



# ANEXO 9.

Apéndice técnico.

**REGIÓN LAGUNAS**

Julio 2024

# Apéndice técnico Región Lagunas

## Índice

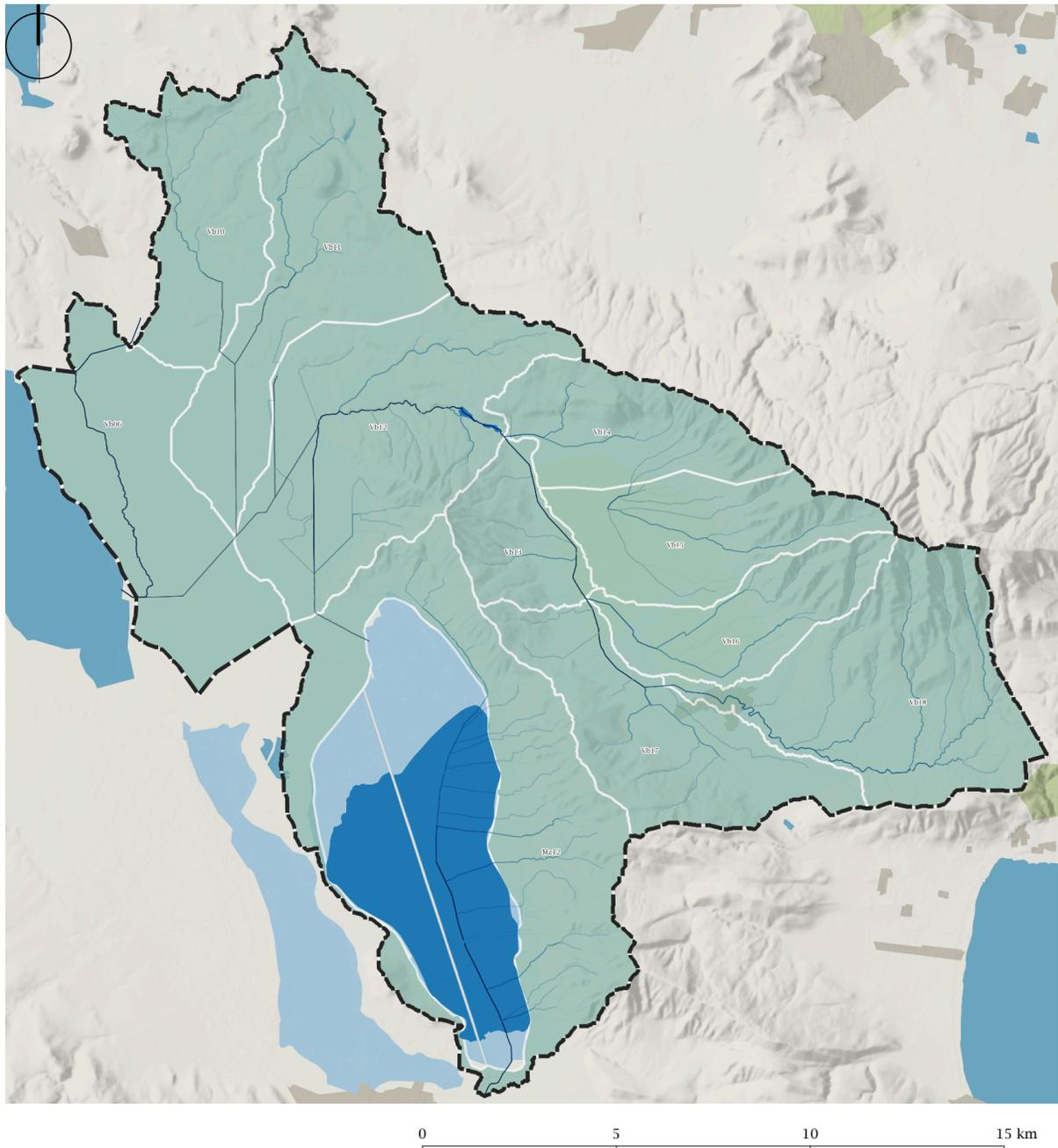
<b>Área de estudio.....</b>	<b>3</b>
<b>Estudios hidrológicos: gasto máximo ordinario.....</b>	<b>8</b>
<b>Volumen anual de escurrimiento natural de la cuenca según NOM - 011 - 2015.....</b>	<b>8</b>
<b>Modelo hidrológico SWAT.....</b>	<b>15</b>
<b>Estudio hidráulico: avenidas máximas ordinarias.....</b>	<b>22</b>
<b>Polígono de actuación.....</b>	<b>40</b>
<b>Delimitación de una zona federal.....</b>	<b>43</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>46</b>

## Área de estudio

El área de estudio hidrológico de la aplicación del Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial Regional Lagunas consta de una serie de subcuencas principalmente endorreicas, siendo la del Río Cocula, de la Laguna de Sayula y de la Laguna de San Marcos, que trasladan las aguas superficiales desde las partes altas de las cordilleras que las rodean hasta sus llanuras, conformadas por un sistema lagunar perenne y temporal. El estudio de bases técnicas (Documento B.) del presente estudio detalla la relevancia hidrológica y ecosistémica en estas cuencas y subcuencas, como base para la delimitación de políticas ambientales y asignación de criterios de regulación ecológica.

Las lagunas principales en la Región Lagunas fueron catalogadas bajo la política de protección, así como otros cuerpos de agua superficiales, a fin de representar su debida zona federal y concentrar las acciones de conservación de los ecosistemas. A pesar de no contar con una delimitación oficial de la zona federal de todos los cuerpos de agua superficiales por la autoridad competente, la Ley de Aguas Nacionales, en su artículo 3, fracción XLVII, define las zonas federales como bienes nacionales a cargo de la Comisión Nacional del Agua, al igual que los lineamientos generales para su delimitación.

La Laguna de San Marcos, dentro de la subcuenca de San Marcos, al no contar con una delimitación y demarcación oficial por parte de la autoridad competente, y al estar sujeta a especulaciones de desarrollo urbanístico e industrial en sus inmediaciones, se analizó de una manera más profunda para el análisis de los procesos hidrológicos que ocurren en la laguna y en las microcuencas que drenan a esta. Para ello, se extraen las microcuencas antes delimitadas en el estudio técnico del ordenamiento para delimitar una nueva área de estudio específica para la Laguna de San Marcos.



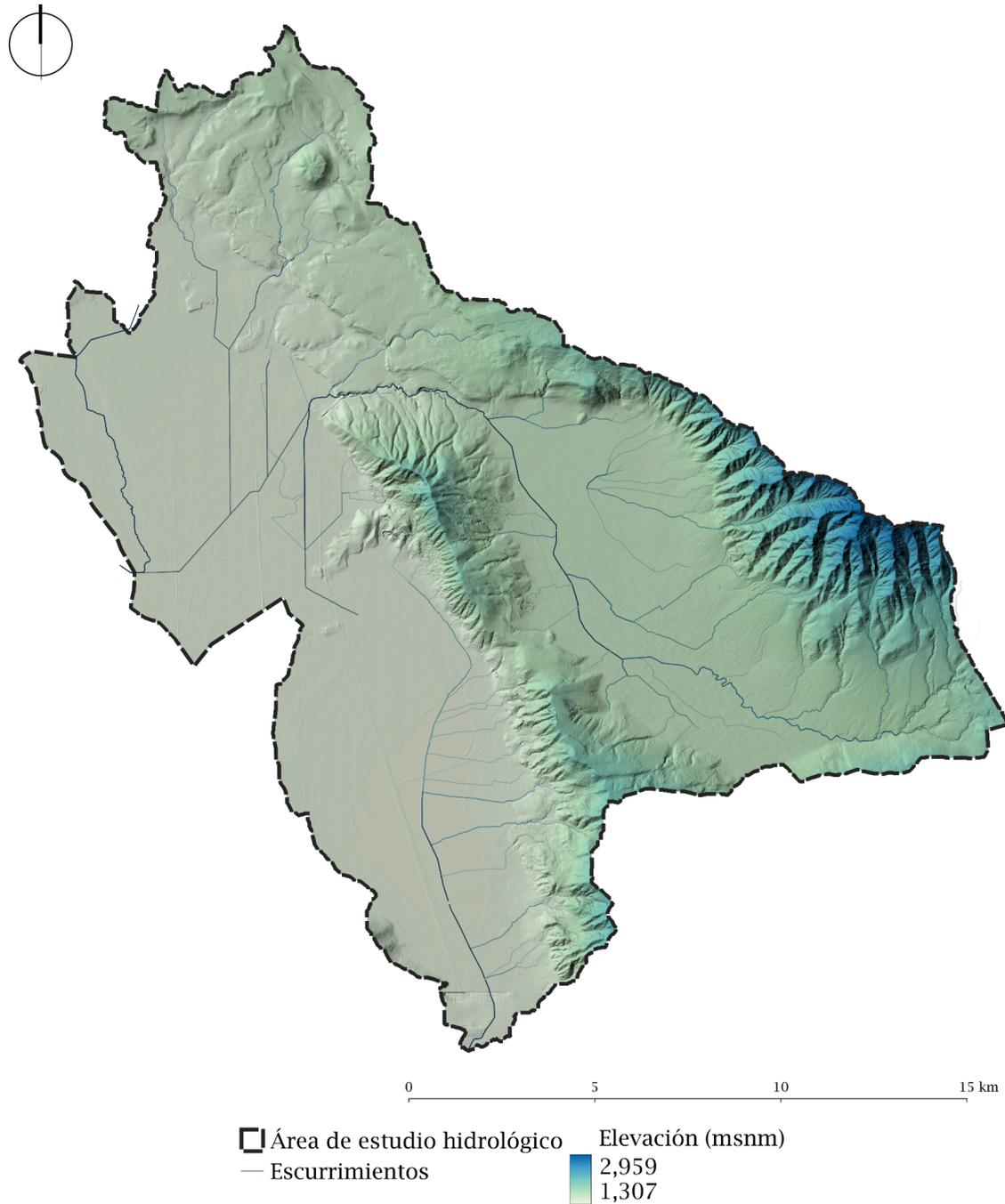
Área de estudio hidrológico
  Cuerpos de agua  
 Escurremientos
  Microcuencas

**Mapa 1. Área de estudio hidrológico de la Laguna de San Marcos.**

*Fuente: Elaboración propia con base en la red hidrográfica del INEGI (2010).*

A fin de obtener un análisis de mayor precisión en el área de estudio hidrológico, se consiguieron capas de la topografía y uso de suelo y vegetación de mayor resolución y se utilizaron para aumentar la certidumbre de los modelos hidrológicos e hidráulicos.

Utilizando como base la extensión del área de estudio, se descargó la topografía de resolución de 5 m del INEGI (2016) como insumo principal para los modelos hidrológicos.



**Mapa 2. Modelo digital de elevación de la Laguna de San Marcos.**

*Fuente: Elaboración propia con base en la topografía resolución de 5m del INEGI (2016).*

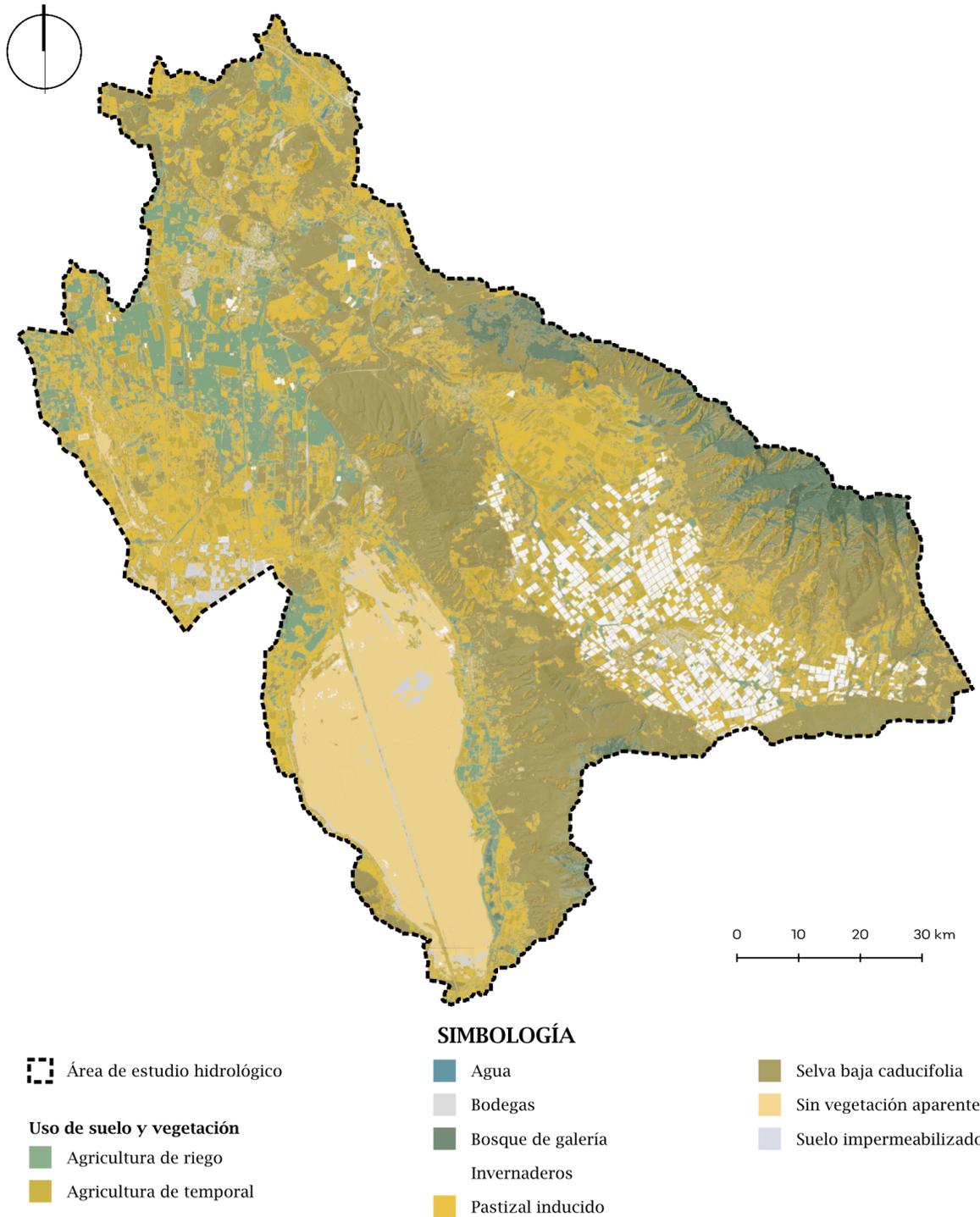
Para llevar a cabo la clasificación de uso de suelo con una mayor resolución espacial y una capa más actualizada, se utilizaron imágenes satelitales del programa NICFI, siguiendo una serie de pasos en la plataforma Google Earth Engine (GEE). Primero, se definió el Área de Estudio Hidrológico (AEH).

La colección de imágenes satelitales del programa NICFI, correspondiente a enero de 2024, se seleccionó debido a la disponibilidad de imágenes sin interferencia de nubes y a la importancia de esta época para identificar las parcelas de riego y de temporal. El programa NICFI, parte de la Norwegian International Climate and Forest Initiative, proporciona imágenes de alta resolución (4.7m/pixel) de áreas tropicales, esenciales para el monitoreo ambiental. Estas imágenes incluyen las bandas RGB y NIR, lo que permite el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), un indicador clave de la salud y vigorosidad de la vegetación.

El NDVI se calculó para cada imagen de la colección y se creó una imagen compuesta para representar el color natural. Esta imagen compuesta se visualizó en GEE, facilitando la evaluación preliminar de la vegetación y las coberturas de suelo. Para entrenar el modelo de clasificación, se recopiló una colección de muestras de entrenamiento utilizando puntos de muestreo representativos de diferentes clases de uso de suelo, como agua, agricultura, selva baja caducifolia, agricultura de temporal, agricultura de riego, urbano, invernaderos, bodegas, bosque de galería, suelo desnudo, pastizales y bosque denso. Estas muestras permitieron identificar y clasificar las distintas coberturas presentes en las imágenes.

Se entrenaron clasificadores supervisados utilizando los algoritmos Random Forest (RF) y Support Vector Machine (SVM), además de aplicar una segmentación no supervisada con K-means. De los modelos generados, el clasificador RF mostró un alto nivel de precisión y se supervisó manualmente para ajustar las clasificaciones incorrectas, especialmente en las zonas urbanas, bodegas e invernaderos.

