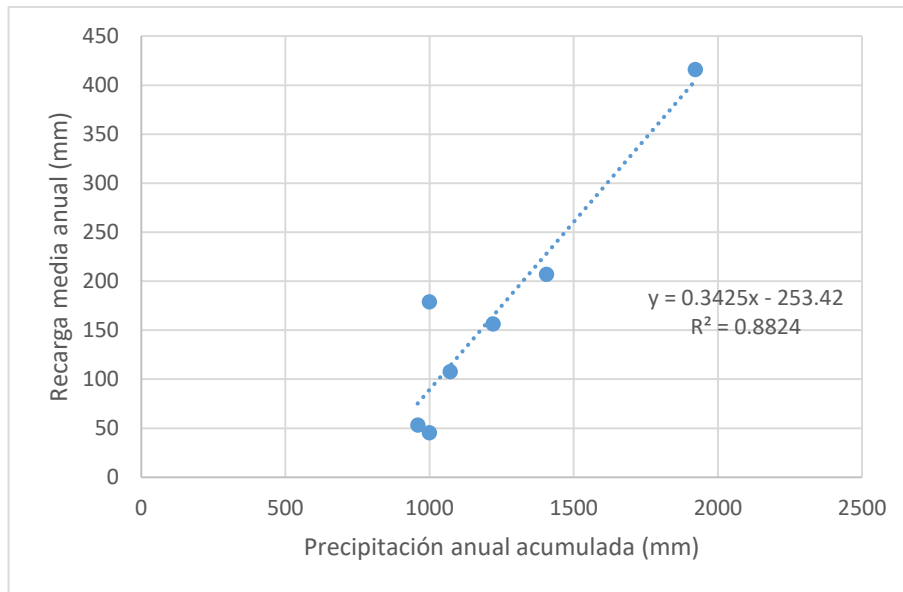


Figura 3.10. Ecuación de regresión lineal entre la recarga-precipitación

Por otro lado, en la figura 3.11, se hace un análisis a partir de la relación entre Escurrimiento (E) y la Recarga (R), relación E/R, se puede observar que hay un desacoplamiento al realizar el análisis multitemporal. A partir del año 1992 y hasta el 2015, se aprecia un comportamiento lineal con marcados incrementos en los valores de escurrimiento, por ello los valores altos; en contraste de 1972 a 1992 se tiene un comportamiento desacoplado de los anteriores, prevaleciendo valores bajos de escurrimiento y por tanto valores bajos en la relación E/R. Los valores aquí mostrados, están influenciados directamente por los cambios de uso de suelo, puesto que las alteraciones en el período de 1972 a 1992 fueron menores con respecto a los que se llevaron a cabo de 1992 a 2015; por ejemplo, las áreas urbanas y de núcleos de población, tuvieron incrementos del orden de 66% en el periodo de 2000 a 2015