Enseguida se presenta el mapa de uso de suelo y vegetación que será utilizado para los modelos hidrológicos.



**Mapa 3. Clasificación del uso de suelo y vegetación en el área de estudio hidrológico.**

*Fuente: Elaboración propia con base en imágenes satelitales NICFI.*

## Estudios hidrológicos: gasto máximo ordinario

### Volumen anual de escurrimiento natural de la cuenca según NOM - 011 - 2015

En ausencia de datos hidrométricos directos, se recurre a métodos indirectos para estimar el volumen anual de escurrimiento en una cuenca. El método precipitación-escurrimiento es uno de los más utilizados, ya que permite calcular el escurrimiento basado en la precipitación anual, el área de la cuenca y el coeficiente de escurrimiento, el cual se determina según el tipo de suelo y su uso. A continuación, se detalla la metodología conforme a la norma NOM-011-CONAGUA-2015.

Fórmula del método indirecto (Precipitación-Escurrimiento)

$$Va = P * A * Ce \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Va : Volumen anual de escurrimiento natural de la cuenca

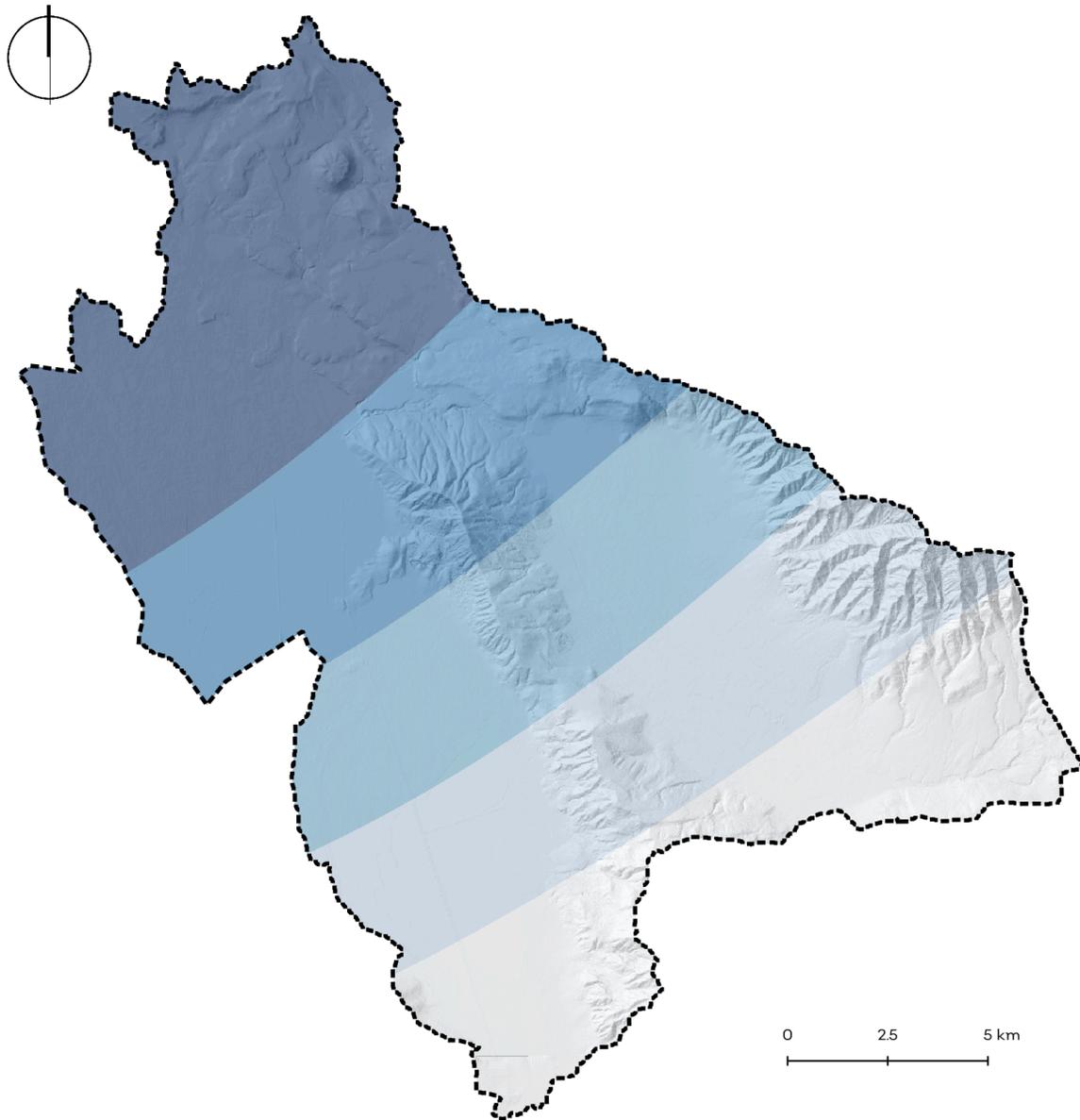
P: Precipitación anual en la cuenca(m)

A: Área de la cuenca ( $m^2$ )

Ce: Coeficiente de escurrimiento

#### Precipitación anual en la cuenca (P)

Para la variable de precipitación, se utilizaron datos obtenidos a partir del análisis de los registros de 31 estaciones ubicadas dentro y fuera de las microcuencas. Se emplearon datos históricos de las estaciones climáticas de CLICOM, abarcando el periodo de 1960 a 2019. A continuación, se llevaron a cabo análisis estadísticos de estos datos para obtener las medias diarias, mensuales y anuales por estación. Posteriormente, se realizó un modelo de precipitación utilizando el método de isoyetas para representar la distribución espacial de la precipitación. A continuación, se presenta la distribución de la precipitación en el AEH.



**SIMBOLOGÍA**

-  AEH\_los\_pozos\_laguna
-  Laguna de San Marcos

**Precipitación media anual (mm/año)**

-  <= 810
-  810 - 817
-  817 - 824
-  824 - 831
-  > 831

**Mapa 4. Precipitación media anual (mm/año)**

*Fuente: Elaboración propia con base en datos del SMN y CONAGUA*

## Coeficiente de escurrimiento (Ce)

El coeficiente de escurrimiento (Ce) se define como un valor adimensional que refleja la capacidad del suelo para generar escurrimiento superficial en respuesta a la precipitación.

Para determinar el coeficiente de escurrimiento, la NOM-011 establece valores de coeficiente K, los cuales dependen del tipo de cobertura del suelo y de su permeabilidad. En este caso, se utiliza la información edafológica vectorizada por el Instituto de Información Estadística y Geográfica (IIEG, 2016) y para el uso de suelo y vegetación se utilizó la modelación generada a partir de las imágenes satelitales del programa NICFI. Los valores se clasifican según la siguiente tabla.

Tipo de Suelo	Características		
<b>A</b>	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.		
<b>B</b>	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos.		
<b>C</b>	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.		
Uso de Suelo	A	B	C
<b>Barbecho, áreas incultas y desnudas</b>	0.26	0.28	0.3
Cultivos			
<b>En Hileras</b>	0.24	0.27	0.3
<b>Legumbres o rotación de pradera</b>	0.24	0.27	0.3
<b>Granos pequeños</b>	0.24	0.27	0.3
Pastizal - % del suelo cubierto o pastoreo			
<b>Más del 75% - Poco</b>	0.14	0.2	0.28
<b>Del 50 al 75% - Regular</b>	0.2	0.24	0.3
<b>Menos del 50% - Excesivo</b>	0.24	0.28	0.3
Bosque			
<b>Cubierto más del 75%</b>	0.07	0.16	0.24
<b>Cubierto del 50 al 75%</b>	0.12	0.22	0.26
<b>Cubierto del 25 al 50%</b>	0.17	0.26	0.28
<b>Cubierto menos del 25%</b>	0.22	0.28	0.3

Tipo de Suelo	Características		
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3

**Tabla 1. Valores de K en función del tipo de uso de suelo.**

Fuente: Elaboración propia con base en metodología de la NOM-011-CONAGUA

Los valores una vez reclasificados con la capa edafológica y de uso de suelo del AEH son presentados en la siguiente tabla.

Uso de suelo	Factor K		
	A	B	C
Agua	0.0001	0.0001	0.0001
Sin vegetación aparente	0.26	0.28	0.3
Suelo impermeabilizado	0.26	0.29	0.32
Pastizal inducido	0.18	0.24	0.3
Agricultura de riego	0.17	0.26	0.28
Invernaderos	0.26	0.29	0.32
Agricultura de temporal	0.24	0.28	0.3
Selva baja caducifolia	0.12	0.22	0.26
Bodegas	0.26	0.29	0.32
Bosque de galería	0.07	0.16	0.24

**Tabla 2. Valores reclasificados de K en función del tipo de uso de suelo.**

Fuente: Elaboración propia con base en metodología de la NOM-011-CONAGUA

una vez obtenido el valor de K, el coeficiente de escurrimiento anual (Ce), se calcula mediante las fórmulas siguientes, ya que los rangos de precipitación se encuentran dentro del rango descrito por la NOM-011-CONAGUA (350 – 2150 mm anuales):

$$Si K \leq 0.15 \quad ; \quad Ce = \frac{K*(P-250)}{2000} \quad \text{Ecuación 2}$$

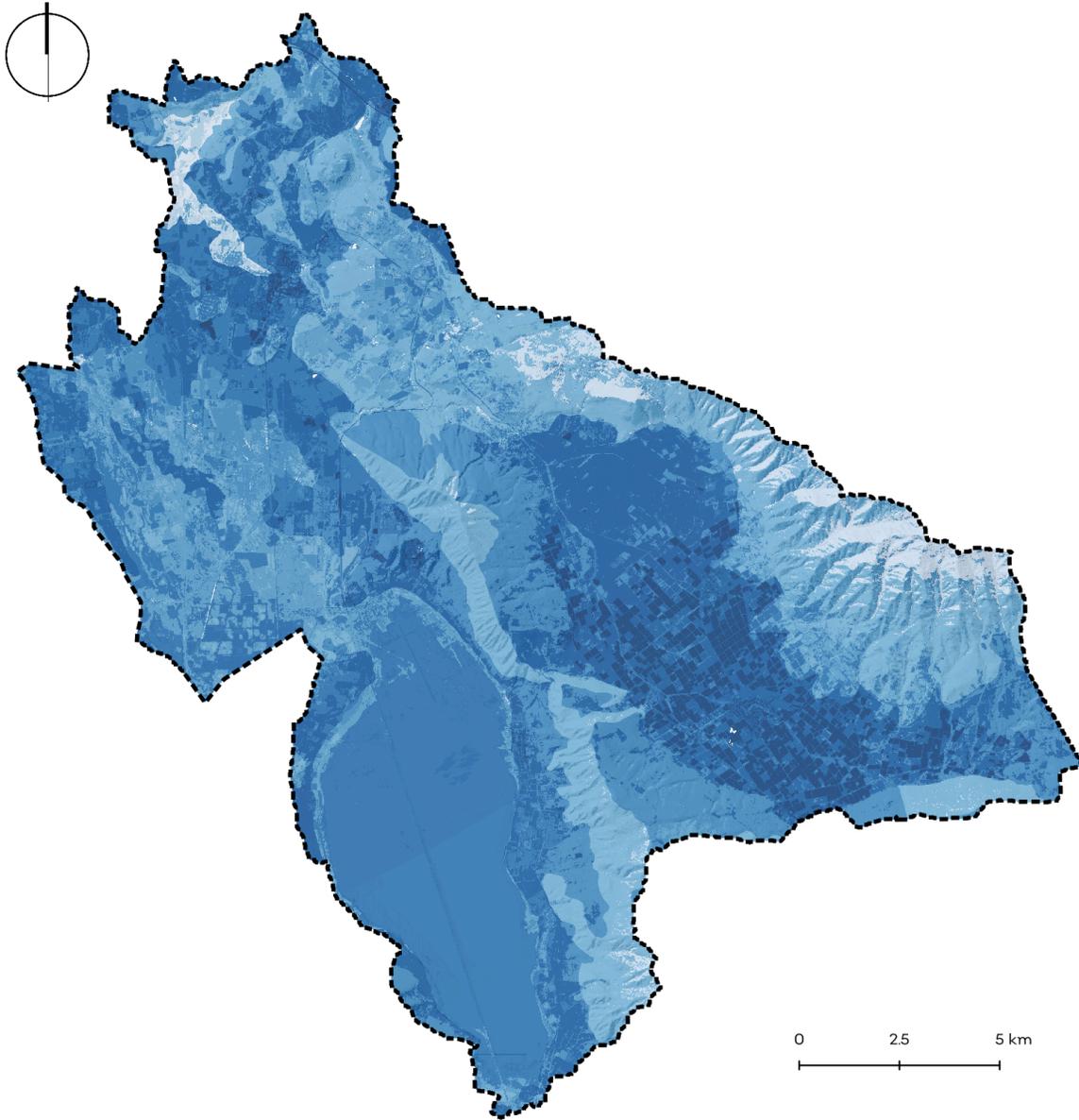
$$Si > 0.15 \quad ; \quad Ce = \frac{K*(P-250)}{2000} + \frac{(K-0.15)}{1.5} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

P= Precipitación anual, en mm

K= Variable dependiente del tipo de uso de suelo

CE = Coeficiente de escurrimiento



### SIMBOLOGÍA

 AEH\_los\_pozos\_laguna

**Coeficiente de escurrimiento**

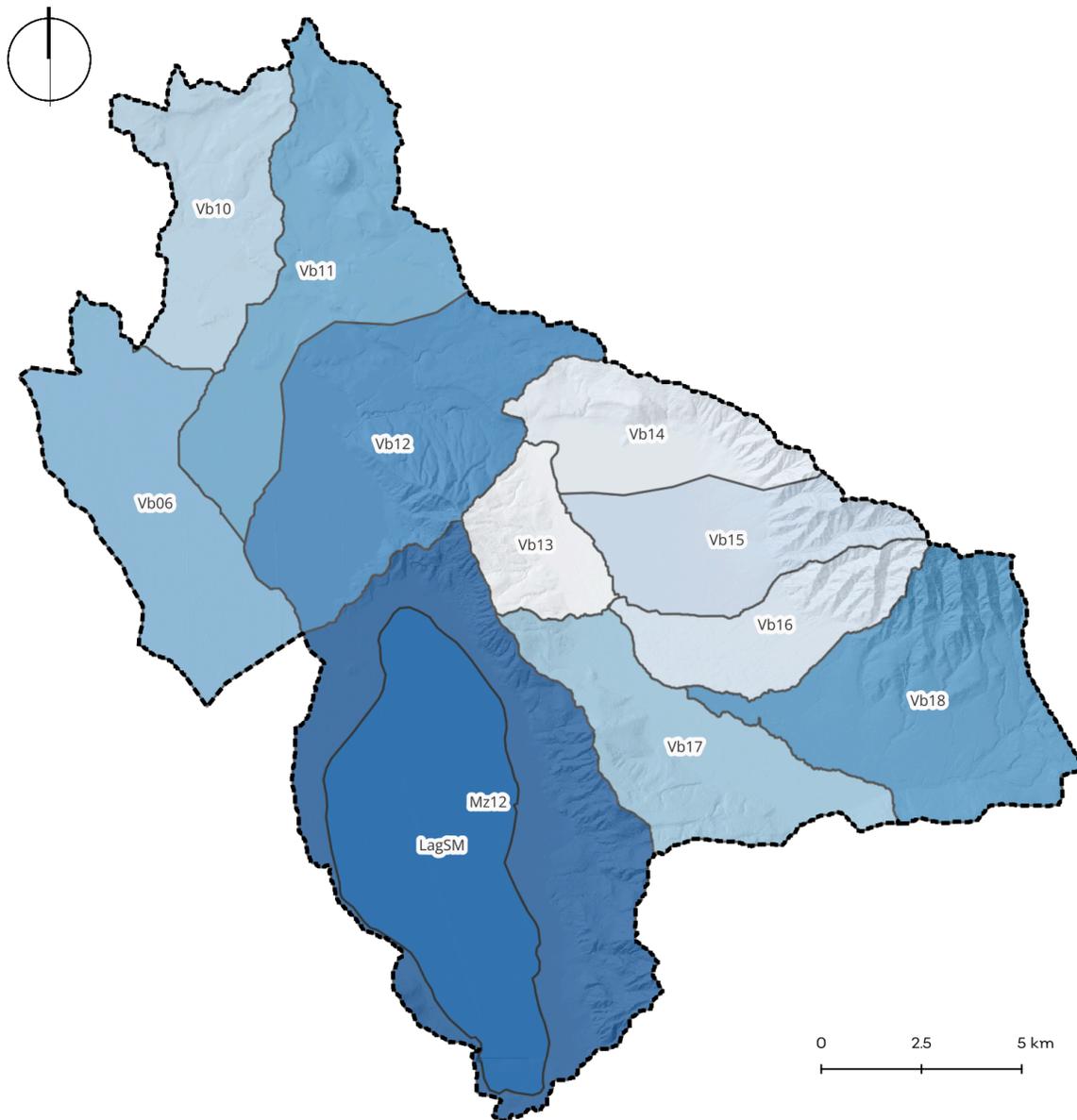
 0.2074  
 0.00001

### Mapa 5. Coeficientes de escurrimiento (CE).

Fuente: Elaboración propia con base en metodología de la NOM-011-CONAGUA y Uso de suelo y vegetación (NICFI) y tipo de suelos digitalizados por el IIEG (2016).