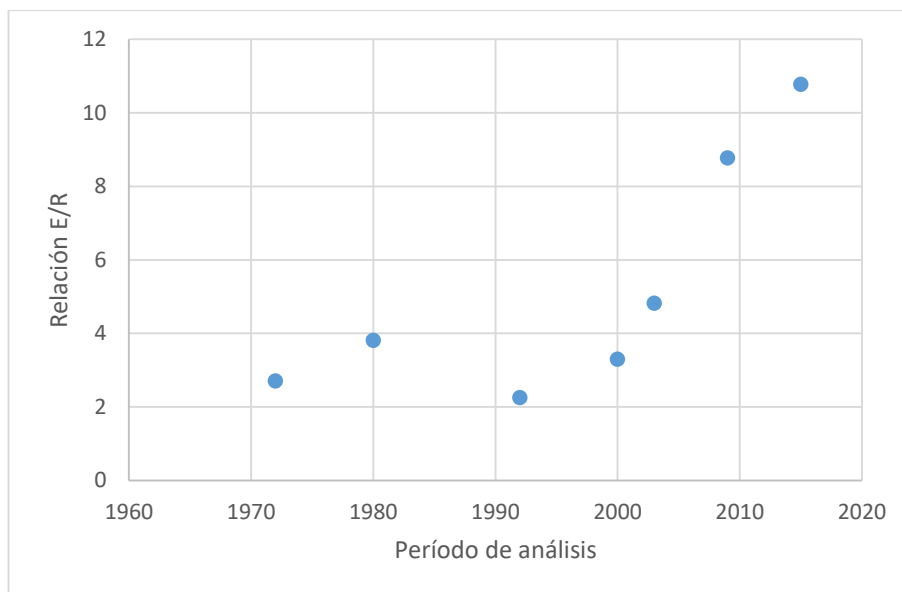


Figura 3.11. Relación Escurrimiento/Recarga

Disponibilidad hídrica

Los resultados obtenidos con la simulación, fueron analizados de manera conjunta con los volúmenes de agua concesionados en la cuenca, de conformidad con la base de datos del REPDA, que reporta la totalidad de aprovechamientos legales. El cuadro 3.10, reporta los volúmenes calculados de recarga (R) y escurrimiento superficial (E) considerando la superficie total de la cuenca.

Cuadro 3.10. Volúmenes de Recarga y Escurrimiento Mm³/año

Año	R (Mm ³ /año)	E (Mm ³ /año)
2000	56.5204	186.3646
2003	29.4406	142.0648
2009	14.512	127.2751
2015	12.3595	133.2465

En el cuadro 3.11 y la figura 3.12, se encuentran reportados los volúmenes de agua comprometidos de acuerdo con los registros del REPDA. De lo mostrado por los elementos en mención, se observa que existe un incremento en los volúmenes concesionados con el paso del tiempo, tanto en los volúmenes de agua subterránea como los superficiales.

Cuadro 3.11. Volúmenes concesionados Mm³/año

Años	Aguas subterráneas (Mm³/año)	Aguas superficiales (Mm³/año)
2000	0.0964	0.755
2003	0.1816	2.1926
2009	0.1818	2.4389
2015	0.7479	3.1761

Proporcionalmente, (cuadro 3.11) se encuentran comprometidos mayores volúmenes de agua superficial con respecto a las subterráneas. En ambos casos, como ya se anticipaba, se observan cambios lineales incrementales en los años de 2000 a 2015.

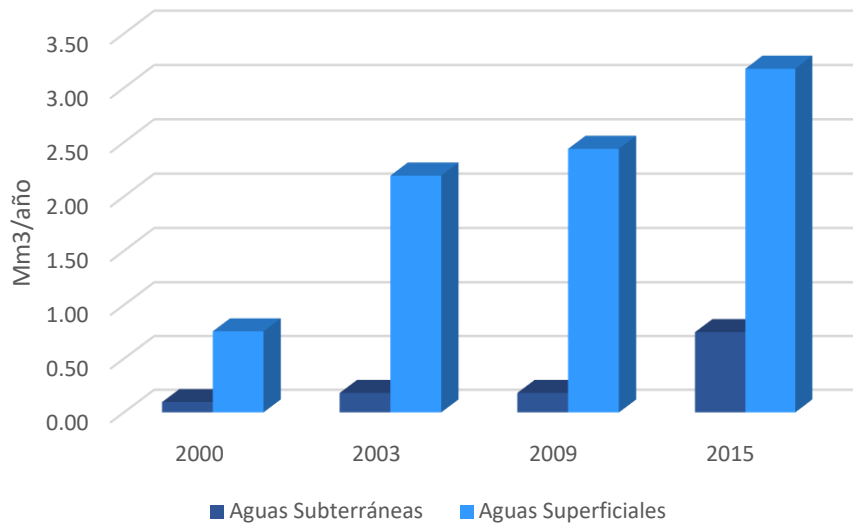


Figura 3.12. Variación de los volúmenes de agua comprometidos

Por lo que respecta al tipo de uso del agua concesionada, el cuadro 3.12, muestra los detalles con respecto al agua subterránea. Los volúmenes concesionados para uso agrícola, son los que mayores incrementos han presentado; efectivamente, mientras que en el año 2000 el uso agrícola representaba el 18.7% del total, para el año 2015 éste representa el 53.14%, lo anterior es un claro reflejo del cambio en las prácticas agrícolas debidas principalmente a la transformación de las áreas agrícolas tradicionales de baja demanda hídrica a las huertas aguacateras con alta demanda hídrica. Los registros de volúmenes comprometidos con respecto a las aguas subterráneas, indican que del año 2000 al año 2016 hubo un incremento del 676%, lo que significa que se ha concesionado casi siete veces más agua en el periodo de análisis.