Microcuencas modeladas	Promedio de coeficiente de escurrimiento CE	Promedio de precipitación (m)	Suma de Áreas (m <sup>2</sup> )	Volumen de escurrimiento (m <sup>3</sup> )	Volumen de escurrimiento (hm <sup>3</sup> )
<b>Vb06</b>	0.1610	0.8326	29,986,344	4,018,555	4.02
<b>Vb10</b>	0.1480	0.8364	20,933,531	2,590,729	2.59
<b>Vb11</b>	0.1540	0.8342	32,610,986	4,188,813	4.19
<b>Lag_sm</b>	0.1639	0.8121	39,029,077	5,195,426	5.20
<b>Mz12</b>	0.1586	0.8149	42,942,620	5,548,267	5.55
<b>Vb12</b>	0.1436	0.8297	39,035,073	4,650,278	4.65
<b>Vb13</b>	0.1658	0.8236	10,445,640	1,425,959	1.43
<b>Vb14</b>	0.1366	0.8239	16,659,442	1,875,210	1.88
<b>Vb15</b>	0.1499	0.8180	19,342,515	2,372,575	2.37
<b>Vb16</b>	0.1572	0.8143	14,846,910	1,900,900	1.90
<b>Vb17</b>	0.1688	0.8134	24,172,701	3,319,066	3.32
<b>Vb18</b>	0.1605	0.8097	33,591,684	4,365,155	4.37
<b>Totales</b>	<b>0.1557</b>	<b>0.8219</b>	<b>323,596,525</b>	<b>41,450,933</b>	<b>41.45</b>

La tabla presenta el análisis de escurrimiento para las microcuencas modeladas, mostrando el promedio del coeficiente de escurrimiento (CE), la precipitación promedio, el área total de la cuenca, y el volumen de escurrimiento en metros cúbicos (m<sup>3</sup>) y hectómetros cúbicos (hm<sup>3</sup>).



**SIMBOLOGÍA**

▣ Área de estudio hidrológico

**Volumen de escurrimiento por microcuenca (hm<sup>3</sup>/año)**

▣ 1.43  
▣ 1.88

▣ 1.9  
▣ 2.37  
▣ 2.59  
▣ 3.32  
▣ 4.02

▣ 4.19  
▣ 4.37  
▣ 4.65  
▣ 5.2

**Mapa 6. Volúmenes de escurrimiento por microcuenca.**

*Fuente: Elaboración propia con base en metodología de la NOM-011-CONAGUA*

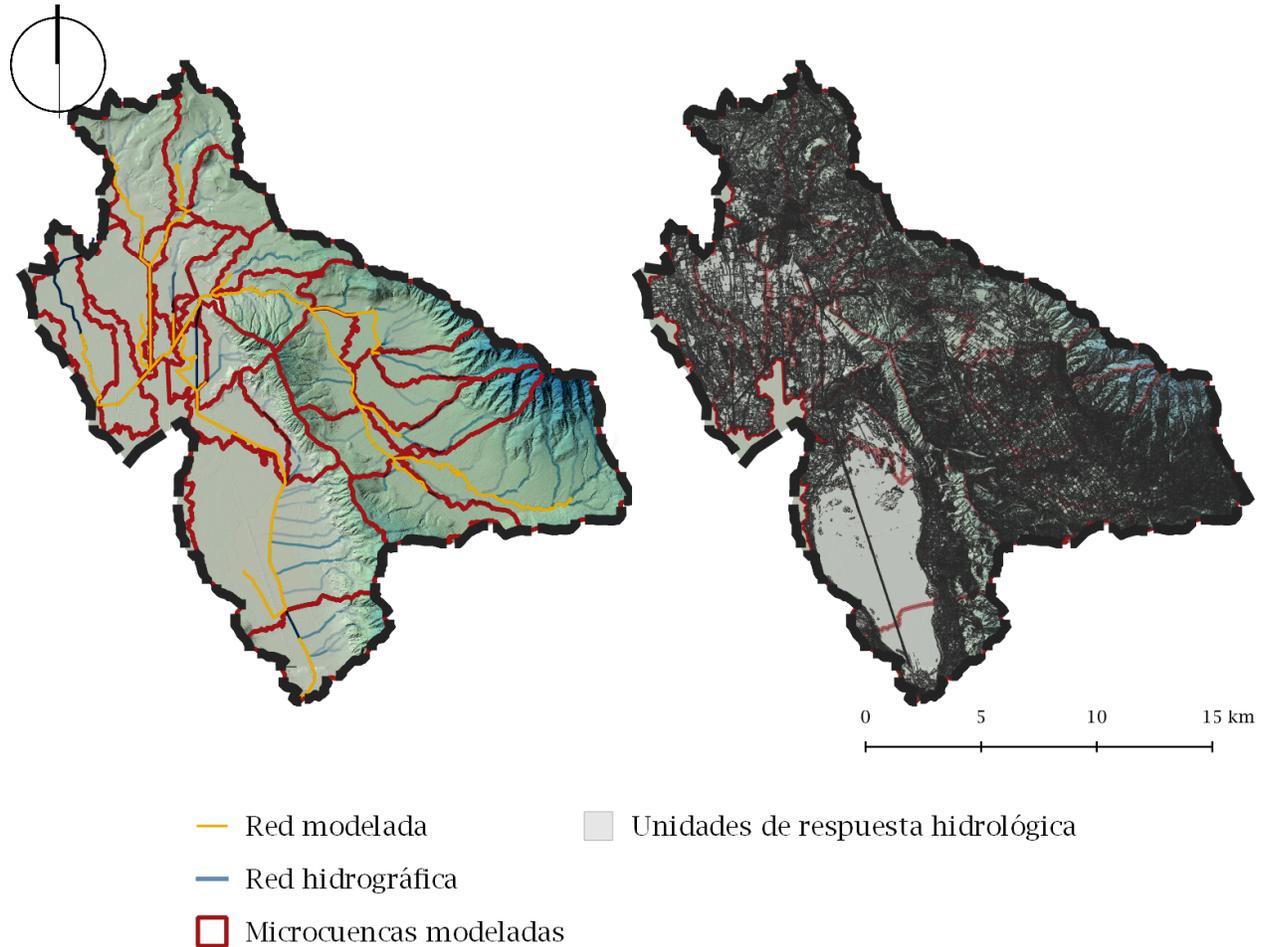
El análisis muestra que aunque el método indirecto conforme a la NOM-011-CONAGUA-2015 proporciona una estimación inicial útil del volumen de escurrimiento, la inclusión de variables adicionales son esenciales para mejorar la precisión del modelo. Para abordar esta necesidad, se realizaron modelos adicionales utilizando las metodologías del SWAT y del IBER modelador en 2D, permitiendo contrastar los resultados. Sin embargo será necesario llevar a cabo distintos procesos para poder llegar a la delimitación y demarcación de la Laguna de San Marcos.

## **Modelo hidrológico SWAT**

La metodología principal para determinar el volumen de escurrimiento en la extensión del Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial Regional Lagunas fue a través del programa SWAT, con una serie de calibraciones según los resultados obtenidos y las condiciones territoriales de las subcuencas. Para obtener un espectro similar respecto a la delimitación del área de estudio hidrológica en el presente anexo, se utilizó la misma metodología, además de algunas adicionales, para el cálculo del volumen de escurrimiento con las capas topográficas y de uso de suelo y vegetación de mayor resolución.

La simulación del modelo hidrológico se realizó mediante el programa QSWAT, en donde la primera fase constó en la delimitación de unidades hidrográficas utilizando la topografía (INEGI, 2016) e hidrografía supervisada (INEGI, 2010) sobre el área de estudio. Se establecieron las áreas de captación de la red hidrográfica de 7 km<sup>2</sup> para los canales y de 15 km<sup>2</sup> para los arroyos.

La segunda fase consistió en crear las unidades de respuesta hidrológica a través de la intersección entre la capa de uso de suelo y vegetación (NICFI), tipos de suelo (IIEG, 2016) y pendiente en el área de estudio (topografía resolución 5m INEGI, 2016).



**Mapa 7. Resultados del procesamiento inicial de datos en el programa QSWAT en el área de estudio.**

*Fuente: Elaboración propia con capas topográficas del INEGI (2016), Red hidrográfica del INEGI (2010), Uso de suelo y vegetación (NICFI) y tipo de suelos digitalizados por el IIEG (2016).*

Los datos climatológicos ingresados al modelo SWAT provienen de la base de datos del CLICOM, así como se muestra anteriormente en el mapa 4. Se utilizó la información de precipitación diaria, de temperatura máxima y mínima, durante un periodo de 25 años (1990-2014). El periodo de años se eligió según la disponibilidad de registros climatológicos en las estaciones, a través del análisis estadístico de estas. Los datos climatológicos restantes de viento, radiación solar y humedad relativa se calcularon mediante la base de datos meteorológicos globales proporcionados por el Sistema de Pronóstico Climático (CFSR, por sus siglas en inglés) (NCAR, 2017).

El último paso para comenzar a ejecutar el modelo hidrológico SWAT es establecer las condiciones para la simulación, con el fin de obtener los resultados de una manera práctica y deseada según la serie de tiempo utilizada, así como el formato ideal para su visualización.

Simulación (años)	37
Calentamiento del modelo (años)	3
Unidades de Respuesta Hidrológica	1406
Subcuencas	33
Unidad de tiempo de la simulación	Mensual
Método de la precipitación	Medida
Área total de la cuenca (ha)	3,098.02

**Tabla 3. Parámetros del modelo SWAT.**

Fuente: Elaboración propia.

La calibración de un modelo consiste en un proceso iterativo de variaciones en los parámetros de este para ajustar los resultados a las observaciones (Abbaspour, 2014). Los parámetros que pueden ser calibrados son principalmente territoriales, como del suelo, del uso de suelo y vegetación, del subsuelo, de las subcuencas, etc., y que influyen en la distribución de cantidades de agua entre los procesos hidrológicos.

En la calibración de un modelo se debe hacer un análisis de sensibilidad de los parámetros territoriales para conocer cuáles tienen mayor impacto en los resultados cuando se modifican. Para conocer qué parámetros son más sensibles se realizaron 4 iteraciones con distintos parámetros y se eligieron los que mayor sensibilidad.

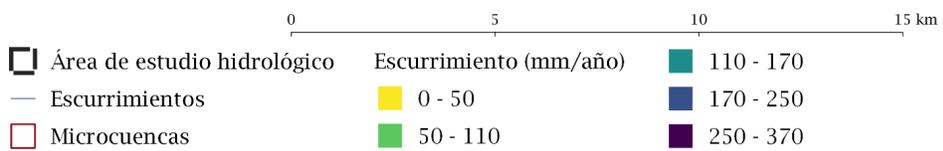
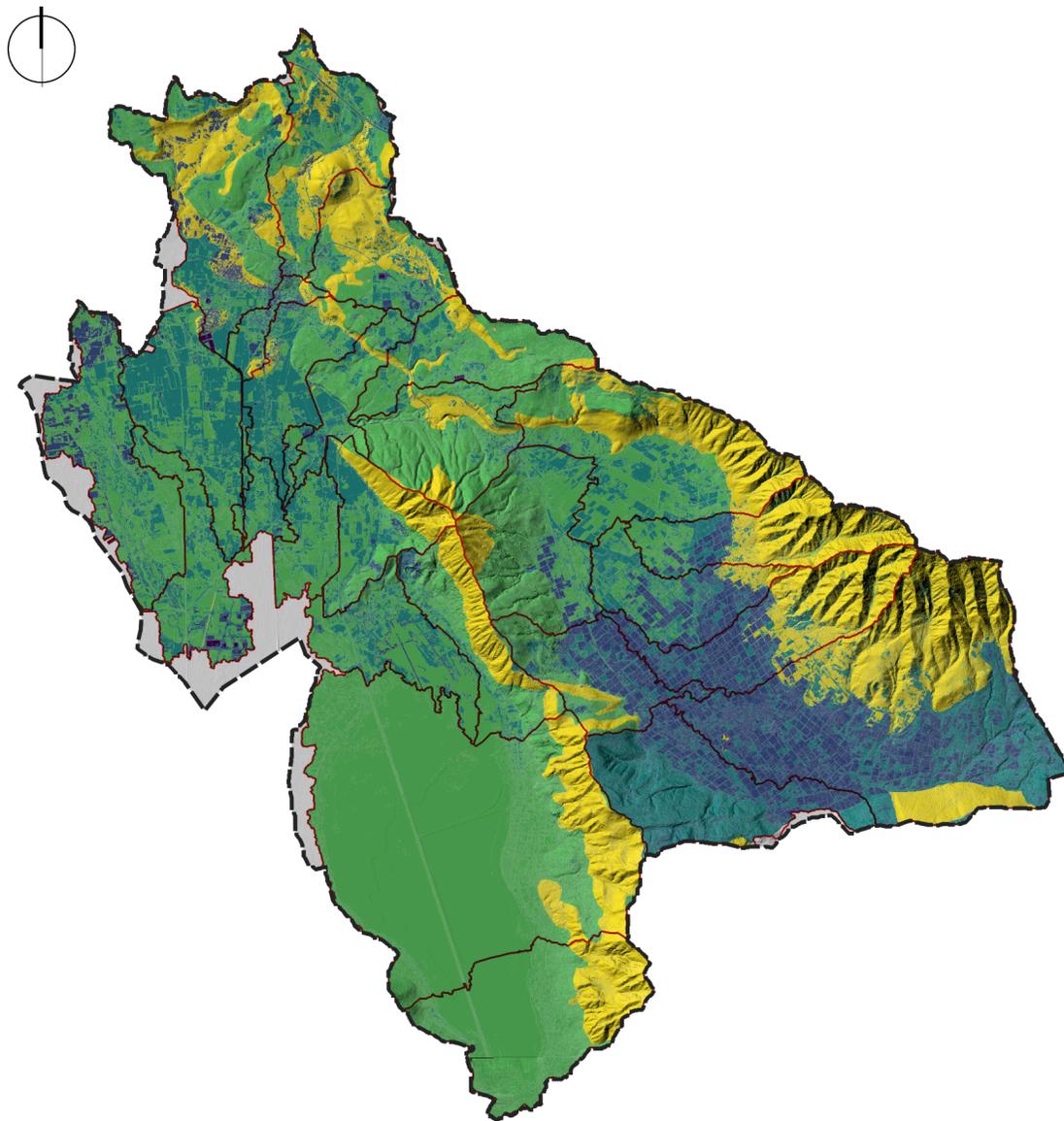
Parámetro	Descripción	Tipo de cambio	Cambio
<b>Parámetros del suelo</b>			
cn2	Número de curva de escurrimiento del SCS.	R	-35
awc	Capacidad de agua disponible en el suelo (mm H <sub>2</sub> O / mm suelo).	R	25
k	Conductividad hidráulica saturada (mm/h).	R	-35
<b>Parámetros de agua subterránea</b>			
gwflow_lte	Flujo de agua subterránea (mm)	R	20

**Tabla 4. Parámetros calibrados para el modelo SWAT.**

Fuente: Elaboración propia.