Cuadro 3.12. Volúmenes comprometidos de aguas subterráneas Mm³/año

Uso	2000	2003	2009	2015
	Mm ³ /año	Mm ³ /año	Mm ³ /año	Mm ³ /año
Agrícola	0.018	0.1033	0.1033	0.3975
Doméstico	0.0002	0.0002	0.0002	0.0102
Público urbano	0.0781	0.0781	0.0781	0.1192
Servicios	0	0	0.0002	0.221

El cuadro 3.13, presenta los volúmenes concesionados de aguas superficiales por tipo de uso de acuerdo con los datos reportados por el REPDA. El uso público urbano en el año 2000 ocupaba la mayor proporción concesionada con 59% del total de volúmenes, para el año 2015, del total de las concesiones, el uso público urbano representa el 81%. La comparación de los volúmenes totales concesionados de 2000 a 2015, indican que el total de volúmenes comprometidos se incrementó en 320% que significa un incremento tres veces mayor de lo que se tenía concesionado en el año 2000.

Cuadro 3.13. Volúmenes comprometidos de aguas superficiales Mm³/año

Uso	2000	2003	2009	2015
	Mm ³ /año	Mm ³ /año	Mm ³ /año	Mm ³ /año
Agrícola	0.2505	0.2937	0.5396	0.5396
Doméstico	0.0345	0.0351	0.0351	0.0354
Pecuario	0.0224	0.0224	0.0224	0.0224
Público urbano	0.4477	1.8321	1.8321	2.5691
Servicios	0	0.0093	0.0097	0.0097

Al comparar los resultados de la simulación con el modelo SWB, que asume condiciones cuasi-homogéneas y sin extracciones en la cuenca, con los volúmenes comprometidos, da una idea aproximada de la situación hídrica en la cuenca. El cuadro 3.14, detalla la relación que existe entre

los volúmenes de recarga calculado por el modelo SWB y la demanda de agua o volúmenes comprometidos de agua. Esta comparación, permite conocer los volúmenes de agua disponibles a futuro. La disponibilidad de agua subterránea, ha sido calculada restando a la recarga los volúmenes comprometidos.

Cuadro 3.14. Disponibilidad hídrica subterránea en Mm³/año

Año	R	Demanda de aguas subterráneas	Disponibilidad hídrica subterránea
	Mm ³ /año	Mm ³ /año	Mm ³ /año
2000	56.5204	0.0964	56.4241
2003	29.4406	0.1816	29.259
2009	14.512	0.1818	14.3302
2015	12.3595	0.7479	11.6116

La figura 3.13, muestra el comportamiento en el tiempo de los volúmenes disponibles de agua en la cuenca. Se observa que hay una tendencia en el período de 2000 a 2015, acentuada por un lado por las mayores demandas comprometidas y, por el otro, por los cambios en los volúmenes de recarga debido a fluctuaciones climática y la variación en el uso de suelo.

De acuerdo a las estimaciones de CONAGUA, el acuífero ‘Nueva Italia’, tiene un Índice de Disponibilidad de Aguas Subterráneas (IDAS) de 0.82, por lo que se clasifica en la zona de disponibilidad 4, que significa que tiene suficiente volumen disponible para satisfacer las demandas de agua comprometidas (DOF, 2017). Estos resultados, confirman lo encontrado en este trabajo, puesto que la zona de estudio se encuentra dentro del territorio dominado por el acuífero Nueva Italia y al calcular el IDAS con los resultados aquí encontrados, resulta en 0.99; a pesar de encontrarse en zona de disponibilidad, la dinámica temporal de los volúmenes comprometidos debe

alertar sobre la planeación del uso del agua en el acuífero. Finalmente, el territorio que ocupa el acuífero Nueva Italia, difiere del que aquí se ha estudiado puesto que la cuenca es un subconjunto espacial de dicho acuífero.

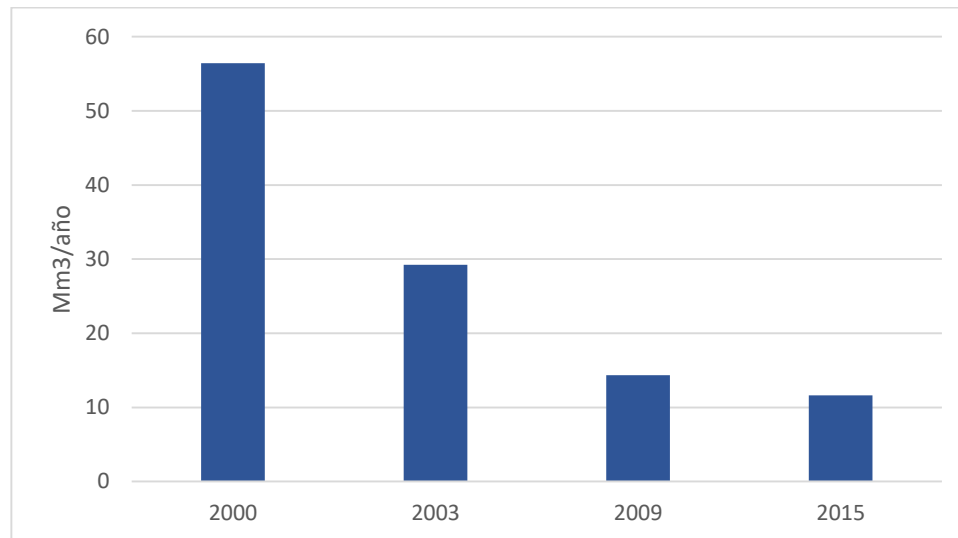


Figura 3.13. Comportamiento de la disponibilidad hídrica subterránea

Respecto al agua superficial, la disponibilidad se calculó de manera análoga al caso de la subterránea, considerando los volúmenes de agua comprometidos y los volúmenes de escurrimiento de agua obtenidos con el modelo SWB. Aunque la demanda superficial de agua es mínima comparada con los escurrimientos calculados, como ya se apuntaba, existe una tendencia creciente en la demanda de agua. Por lo que toca a la disponibilidad, los volúmenes parecen mantener similaridad en 2003, 2009 y 2015 (cuadro 3.15).

Cuadro 3.15. Disponibilidad hídrica superficial en Mm³/año

Año	E	Demanda de aguas superficiales	Disponibilidad hídrica superficial
	Mm³/año	Mm³/año	Mm³/año
2000	186.3646	0.755	185.6096
2003	142.0648	2.1926	139.8723
2009	127.2751	2.4389	124.8362
2015	133.2465	3.1761	130.0704

La figura 3.14, muestra la evolución temporal de los volúmenes de agua disponibles en la zona de estudio. Se puede observar una tendencia decreciente con un mínimo en el año 2009; a pesar de la aparente recuperación en el año 2015, los valores están por debajo de lo que aconteció en 2000 y 2003.

Durante 2017, la CONAGUA, emitió el decreto por el cual da a conocer los volúmenes de agua disponibles, bajo el nombre de Disponibilidad Relativa (Dr), que para el caso de la cuenca del ‘río Zirahuén’ se reportan valores de 0.9489 de Dr y se clasifica en la zona de disponibilidad 1, por lo que se considera como zona de escasez de agua (DOF, 2017). Estos resultados reportados por la CONAGUA, contrastan con lo encontrado con la simulación de este trabajo.