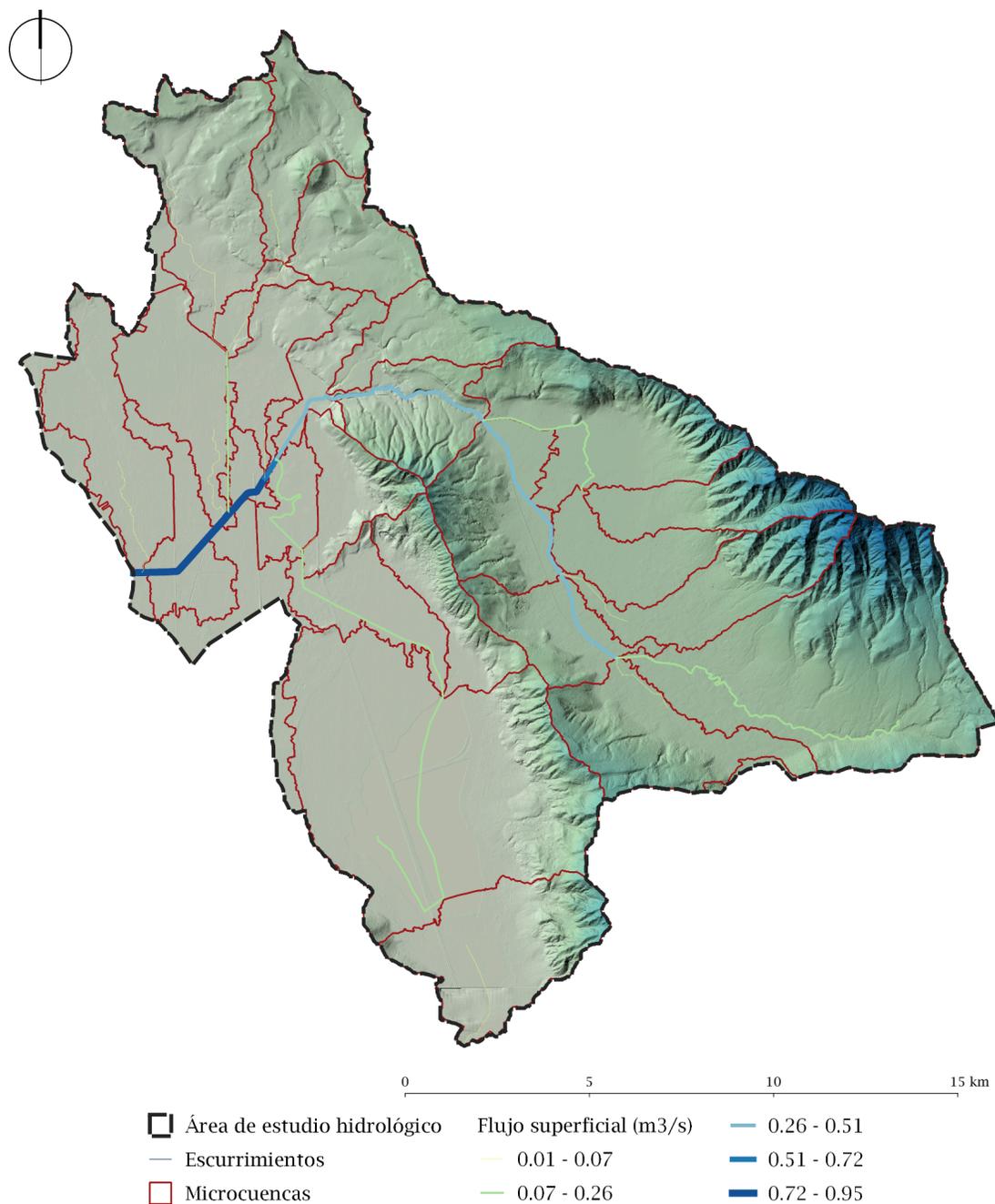
El tipo de cambio de los valores de los parámetros se realizó por cambios relativos (R) o por cambios exactos (V). Los cambios relativos consisten en la multiplicación de los valores de los parámetros por 1 más un factor del rango de parámetro dado, el cambio en porcentaje de sus valores.

Los resultados arrojados por el modelo hidrológico pueden ser representados por unidad de respuesta hidrológica, por subcuencas o microcuencas, o por los tramos de los canales modelados. El volumen de escurrimiento, al ser una variable de interés para el estudio del presente anexo, se muestra en los siguientes mapas.



**Mapa 8. Escurrimiento superficial generado por unidad de respuesta hidrológica en el área de estudio.**

*Fuente: Elaboración propia mediante la metodología SWAT.*

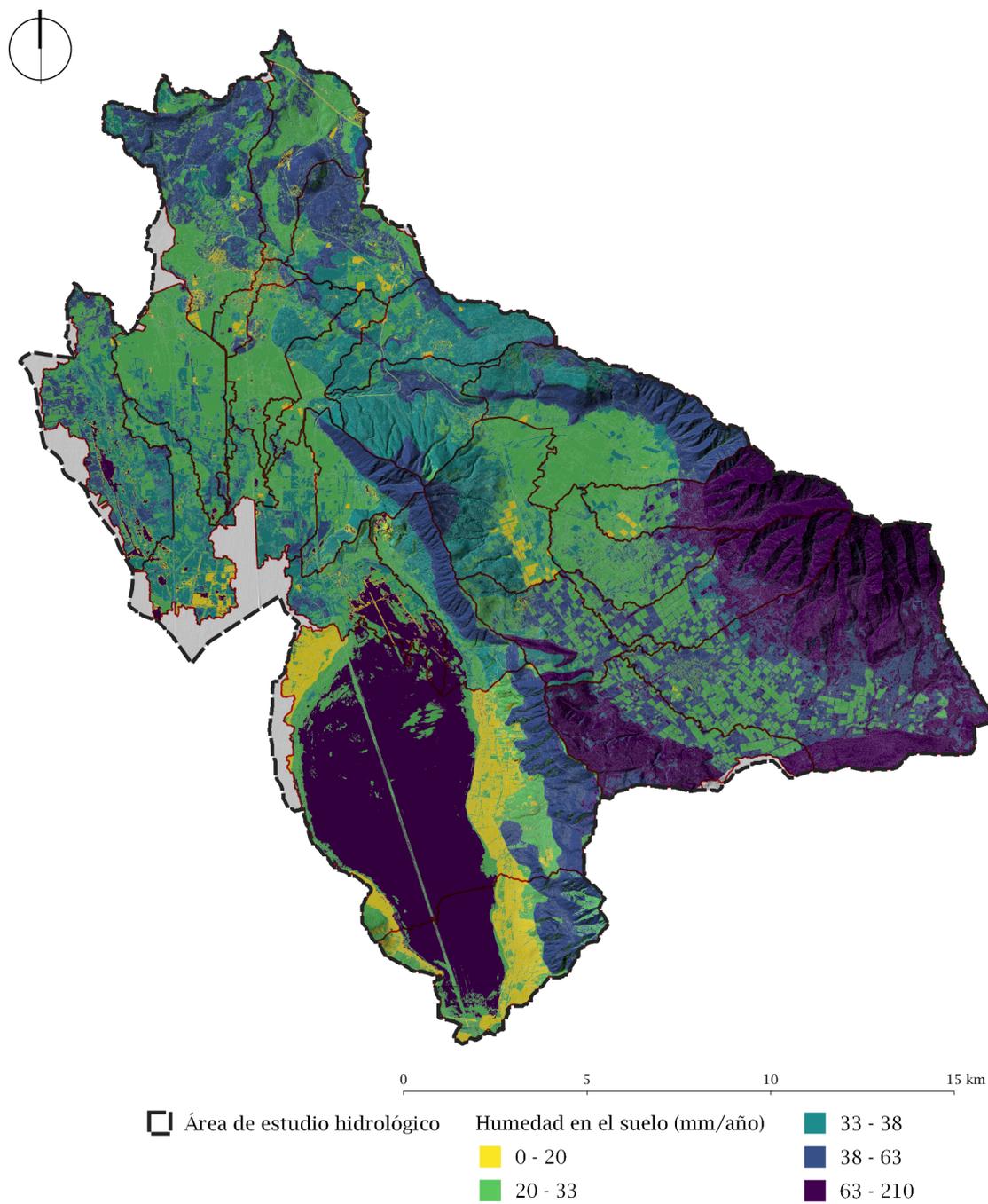


**Mapa 9. Flujo superficial promedio generado por los cauces en el área de estudio.**

*Fuente: Elaboración propia mediante la metodología SWAT.*

A partir de los resultados de los escurrimientos generados desde la parte alta de las subcuencas hasta el desfogue en la laguna de San Marcos, se puede calcular el flujo promedio anual que drena hasta esta desde los ríos tributarios a la laguna. Desde esta perspectiva, la sumatoria de los flujos que llegan hasta la laguna acumulan, en promedio, **0.31 m/s**, lo cual representa un volumen de escurrimiento acumulado anual de **9.64 hm<sup>3</sup>**.

La ecuación general del balance hidrológico permite despejar la variable de humedad en el suelo, lo que facilita la comparación del cambio en el contenido de agua almacenada durante un periodo de tiempo simulado. Esta variable es crucial para identificar condiciones de perturbación en el territorio, al considerar todos los procesos de cambio que podrían afectar la capacidad del suelo para retener agua, como el cambio de uso del suelo, la degradación y erosión, los incendios, y la impermeabilización del territorio, entre otros. Además, las alteraciones en la capacidad del suelo para retener agua pueden aumentar los escurrimientos generados, reducir el tiempo de retención y elevar los riesgos de inundación en ciertas áreas. Por tanto, es esencial preservar las zonas con alto contenido de humedad como áreas de mitigación y conservación del medio ambiente.



**Mapa 10. Contenido de humedad promedio anual en el suelo en el área de estudio.**

*Fuente: Elaboración propia mediante la metodología SWAT.*

## **Estudio hidráulico: avenidas máximas ordinarias**

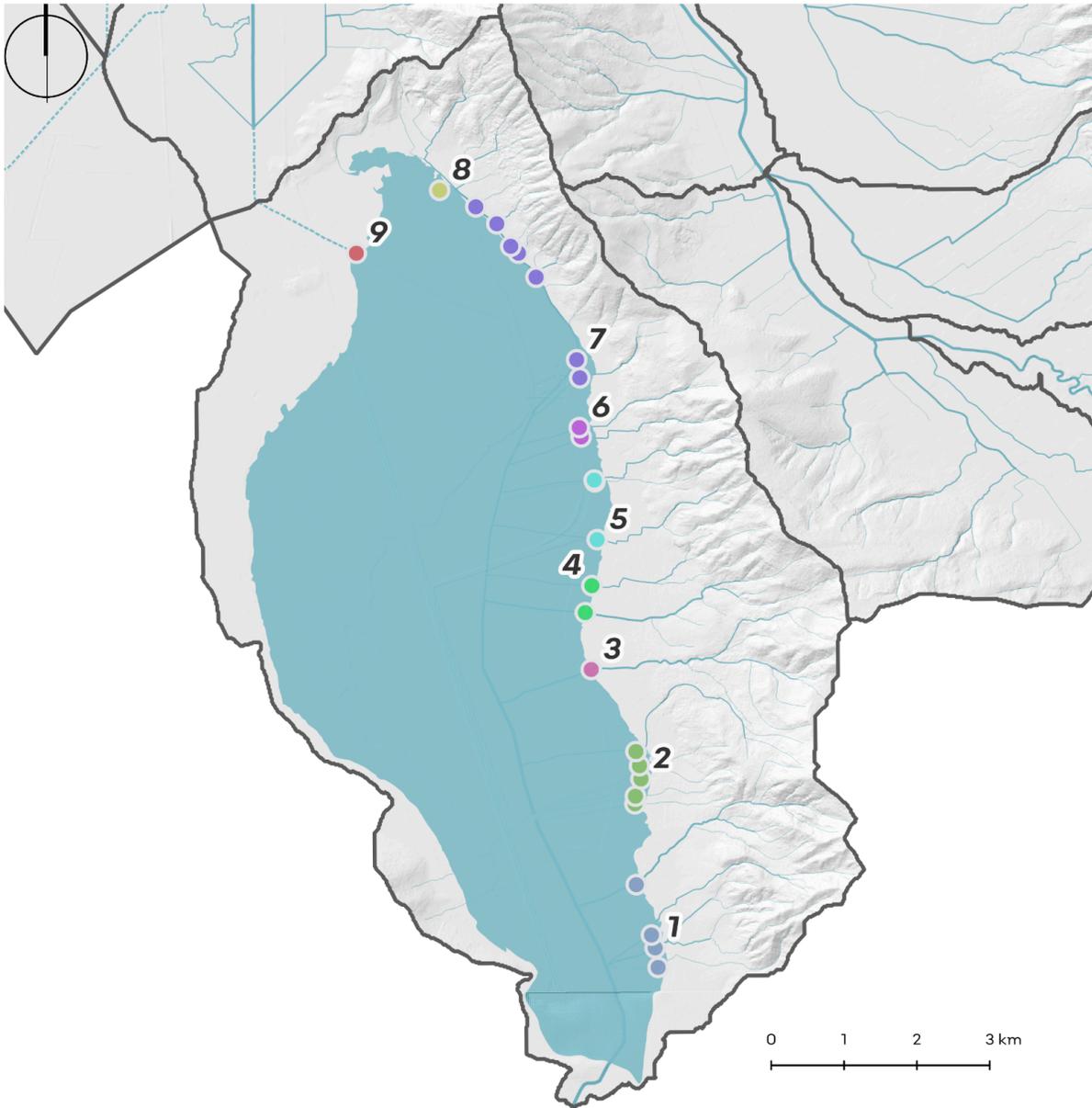
Conforme a la Ley de Aguas Nacionales (LAN), la realización de un estudio hidráulico forma parte de los insumos fundamentales para la determinación de los límites del cauce y zona federal.

Los estudios hidráulicos son el conjunto de análisis e investigaciones realizadas que permiten el conocimiento del comportamiento de los cuerpos de agua, ya que determinan las corrientes permanentes e intermitentes así como la creciente máxima sin desbordamiento y las avenidas máximas ordinarias.

Según el *“MANUAL DE PROCEDIMIENTOS EN MATERIA DE DECLARATORIAS DE AGUAS DE PROPIEDAD NACIONAL, DELIMITACIÓN DE CAUCE Y ZONA FEDERAL, ASÍ COMO SU DEMARCACIÓN Y SUPRESIÓN”*, los estudios y trabajos técnicos que conforman el archivo de la delimitación de cauce y zona federal de la Laguna de San Marcos deberán considerar el nivel de aguas máximo ordinario para y las especificaciones del cauce de una corriente, ribera o zona federal.

En el caso de la Laguna de San Marcos, debido a que no está conectada al mar, el nivel de aguas máximas ordinarias se determina considerando la corriente ocasionada por la avenida máxima ordinaria de sus fuentes alimentadoras para un periodo de retorno de 5 años.

Las fuentes aportadoras de la Laguna de Sayula se determinaron mediante la red hidrográfica que resultó de una combinación entre la red hidrográfica de INEGI y los canales del conjunto de datos vectoriales de la carta F13D75. Al unir estos vectoriales se procedió a realizar una revisión supervisada de la imagen satelital del año actual para corregir trazos y ubicar puntualmente los caudales que aportan al llenado de la Laguna de Sayula. Explicado lo anterior, se identificaron 9 fuentes puntuales de aportación a la laguna, tomando en cuenta que varias de ellas se conforman por un conjunto de escurrimientos y se seccionaron en 9 para fines de facilitar la obtención del caudal máximo ordinario de todas las aportaciones a la Laguna. Con esto en mente, se presenta en el siguiente mapa la ubicación de estas aportaciones.



- |                      |   |     |
|----------------------|---|-----|
| — Esguerrimiento     | <b>Fuente alimentadora de la Laguna de Sayula</b> | ● 5 |
| - - - Canal          | ● 1   | ● 6 |
| ■ Planicie inundable | ● 2   | ● 7 |
| □ Microcuena         | ● 3   | ● 8 |
|                      | ● 4   | ● 9 |

**Mapa 11. Fuentes alimentadoras de la Laguna de Sayula.**

*Fuente: Elaboración propia.*

Para el presente estudio se determinaron las avenidas máximas ordinarias de las fuentes aportadoras a la Laguna de Sayula para un periodo de retorno de 5 años mediante el paquete de software IBER.

IBER es una herramienta de modelación matemática para la simulación del flujo del agua en lámina libre en dos dimensiones, lo que significa que utiliza el método de volúmenes finitos que permite mayor flexibilidad en la malla para resolver ecuaciones parciales. De esa manera predice los valores de las variables hidráulicas como lo es el tirante, velocidad y caudal a través del tiempo y espacio dentro de una cuenca. Asimismo, esta herramienta está compuesta por un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos (Bladé et al., 2012). La nueva versión (v3.3.1) incluye un nuevo módulo de drenaje urbano, un avance significativo en las capacidades del módulo de hidrología, un nuevo módulo de erosión de suelos, y un nuevo módulo para el cálculo del transporte de sedimentos considerando material no uniforme (mezclas).

El módulo hidrodinámico consiste en un conjunto de ecuaciones de St. Venant en 2D que describen el movimiento de los fluidos; es decir la solución numérica de las ecuaciones de conservación de momento y de masa en un fluido. De este modo se analizan las variables que controlan el movimiento del agua y cómo la misma se verá afectada ante diferentes modificaciones (Bladé et al., 2012). Para construir y hacer uso de estos modelos hidrológicos se siguieron los tres pasos indicados en la siguiente figura.

**Figura 1. Pasos generales para realizar la cuantificación de peligro utilizando modelos hidrológicos en IBER.**



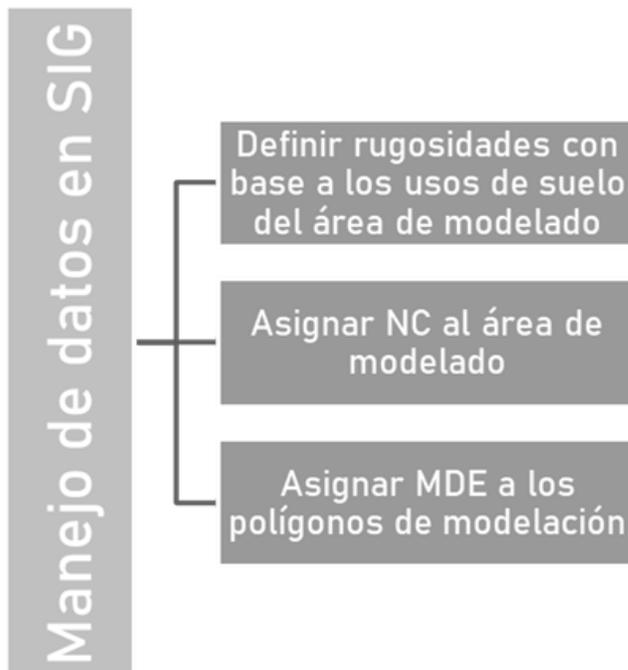
*Fuente: Elaboración propia con base en metodología del modelo IBER.*

Primero se realiza el manejo y tratamiento de capas vectoriales y ráster en el sistema de información geográfica (SIG) ArcMap. Los insumos utilizados son los siguientes:

- Modelo digital de elevación tipo terreno con 5 metros de resolución (INEGI, 2016).
- Uso de suelo y vegetación escala 1:10,000 de las microcuencas del AEH de la Laguna de Sayula.
- Cartas edafológicas 1:50,000 (IIEG, 2016)..

El manejo de datos en SIG consiste en tres etapas: asignar los valores de rugosidad con base en la cobertura de suelo y vegetación, establecer el número de curva del área de estudio conforme al tipo de suelo y construir una malla a partir del Modelo Digital de Elevación, con una delimitación del polígono de modelación.

**Figura 2. Manejo de datos en SIG previo al modelado en IBER.**



*Fuente: Elaboración propia con base en metodología del modelo IBER.*

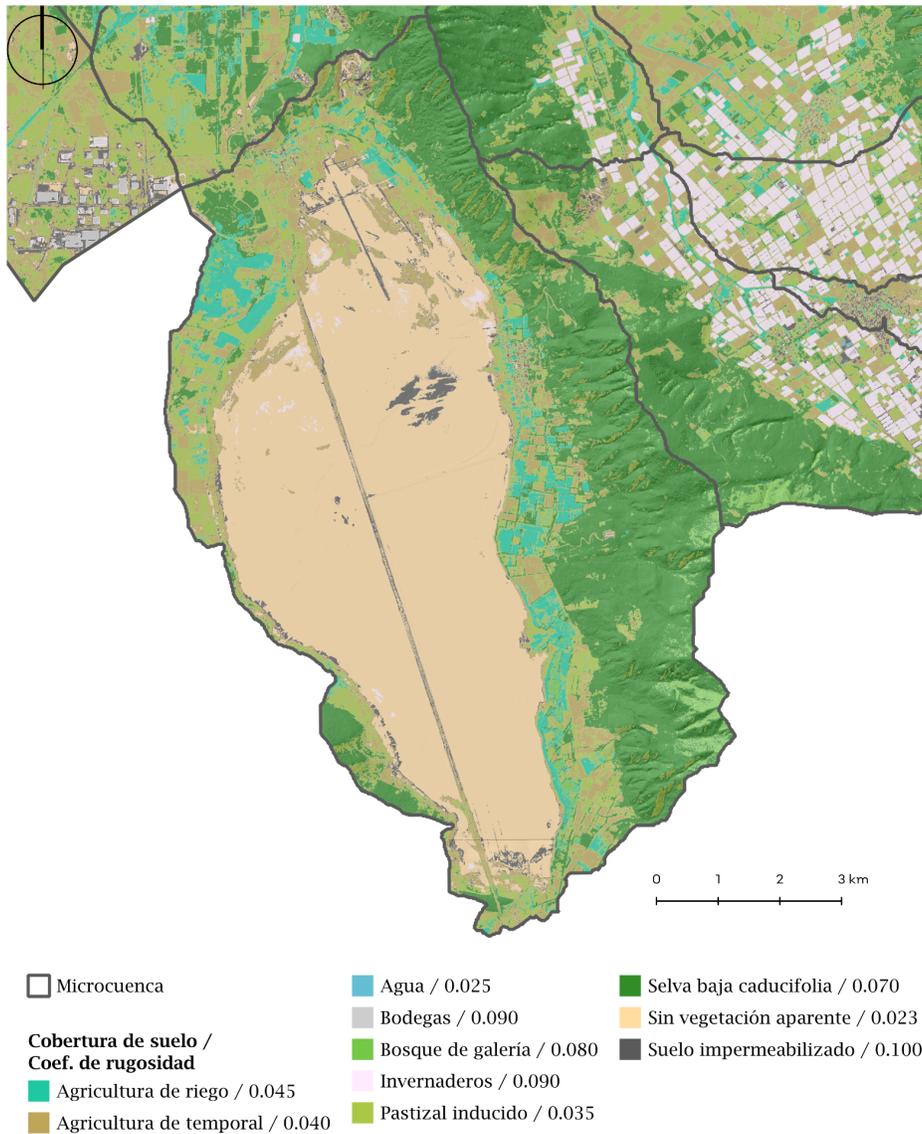
El número de curva (NC) es un parámetro hidrológico que permite cuantificar el potencial de escorrentía en una cuenca a partir de la cobertura del suelo. Cada uso de suelo tiene un NC distinto. Para asignar el NC se realizó una intersección de la capa de uso de suelo y vegetación con la capa de tipo de suelo para ligar cada uso a un Grupo Hidrológico del Suelo. Después, se asignó el NC de acuerdo con el manual “Hidrología urbana para cuencas pequeñas” (USDA-SCS, 1986). Asimismo, se determinó el coeficiente de rugosidad. El NC y el coeficiente de rugosidad están estrechamente ligados debido a que ambos se enfocan en la capacidad de infiltrar o escurrir dependiendo la cobertura de suelo. A continuación, se muestra una tabla de los NC asignados a los tipos de cobertura de suelo presentes en el área de estudio:

Cobertura de suelo	Número de Curva (NC)				Coeficiente de rugosidad de Manning
	Grupo hidrológico de suelo				
	A	B	C	D	
Agua	99	99	99	99	0.025
Sin vegetación aparente	59	69	75	82	0.023
Suelo impermeabilizado	78	88	92	94	0.1
Pastizal inducido	47	67	81	88	0.035
Agricultura de riego	67	83	88	90	0.045
Invernaderos	72	81	88	91	0.09
Agricultura de temporal	63	75	83	87	0.04
Selva baja caducifolia	45	66	77	83	0.07

Bodegas	72	81	88	91	0.09
Bosque de galería	25	55	70	77	0.08

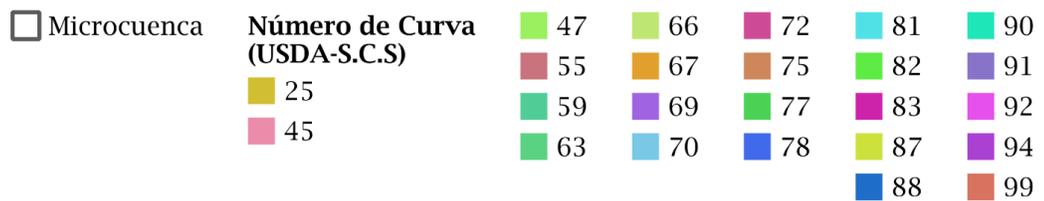
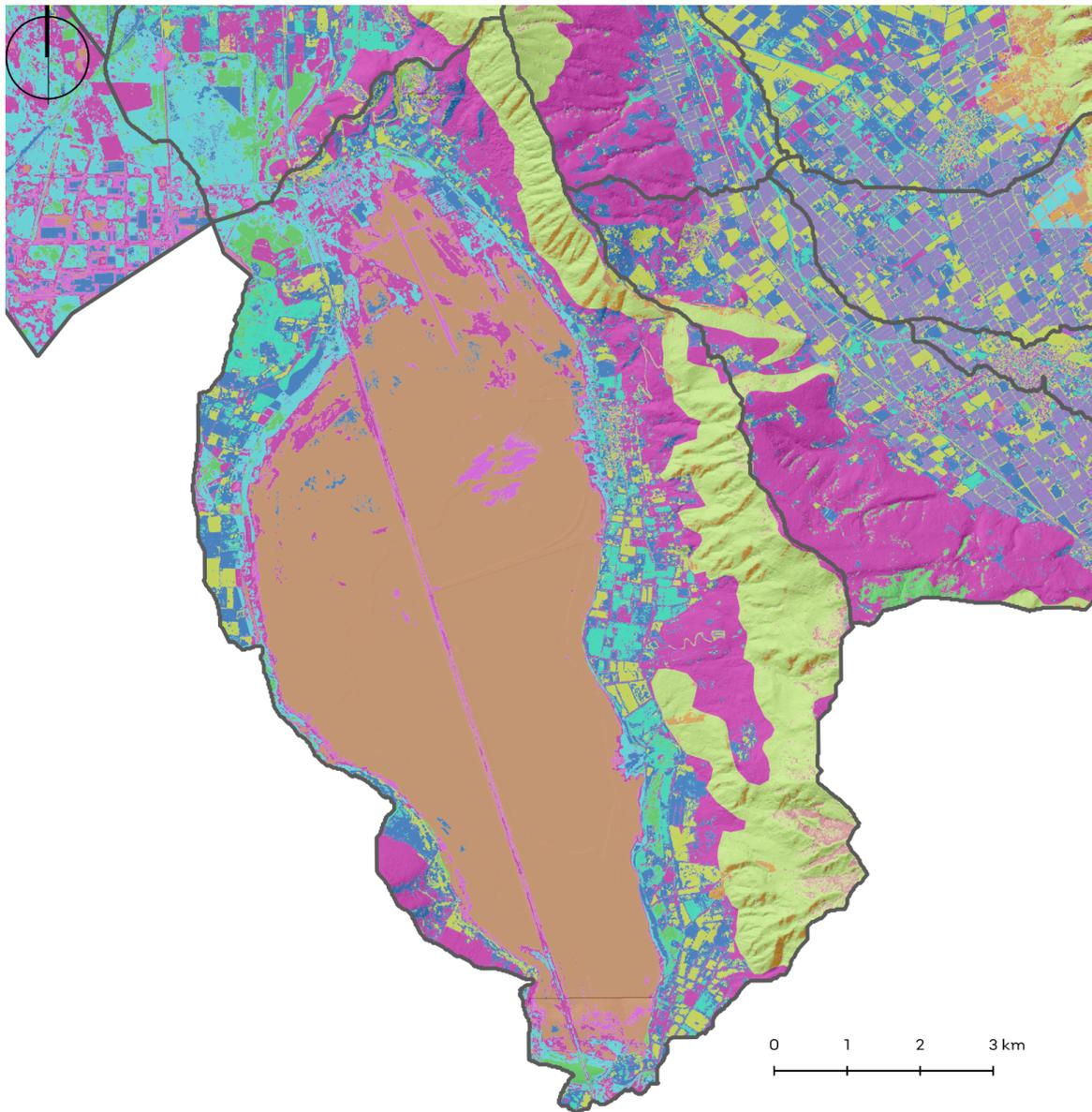
**Tabla 5. Número de curva para los tipos de cobertura de suelo en el área de estudio.**

*Fuente: Elaboración propia con valores de Número de Curva del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-SCS, 1986).*



**Mapa 12. Cobertura de suelo y su coeficiente de rugosidad en la microcuenca de la Laguna de Sayula.**

*Fuente: Elaboración propia con base en metodología del modelo IBER.*



**Mapa 13. Número de curva en la microcuenca de la Laguna de Sayula.**

*Fuente: Elaboración propia con base en metodología del modelo IBER.*

Para la delimitación de la cuenca, se utilizó un modelo digital de elevación de 5 metros de resolución al polígono del área de estudio, que fue el tamaño de las microcuencas. La realización de los modelos hidrodinámicos con un modelo digital de elevación de alta resolución permite una representación de alta confianza en cuanto a los tamaños de los cauces y sus llanuras de inundación (CENAPRED, 2011).

Una vez teniendo estos tres insumos comentados anteriormente, se exportan en formato de texto binario (ASCII) para ingresarlos al software IBER.

**Figura 3. Preproceso del modelo hidrodinámico en IBER.**



*Fuente: Elaboración propia con base en metodología del modelo IBER.*

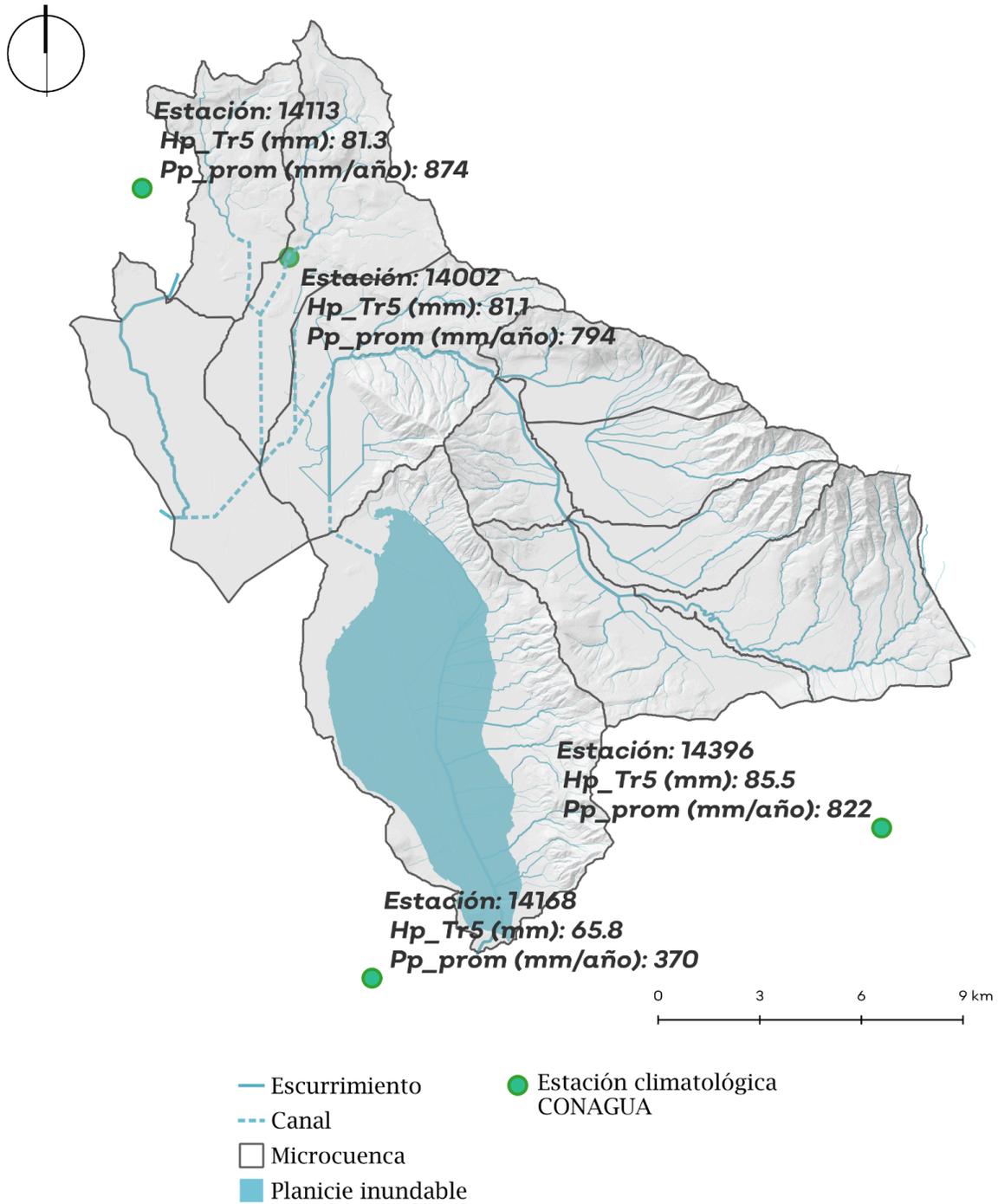
En primer lugar, se importó el MDE que se hizo anteriormente, de manera que en IBER se creó un nuevo archivo RTIN, en el cual se exportó el archivo ASCII del MDE que abarca las microcuencas. Se utilizó una tolerancia de 0.2 metros, lado de máximo de 50 metros y un lado mínimo de 1 metro.