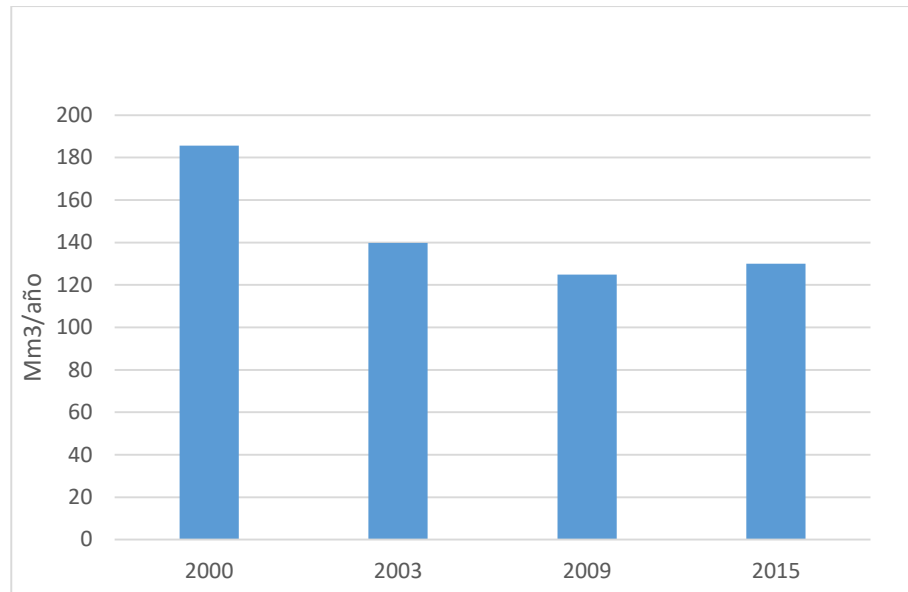


Figura 3.14. Comportamiento de la disponibilidad hídrica superficial

Tomando en cuenta los valores para calcular D_r en 2016 (DOF, 2016b), la fecha más cercana al año de la modelación, resulta D_r en 0.9215, lo que lo ubica en condiciones similares a lo reportado por la CONAGUA para el caso de la cuenca del río Zirahuén, que dicho sea de paso, tiene ligeras diferencias espaciales con respecto a la cuenca del lago Zirahuén que aquí se manejado. De particular importancia resulta el hecho de considerar el caudal ecológico, en 55 millones de metros cúbicos, para mantener la funcionalidad del ecosistema lacustre y ripario; esta condición, es la que origina que la cuenca sea considerada en condición de escasez.

Finalmente, los valores de escurrimiento aquí calculado (133.246 Mm^3 en 2015), están muy distantes de los considerados por CONAGUA (52.16 Mm^3) en la determinación de la disponibilidad en la cuenca. Estas diferencias se deben al método de estimación, pues mientras CONAGUA, hace las estimaciones con base en el método racional, asumiendo la hipótesis del medio homogéneo para las condiciones de precipitación y cobertura del suelo sin importar la pendiente, la modelación considera los elementos geoespaciales de manera detallada en cobertura

y uso del suelo. Sin embargo, a pesar de contar con una modelación más fina, los alcances de este trabajo, no han podido ser verificados con aforos, puesto que, hasta la fecha, existe un vacío de información al respecto. Cualquier conjetura que se haga respecto de los volúmenes de escurrimientos, dista mucho de la realidad en tanto no se tenga instrumentada la cuenca para hacer la debida calibración con respecto a datos medidos

3.4 Conclusiones

Con la aplicación del modelo SWB fue posible conocer las variaciones temporales y espaciales de la recarga hídrica y los elementos que conforman el balance hídrico como la infiltración, el escurrimiento y le evapotranspiración potencial en la cuenca del lago de Zirahuén.

En ese sentido, se identificó que la recarga hídrica es altamente influenciada por los regímenes de precipitación en el área, sin embargo, pudo observarse el decremento paulatino desde 1972 hasta el 2015. En contraste se observó que a medida que los volúmenes de recarga disminuyen, los volúmenes de escurrimiento aumentan como consecuencia de los cambios en la cobertura vegetal.

En lo respectivo a disponibilidad hídrica, se manifiesta que los usos más demandantes dentro de la cuenca corresponden a los usos públicos urbanos y el agrícola, esto puede ser explicado por el crecimiento de la población que manifiesta la expansión de la mancha urbana, lo que requiere cada vez más agua para satisfacer las necesidades; en cuanto a las actividades agrícolas, la expansión de las tierras dedicadas a la producción de aguacate y zarzamora en la región impactan en dos sentidos: el primero, con el incremento de las áreas para cultivos se demanda mayor cantidad de agua; el segundo, los suelos tienden a perder su capacidad de infiltración, aumentando el escurrimiento, por lo tanto, menor volumen de recarga.

La aplicación del modelo SWB, aporta un método alternativo confiable para la evaluación del recurso hídrico en cuencas hidrográficas, ya que considera la dinámica del uso del territorio y la dinámica de la cobertura vegetal como factores esenciales en la estimación de la disponibilidad hídrica. Además, tratándose de requerimientos de información, el modelo presenta ventajas para su alimentación ya que permite trabajar con datos existentes tan solo con homologarlos y normalizarlos a lo propuesto por Westenbroek et al. (2010). Por consiguiente, se puede proponer como una alternativa en la planeación, ordenamiento y gestión de los recursos hídricos, ya que permite generar información con relativa rapidez.

3.5 Bibliografía

CONAGUA. (2009). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Michoacán de Ocampo*. (S. del M. A. y R. Naturales, Ed.) (Primera ed). México, D.F. Recuperado a partir de www.conagua.gob.mx

CONAGUA. (2015a). *Estadísticas del agua en México, edición 2015*. México, D.F. Recuperado a partir de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>

CONAGUA. (2016). Registro público de derechos del agua (REPDA). Recuperado el 13 de agosto de 2016, a partir de <http://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/registro-publico-de-derechos-de-agua-repda-55190>

DOF. Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, Pub. L. No. NOM-011-CONAGUA-2015, Diario Oficial de la Federación 1 (2015). México. Recuperado a partir de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027yfecha=27/03/2015

DOF. (2016a) Ley Federal de Derechos, Pub. L. No. Última reforma publicada en el DOF el 7 de diciembre de 2016, Diario Oficial de la Federación 1 (2016). México. Recuperado a partir de http://www.indautor.gob.mx/documentos_normas/leyfederal.pdf

DOF. (2016b). ACUERDO por el que se dan a conocer los valores de cada una de las variables que integran las fórmulas para determinar durante el ejercicio fiscal 2016 las zonas de disponibilidad, a que se refieren las fracciones I y II del artículo 231 de la Ley Federal. México. Recuperado a partir de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5426305yfecha=19/02/2016

DOF. ACUERDO por el que se dan a conocer las zonas de disponibilidad que corresponden a las cuencas y acuíferos del país para el ejercicio fiscal 2017, en términos del último párrafo del artículo 231 de la Ley Federal de Derechos vigente, Pub. L. No. ACUERDO, 96 (2017). México. Recuperado a partir de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5477506yfecha=24/03/2017

Dripps, W. R. (2003). *The spatial and temporal variability of groundwater recharge within the trout lake basin of northern Wisconsin (Doctor of Philosophy)*. University of Wisconsin - Madison. Recuperado a partir de https://lter.limnology.wisc.edu/sites/default/files/Dripps_PhD_2003.pdf

Hart, D. J., Schoephoester, P. R., y Bradbury, K. R. (2008). *Groundwater recharge in Southeastern Wisconsin estimated by a GIS-based model*. Wisconsin.

INEGI. (2001). Conjunto de datos vectoriales fisiográficos escala 1:1,000,000 serie I. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

INEGI. (2004). *Guía para la interpretación de cartografía: Edafología*. Aguascalientes, Ags. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- INEGI. (2005a). *Guía para la interpretación de cartografía: Climatológica*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- INEGI. (2005b). *Guía para la interpretación de cartografía geológica*. Aguascalientes, Ags.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2014). Conjunto de datos vectoriales topográficos Escala 1:50,000 serie III. E14A31 (Taretan). Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
Recuperado a partir de
<http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825268695>
- INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía : uso del suelo y vegetación : escala 1:250, 000 : serie V*. Aguascalientes, Ags.: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
Recuperado a partir de
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/ususuelo/doc/guia_interususuelov.pdf
- INEGI. (2016). SIATL. Recuperado el 20 de junio de 2008, a partir de
http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#
- IUSS Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106*. <https://doi.org/10.1017/S0014479706394902>
- Lanya, R. (2013). Soil Water Balance (SWB) Model and Applications in the Twin Cities Metropolitan Area. Metropolitan council. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-260-3>
- Montgomery, D. C., y Runger, G. C. (2009). Simple linear regression and correlation. En Limusa Wiley (Ed.), *Applied statistics and probability for engineers* (2a ed., pp. 430–452). Mexico.
- NRCS. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55*. USDA Natural Resource Conservation Service Conservation Engineering Division Technical Release 55, 164.
[https://doi.org/Technical Release 55](https://doi.org/Technical%20Release%2055)