A continuación, se asignaron las condiciones iniciales. Se utilizó un valor de 0 m de profundidad de agua en todas las zonas de modelación. Enseguida se agregaron las condiciones de contorno, es decir, los lugares de salida de los escurrimientos. Las salidas asignadas fueron seleccionadas a partir del punto de menor elevación de las microcuencas. En este caso, las zonas de menor altitud en el AEH son la Laguna de Sayula y el borde del polígono de AEH que colinda con la laguna de Atotonilco. Para el primer caso, no se asigna ninguna condición de salida debido a que la Laguna de Sayula se encuentra dentro del polígono del AEH. En el segundo caso, se asigna una salida al contorno del polígono que colinda con la Laguna de Atotonilco para representar la salida del escurrimiento hacia esa laguna como sucede en realidad.

El coeficiente de rugosidad, al igual que el número de curva, se asignaron importando sus respectivos archivos ASCII para asignar de manera automática los valores de estas dos variables a cada tipo de cobertura de suelo. IBER (versión 3.3.1) cuenta con una base de datos de coberturas de suelo ligadas a un coeficiente de rugosidad de manning de la cual se toman

las coberturas que más homologan la capa de uso de suelo con alta resolución construida para el AEH.

La entrada de lluvia en el modelo se realizó por medio de la inclusión de hietogramas de *lluvias diseño* para el área de estudio hidrológico. Estos hietogramas se construyen a partir de la intensidad de lluvia asociada al periodo de retorno de 5 años en el AEH (Ver siguiente mapa). Para calcular la intensidad de lluvia espacialmente sobre la superficie del AEH, primero se obtuvo la lámina de lluvia a 24 horas para cada una de las estaciones identificadas con mínimo 20 años de datos de registros de precipitación acumulada diaria.



**Mapa 14. Estaciones climatológicas utilizadas en el modelo hidráulico de la Laguna de Sayula.**

*Fuente: Elaboración propia con base en metodología del modelo IBER.*

Se identificó el valor de la precipitación acumulada en 24 horas asociada a un periodo de retorno de 5 años para cada estación con la ayuda del software VELL. En el mapa anterior no se alcanza a notar pero se utilizaron un total de 6 estaciones para caracterizar la intensidad de la lluvia en el AEH:

Clave	Nombre	Precipitación promedio anual (mm/año)	Precipitación acumulada en 24 hrs - Hp Tr5 (mm)
14002	Acatlán de Juárez	794	81.1
14009	Ameca	824	78.3
14016	Atequiza	834	83.1
14113	Presa Hurtado	874	81.3
14168	Zacoalco De Torres	370	65.8
14396	Piedra Barrenada	822	85.5

**Tabla 6. Datos de precipitación promedio anual y precipitación acumulada en 24 horas para un periodo de retorno de 5 años.**

*Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA y VELL.*

Se determinó el tiempo de concentración de la microcuenca de la Laguna de Sayula utilizando las distintas fórmulas de cálculo, tomando en cuenta la pendiente media de la microcuenca, el desnivel altitudinal, la longitud del cauce más largo y el área de la microcuenca:

<b>Tc (Kiprich)</b>	1.17	hrs
<b>Tc (Temez)</b>	3.58	hrs
<b>Tc (California Highway &amp; Public Works)</b>	1.7	hrs
<b>Tc (Bransby)</b>	3.73	hrs
<b>Tc (Passini)</b>	2.15	hrs
<b>Tc (Giandotti)</b>	2.45	hrs

**Tabla 7. Tiempos de concentración calculados para la microcuenca de la Laguna de Sayula.**

*Fuente: Elaboración propia.*

Tomando en cuenta que el tiempo de concentración calculado utilizando distintas fórmulas varía entre 1.17 horas y 3.73 horas, se establecen las lluvias diseño con duración de 1 hora, tomando en cuenta que el tiempo de simulación del modelo de escurrimiento sea de 4 horas, un poco más de tiempo sobrado a partir del tiempo de concentración más retardado.

A partir de lo explicado anteriormente, se transforma la precipitación acumulada en 24 horas de cada estación asociada a un periodo de retorno de 5 años a hietogramas de una lluvia diseño de 1 hora. Esto se realiza mediante el método de bloques alternos de Chow et al. 1994. A continuación se presentan los hietogramas para las 6 estaciones utilizadas en el análisis:

Tiempo (segundos)	Intensidad de lluvia (mm/h)
0	0
360	104.001866
720	139.482782
1080	210.444614
1440	142.006939
1800	107.788102
2160	40.8840617
2520	32.6215976
2880	16.0966695
3240	10.2886807
3600	7.38468631

**Tabla 8. Hietograma de una lluvia de diseño de una hora asociada a un periodo de retorno de 5 años para la estación 14002.**

*Fuente: Elaboración propia con información de VELL.*

Tiempo (segundos)	Intensidad de lluvia (mm/h)
0	0
360	100.411173
720	134.667101
1080	203.178956
1440	137.10411
1800	104.066688
2160	39.4725281
2520	31.4953279
2880	15.5409275
3240	9.93346116
3600	7.12972797

**Tabla 9. Hietograma de una lluvia de diseño de una hora asociada a un periodo de retorno de 5 años para la estación 14009.**

*Fuente: Elaboración propia con información de VELL.*

<b>Tiempo (segundos)</b>	<b>Intensidad de lluvia (mm/h)</b>
0	0
360	106.566647
720	142.922555
1080	215.634371
1440	145.50896
1800	110.446255
2160	41.8923
2520	33.426076
2880	16.4936281
3240	10.542409
3600	7.56679941

**Tabla 10. Hietograma de una lluvia de diseño de una hora asociada a un periodo de retorno de 5 años para la estación 14016.**

*Fuente: Elaboración propia con información de VELL.*

<b>Tiempo (segundos)</b>	<b>Intensidad de lluvia (mm/h)</b>
0	0
360	84.3812923
720	113.168521
1080	170.742979
1440	115.216481
1800	87.4532318
2160	33.171039
2520	26.4673382
2880	13.0599366
3240	8.34765957
3600	5.99152107

**Tabla 11. Hietograma de una lluvia de diseño de una hora asociada a un periodo de retorno de 5 años para la estación 14168.**

*Fuente: Elaboración propia con información de VELL.*

<b>Tiempo (segundos)</b>	<b>Intensidad de lluvia (mm/h)</b>
0	0
360	104.258344
720	139.82676
1080	210.96359
1440	142.357141
1800	108.053917
2160	40.9848855
2520	32.7020455
2880	16.1363654
3240	10.3140535
3600	7.40289762

**Tabla 12. Hietograma de una lluvia de diseño de una hora asociada a un periodo de retorno de 5 años para la estación 14113.**

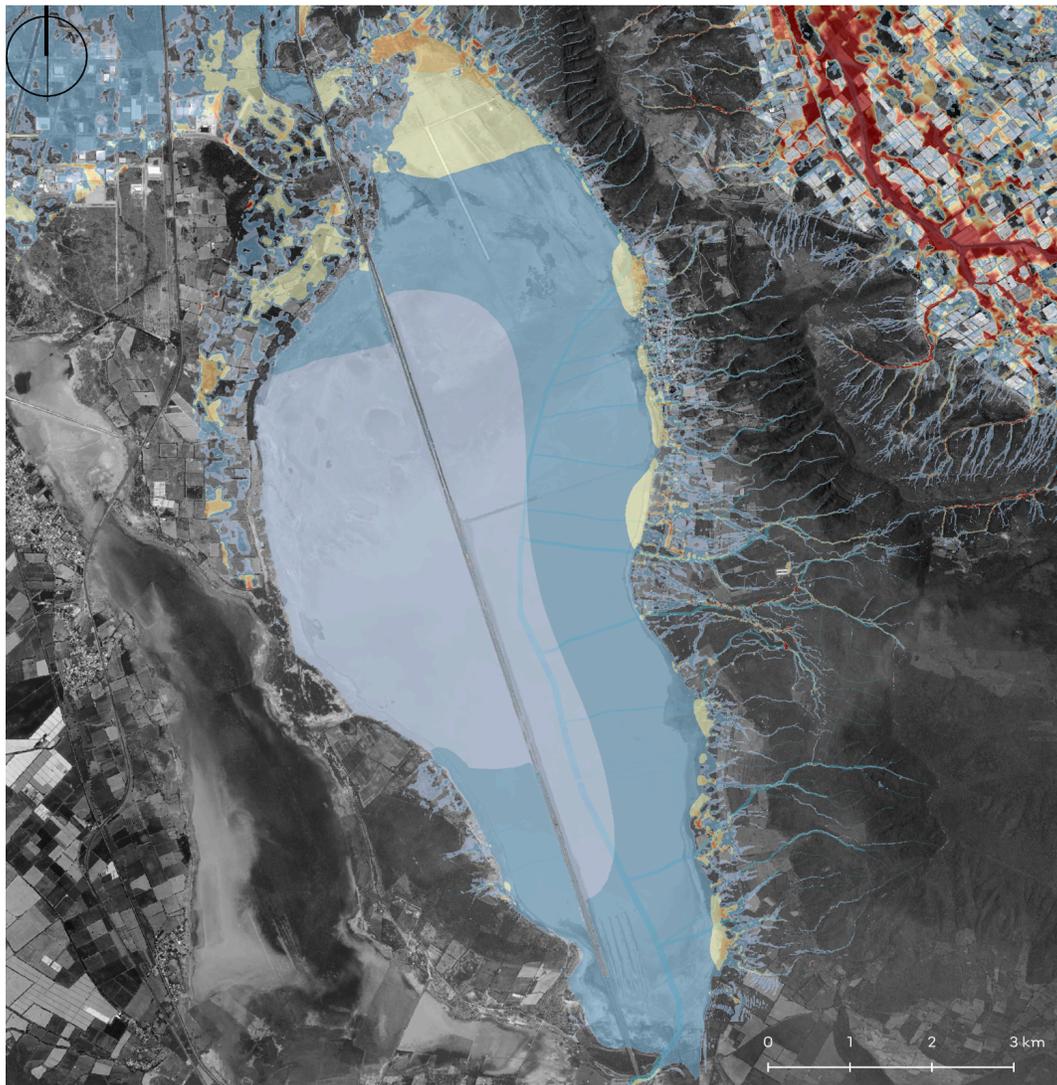
*Fuente: Elaboración propia con información de VELL.*

<b>Tiempo (segundos)</b>	<b>Intensidad de lluvia (mm/h)</b>
0	0
360	109.644384
720	147.050282
1080	221.862078
1440	149.711385
1800	113.636038
2160	43.1021859
2520	34.39145
2880	16.9699784
3240	10.8468829
3600	7.78533513

**Tabla 13. Hietograma de una lluvia de diseño de una hora asociada a un periodo de retorno de 5 años para la estación 14396.**

*Fuente: Elaboración propia con información de VELL.*

Por último, se asignó tiempo inicial (0 segundos) y el tiempo máximo de simulación (14400 segundos), con un intervalo de tiempo de 300 segundos, tomando en cuenta la suma de la duración de la tormenta y el tiempo de concentración de la microcuenca; se corrió el cálculo del modelo, y se seleccionaron los siguientes resultados a visualizar al terminar las 4 horas de simulación: tirante, velocidad y caudal específico.

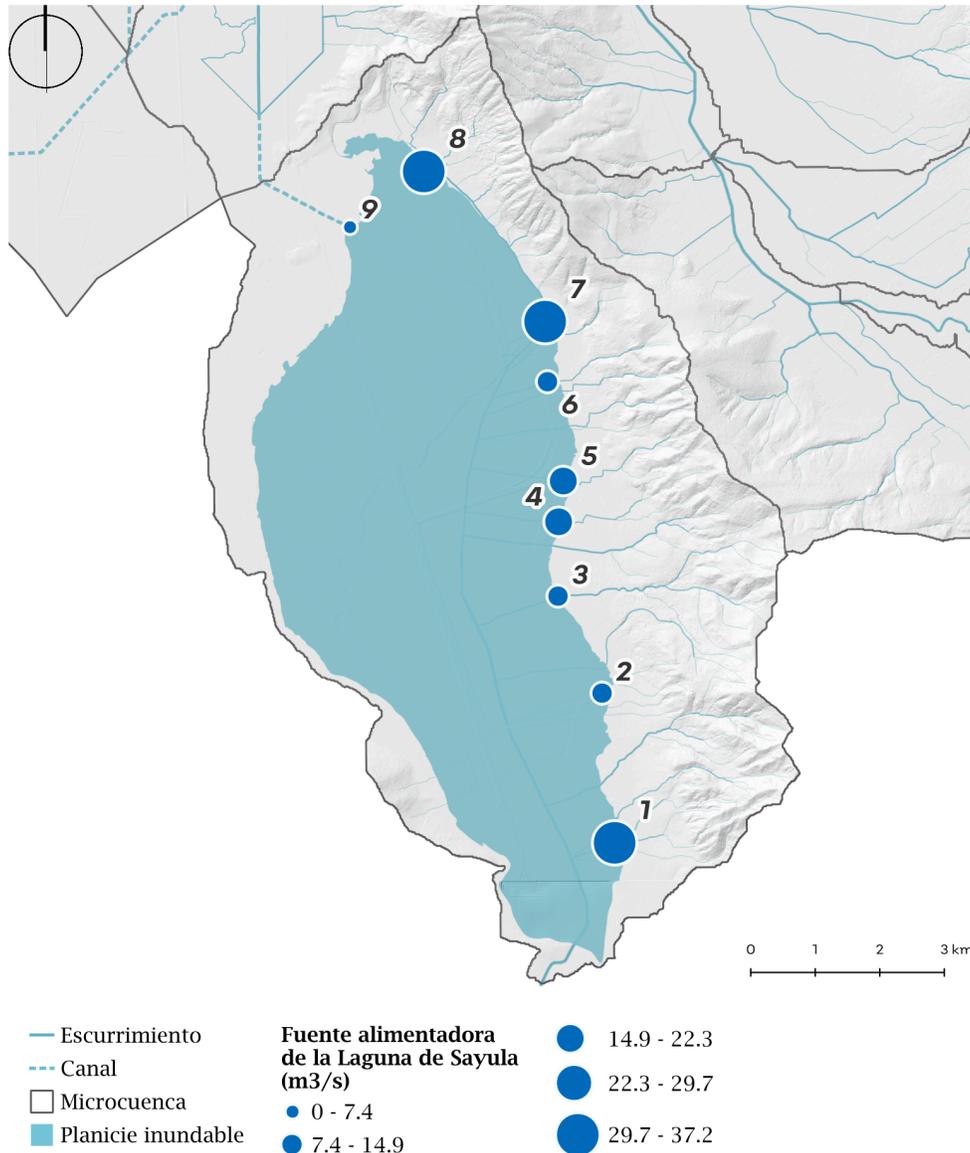


--- Canal	<b>Altura de lámina de escurrimiento (m)</b>	0.10 - 0.15 (m)	0.30 - 0.35 (m)
— Escorrimento		0.03 - 0.05 (m)	0.35 - 0.40 (m)
		0.05 - 0.10 (m)	0.40 - 0.45 (m)
		0.15 - 0.20 (m)	0.45 - 0.50 (m)
		0.20 - 0.25 (m)	> 0.50 (m)
		0.25 - 0.30 (m)	