- O'Callaghan, J. F., y Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, 323–344.
[https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80047-X](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80047-X)
- Shiklomanov, I. A. (1998). World Water Resources. A new appraisal and assessment for the 21st century. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, 40.
- Soil Conservation Service. (1985). Section-4. En *National engineering handbook*. Washington, DC.
- Sokolov, A. A., y Chapman, T. G. (1981). Métodos de Cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos. (R. Heras, Ed.). Madrid, España: Instituto de Hidrología de España-UNESCO. Recuperado a partir de <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001377/137771so.pdf>
- Thornthwaite, C. W., y Mather, J. R. (1957). Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance. *Publ.Climatol*, 10 (3), 185–311.
- Touhami, I., Andreu, J. M., Chirino, E., Sánchez, J. R., Pulido-Bosch, A., Martínez-Santos, P., ... Bellot, J. (2014). Comparative performance of soil water balance models in computing semi-arid aquifer recharge. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 193–203.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2013.802094>
- Westenbroek, M. S., Kelson, V. a., Dripps, W. R., Hunt, R. J., y Bradbury, K. R. (2010). SWB — A Modified Thornthwaite-Mather Soil-Water- Balance Code for Estimating Groundwater Recharge. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods* 6-A31, 60.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

Con base en los resultados analizados en los capítulos anteriores, se presentan las conclusiones y recomendaciones generales del estudio:

Al aplicar los SIG se logró conocer e integrar las características morfométricas de la cuenca del lago de Zirahuén y los indicadores socioeconómicos y demográficos de las localidades en ella asentadas.

Las dinámicas de crecimiento poblacional y de actividad económica muestran que en poco tiempo más territorio de la cuenca será ocupado principalmente para actividades agrícolas y ganaderas, lo que implica destinar mayor recurso hídrico para satisfacer los diferentes usos consuntivos, propiciando también degradación ambiental al cambiar el uso del suelo.

Al aplicar el modelo numérico para hacer el balance hídrico en diferentes años se vio que los volúmenes de recarga han disminuido constantemente desde 1972 hasta 2015. La recarga media anual para la década de los 70 tenía un valor promedio de 400 mm/año en prácticamente toda la cuenca, esta condición se mantuvo casi constante hasta fines de los años 90, pero en los 4 años de este siglo que se analizaron (2000, 2003, 2009 y 2015) se obtuvo un valor promedio de 175 mm/año. Esto muestra la alteración en los parámetros que constituyen las aportaciones en la cuenca (la lluvia, principalmente) y los cambios que el uso del suelo ha tenido en los últimos 20 años.

En cuanto a disponibilidad hídrica se refiere, el análisis realizado para el periodo 2000 al 2015, identificó que los usos público urbano y el agrícola presentan mayor demanda en la cuenca. El primero como resultado del aumento de la población y el segundo debido principalmente a cambios en el tipo de cultivo. En décadas pasadas el cultivo que predominaba en la cuenca era el maíz, pero en los últimos años cultivar aguacate representa mejores condiciones económicas para los habitantes, sin embargo, el cultivo requiere mayor cantidad de agua, lo cual, sin una regulación

adecuada tanto en prácticas de labranza como en protección y conservación de áreas naturales de recarga, puede comprometer la disponibilidad del recurso en años futuros.

Aun cuando los resultados han sido favorables en la caracterización física y socioeconómica de la cuenca con información geoespacial disponible a escala 1:250,000, se recomienda aumentar el detalle de la misma, con el objetivo de alcanzar mayor precisión en los datos obtenidos.

Para el caso de la aplicación del modelo SWB, se sugiere realizar cuidadosamente la configuración del mismo, ya que los parámetros se encuentran definidos para una región de Norte América. También es recomendable realizar una evaluación *in situ* para definir con mayor detalle las unidades edáficas y sus propiedades físicas y químicas para mejorar la definición de los grupos hidrológicos y la capacidad de retención de humedad de los suelos.

De relevancia importante resulta mencionar que no existe referencia alguna de la aplicación del modelo SWB para México y Latinoamérica, por lo tanto, el presente trabajo es el primero en ser adaptado a una cuenca mexicana, por lo que representa un aporte metodológico en los estudios hidrológicos.

Finalmente se puede decir que las herramientas de cómputo (sistemas geoespaciales y modelos) alimentadas con bases de datos confiables y continuas pueden ser utilizadas para la planeación, ordenación y gestión del recurso hídrico.