**Mapa 15. Altura de lámina de escurrimiento asociada a una tormenta con periodo de retorno de 5 años.**

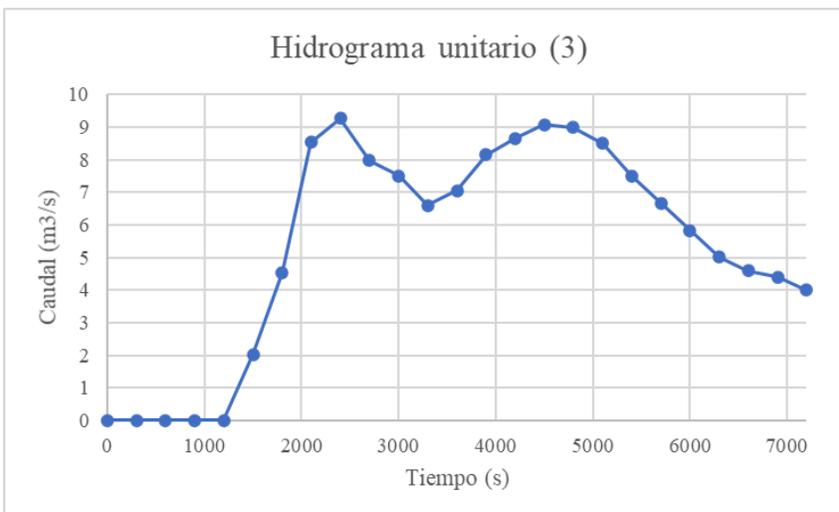
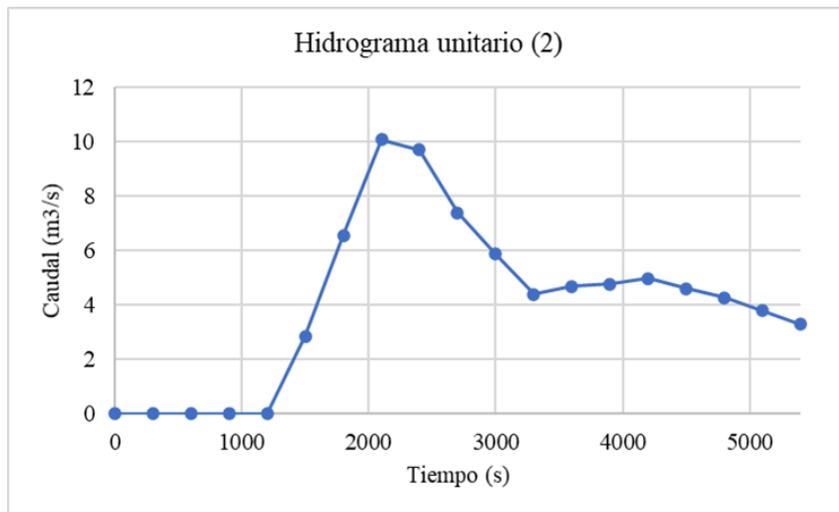
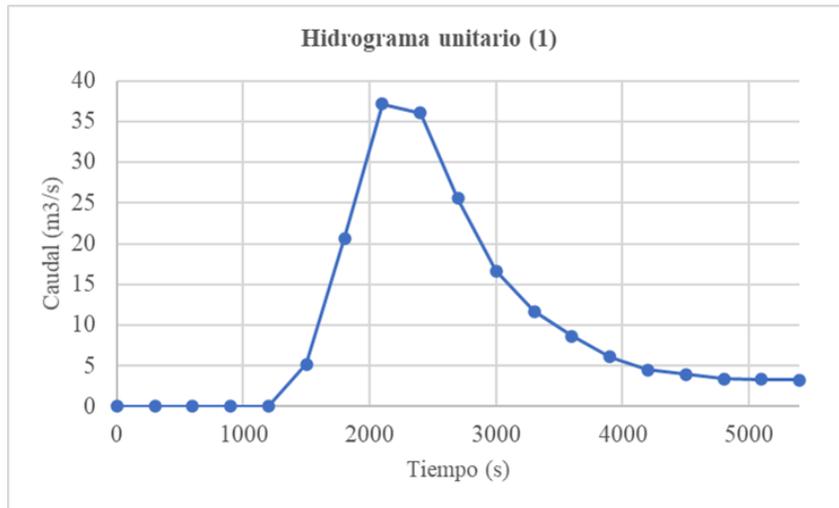
*Fuente: Elaboración propia con base en metodología del modelo IBER.*

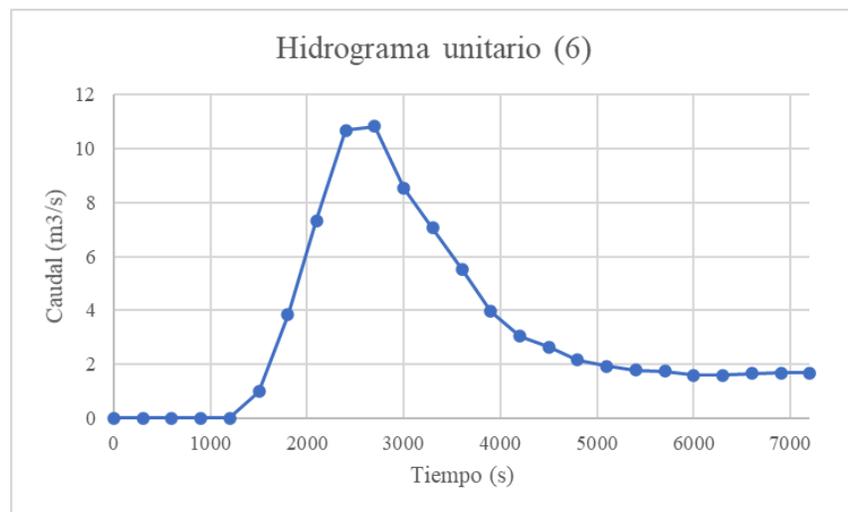
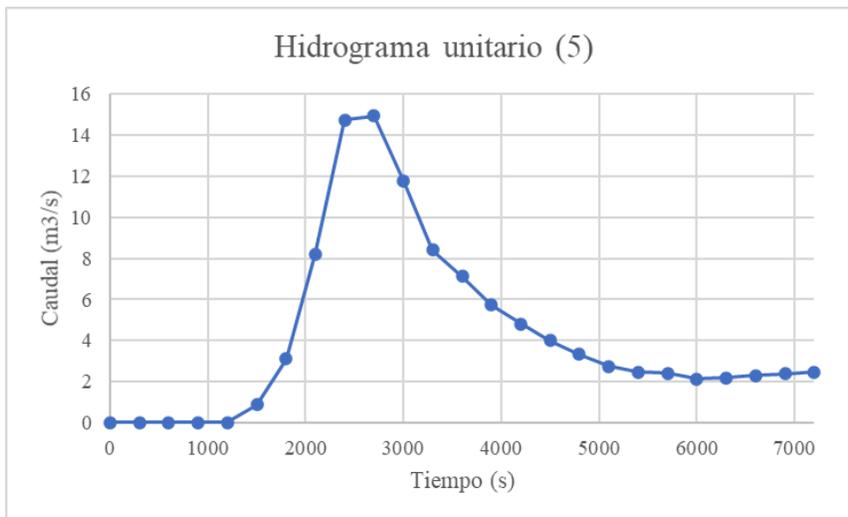
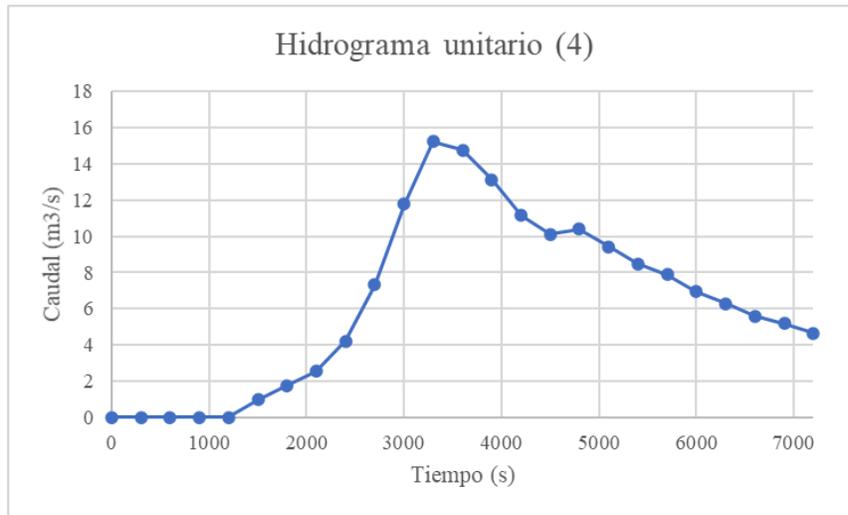
En el mapa anterior se presenta el resultado de la altura de la lámina de escurrimiento tras 4 horas desde el inicio de una tormenta de 1 hora asociada a un periodo de retorno de 5 años. Se observa que en toda la superficie de la Laguna de Sayula se genera una planicie de inundación de una lámina de agua que va desde los 3 centímetros hasta los 25 centímetros en las partes de la Laguna cercanas a la localidad de Los Pozos. Los hidrogramas unitarios de las 9 fuentes de alimentación de la Laguna de Sayula se muestran a continuación. Estos representan el volumen que le llega a la Laguna en una avenida máxima ordinaria asociada a un periodo de retorno de 5 años.

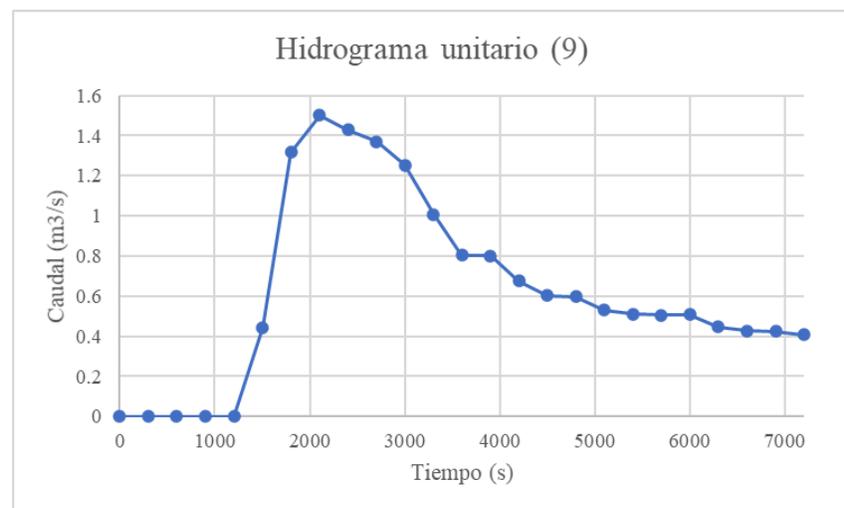
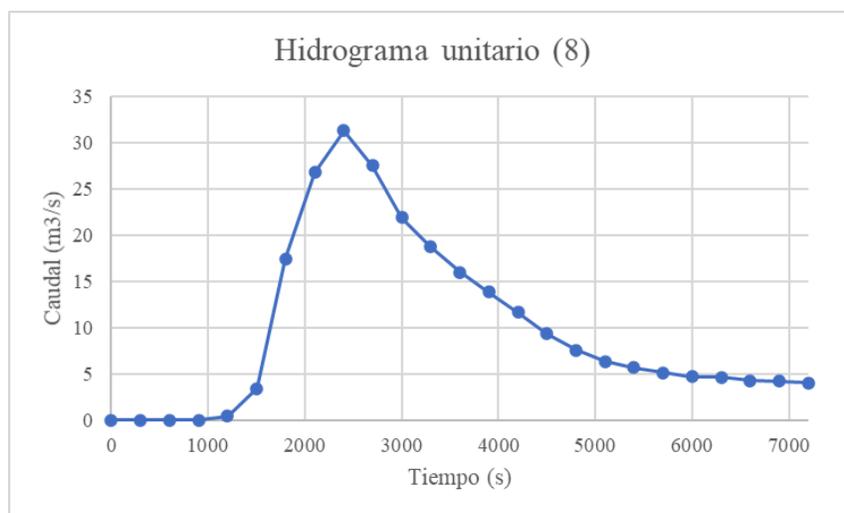
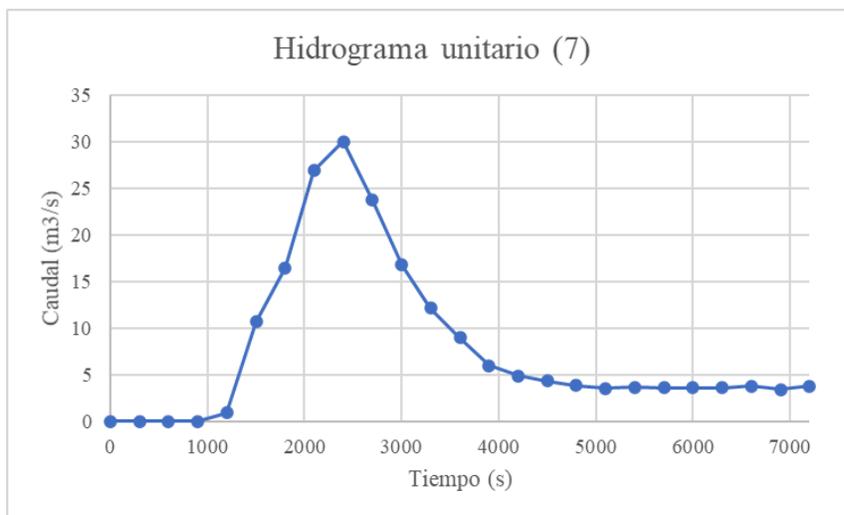


**Mapa 16. Avenidas máximas ordinarias asociadas a un periodo de retorno de 5 años de las fuentes alimentadoras de la Laguna de Sayula.**

*Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo IBER.*







**Figura 4. Hidrogramas de las avenidas máximas ordinarias asociadas a un periodo de retorno de 5 años de las fuentes alimentadoras de la Laguna de Sayula.**

*Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo IBER.*

## Polígono de actuación

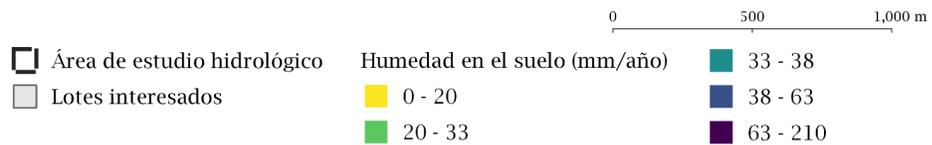
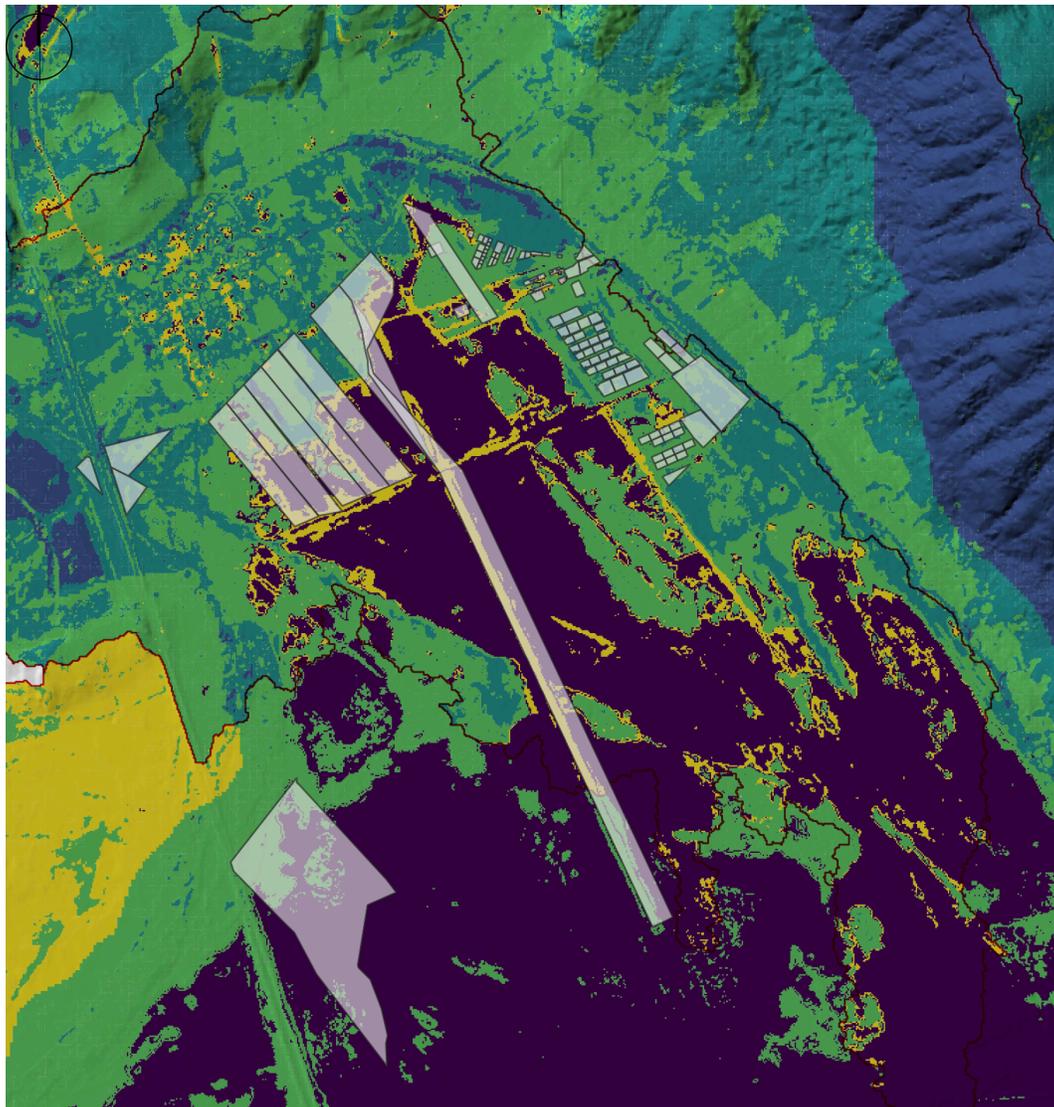
Un polígono de actuación se refiere a un área específica del territorio, conformada por uno o más predios, designada a solicitud de la autoridad responsable o de particulares. Esta superficie se define para la ejecución de proyectos urbanos, facilitando la relotificación y la reubicación de usos de suelo y destinos. Un polígono de actuación busca dar una explicación sintética y concisa de las acciones específicas que se pretenden realizar en el predio. Además de distinguir si se llevará a cabo un Plan Parcial de Desarrollo Urbano, un Proyecto Definitivo de Urbanización o un Plan Especial.

En las inmediaciones de la localidad de San José de los Pozos, al norte de la Laguna de San Marcos y alrededor del límite municipal entre Acatlán de Juárez y Zacoalco de Torres, existen intereses por parte de particulares de urbanizar la zona, para esto deberán de seguirse los procesos de desincorporación de bienes federales debido a que se encuentran potencialmente dentro de una zona federal. En el proceso de consulta pública del Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial Regional Lagunas, se ingresó una serie de observaciones, anexando la ubicación de los lotes de interés, que buscan el desarrollo de acciones urbanísticas.

Se realizó un análisis para determinar la extensión de las áreas de infiltración e inundación, con base en estos resultados, se propone una delimitación para un polígono de actuación. El cual, una vez desincorporados los lotes y predios de los interesados, deberá incluir manifiesto de impacto ambiental y análisis de riesgos para evitar cualquier tipo de afectación a los habitantes y al medio ambiente.

Los resultados del análisis de inundación que se muestran en el mapa 14 señalan que existe una alta probabilidad de inundación a una altura de lámina de 0.10 a 0.15 m de agua, con un periodo de retorno de 5 años, en el área de los predios de interés. Debido a esto, es fundamental que en cualquier proyecto de urbanización se realicen estudios de impacto, específicamente sobre desastres hidrometeorológicos para poder prevenir cualquier desastre de esta índole.

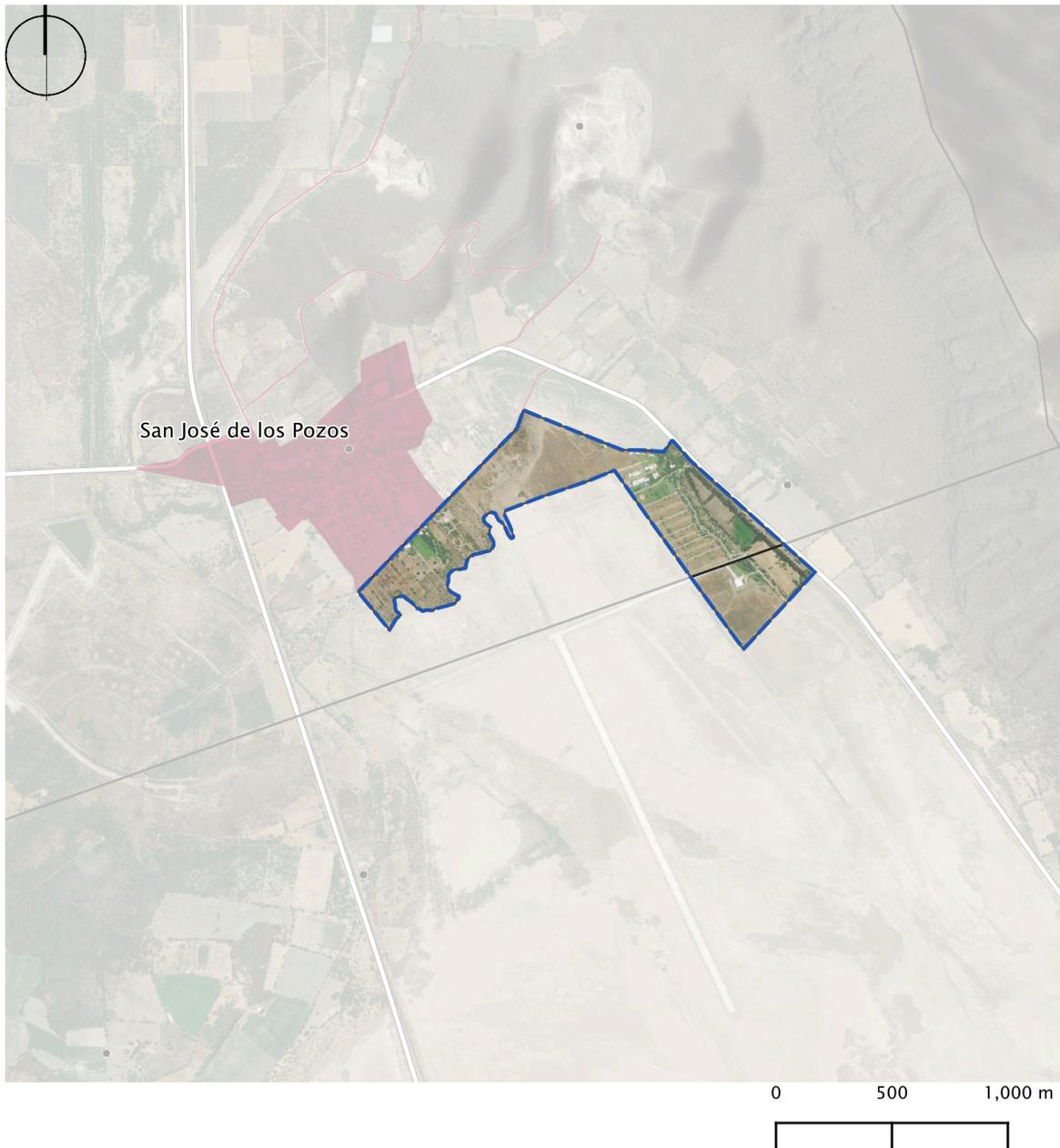
Para construir la propuesta de polígono de actuación que considera las variables ambientales e hidrológicas necesarias, se utilizaron los resultados de los modelos hidrológicos previamente realizados. El estudio de avenidas máximas en la zona identificó toda la extensión de la laguna y gran parte de los predios de interés como áreas inundables. En el modelo hidrológico SWAT, se incorporaron algunas variables ambientales simuladas para analizar las dinámicas hidrológicas específicamente en torno a los predios de interés. Una de las principales variables empleadas para su delimitación fue el contenido de humedad en el suelo, dada su importancia ambiental previamente mencionada.



**Mapa 17. Contenido de humedad promedio anual en el suelo alrededor de los predios de interés.**

*Fuente: Elaboración propia mediante la metodología SWAT.*

La comparación entre la ubicación de los predios de los interesados que emitieron sus observaciones en el proceso de consulta pública y las variables ambientales e hidrológicas permitieron delimitar la propuesta para el polígono de actuación, tomando en cuenta una serie de factores para su ejecución



 Polígono de actuación

 Límite municipal

 Localidad rural

**Red vial**

 Carreteras

 Caminos secundarios

**Mapa 18. Polígono de actuación para los predios de interés.**

*Fuente: Elaboración propia.*

Para formular la instrumentación que habilite la urbanización de lotes dentro del polígono de actuación, es fundamental ir más allá de las simples variables hidrológicas, como la humedad del suelo y la capacidad de inundación. Es necesario llevar a cabo estudios territoriales exhaustivos, como estudios topográficos y de mecánica de suelos, que aborden otros factores ambientales y urbanísticos clave para garantizar un desarrollo sostenible y adecuado. Asimismo, es imprescindible asegurar la desincorporación previa de bienes federales, ya que algunos lotes podrían encontrarse dentro de estas, lo que exige una gestión legal rigurosa y conforme a la normativa vigente para proceder con su urbanización.

## Delimitación de una zona federal

Para llevar a cabo la delimitación y demarcación de la laguna, se debe seguir un procedimiento detallado que involucra diversos procesos técnicos y legales. Los pasos son descritos a partir del manual de procedimientos en materia de declaratorias de aguas de propiedad nacional, delimitación de cauce y zona federal, así como su demarcación y supresión.

No.	Unidad responsable de ejecución	Actividad	Tiempo probable* de ejecución (Días hábiles)
1		Inicio	
1.1		Realiza trabajos de delimitación.	81
1.2	ST o DT o SGT o Particulares	Elabora planos y memoria técnica. En caso de ser elaborado por particulares, la DL u OC correspondiente o en su caso la SGT, reciben el expediente técnico.	79
2	ST o DT	Integra y remite el expediente a la DT o GASIR, según corresponda. En caso de que sea elaborado por la SGT o se presente por un particular ante ésta, remite el expediente a la DL u OC para recabar firmas.	8
3	DT	Revisa el expediente; si encuentra errores, lo remite a la actividad 1.2, si está de acuerdo lo envía a GASIR.	15
3.1	DT	Revisa el expediente; si encuentra errores, lo remite a la actividad 3.1; si está de acuerdo lo envía a la ST o DT para su firma.	15
3.2	GASIR / SGT	Firma los planos y los remite a la ST o DT para que sean resguardados y escaneados. En caso de que hayan sido elaborados por la SGT, ésta escanea, resguarda originales y remite archivo digital a la DL u OC correspondiente y pasa al 7.0.	15
4	DL u OC	Firma planos y memoria técnica; y se remiten a la GASIR.	15
5	GASIR / SGT	Escanea los planos y envía archivo digital a GASIR.	5
6	ST o DT	Determina el padrón de colindantes con el proyecto de zona federal.	15
7	ST o DT	Realiza trabajos de delimitación.	30

**Tabla 14. Proceso para la delimitación de cauce y zona federal.**

Fuente: CONAGUA (2017).

Donde:

La ST (Subdirección Técnica)

DT (Dirección Técnica)

INDAABIN (Instituto Nacional de Administración y Avalúos de Bienes Nacionales)

GASIR (Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos)

GPA (Gerencia de Planeación y Administración)

SGJ (Subdirección General Jurídica)

El paso inicial para comenzar con el proceso de la delimitación de una zona federal consta de generar una solicitud por parte de los interesados y presentarla ante la CONAGUA. Dicha autoridad se encarga de la revisión de documentos.

Los estudios descritos anteriormente en este anexo representan la memoria técnica de los estudios requeridos para la obtención del NAMO (Nivel de aguas máximas ordinarias) de la Laguna de Sayula. A pesar de utilizar la mejor resolución disponible para el área, están sujetos a recomendaciones en cuanto a su interpretación y utilidad. Los modelos hidrológicos dependen fundamentalmente de la información alimentada por estos. El reto que conlleva es tener acceso a información con buena resolución espacial y temporal para disminuir el error y mejorar la precisión de los resultados.

Con base en la ubicación geográfica de la laguna, es necesario llevar a cabo un proceso de medición directa de la topografía en el área correspondiente a la zona federal, y en su caso sí es que hay nivel de agua, un levantamiento batimétrico. Esto se busca con una precisión catastral, que puede obtenerse mediante levantamiento en campo con estación total o estaciones RTK y para el segundo caso mediante ecosondas. Con estas mediciones se puede determinar el funcionamiento hidrológico del vaso de la laguna, en cuanto a las entradas y salidas, y los niveles mensuales según el cambio estacional. Además, se presentan las curvas elevación área capacidad, para representar la relación entre el nivel del agua (elevación) en un embalse, lago o presa y las características físicas de su cuenca, como el área superficial y la capacidad de almacenamiento. Estas curvas son fundamentales para la gestión y operación de cuerpos de agua, ya que permiten calcular el volumen de agua almacenado a diferentes niveles y definir el NAMO.

Para fines prácticos, el estudio en el presente anexo funge como apoyo para los estudios hidrológicos en el proceso de la delimitación de una zona federal, específicamente en la etapa del punto 1.1 detallado en la tabla anterior. Los modelos realizados y sus resultados dan en un espectro general sobre la dinámica y los procesos hidrológicos de las microcuencas que drenan hacia la laguna de San Marcos.

Se realizaron tres distintas metodologías para dar apoyo técnico al proceso de delimitación y que la autoridad determine cuál de estas es la mayormente indicada para tomar como referencia respecto a los resultados de escurrimientos generados y transportados hacia la laguna de San Marcos.

Los estudios hidrológicos alimentan las mediciones directas sobre el vaso para lograr definir la un NAMO para la zona federal. Con base en esta cota, se puede proceder a la demarcación de la zona federal mediante mojoneas geo-referenciadas y conectadas con la red geodésica nacional.

Después, se procede a la generación de cartografía y presentación de la memoria técnica de los estudios a la autoridad correspondiente dentro de la CONAGUA. La cartografía debe ser presentada según el formato oficial proporcionado por el consejo de cuenca dentro de la CONAGUA.

Al tratarse de un proceso para la delimitación de una zona federal, los riesgos por inundación pueden llegar a ser un factor crucial para los proyectos que pretendan implementarse a su alrededor. Por ello, se recomienda complementar la información generada por los modelos con datos y mediciones directas en campo para su calibración y poder representar la realidad de una manera más precisa.

## Bibliografía

- Abbaspour, K. C. (2014). *SWAT-CUP 2012 User Manual*. Obtenido de: [http://www.neprashtechology.ca/Downloads/SwatCup/Manual/Usermanual\\_Swat\\_Cup\\_2012.pdf](http://www.neprashtechology.ca/Downloads/SwatCup/Manual/Usermanual_Swat_Cup_2012.pdf)
- CENAPRED. (2016). *Determinación de periodos de retorno de lluvia pronosticada en cuencas no controladas 1a etapa*. [PDF]. [https://www1.cenapred.unam.mx/COORDINACION\\_ADMINISTRATIVA/SRM/FRACCION\\_XLI\\_A/76.pdf](https://www1.cenapred.unam.mx/COORDINACION_ADMINISTRATIVA/SRM/FRACCION_XLI_A/76.pdf)
- Comisión Nacional del Agua. (2017). *Manual de procedimientos en materia de declaratorias de aguas de propiedad nacional, delimitación de cauce y zona federal, así como su demarcación y supresión*. [PDF]. CONAGUA
- CONAGUA. (2015). *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, conservación del recurso agua. Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Diario Oficial de la Federación.
- INEGI. (2010). *Red hidrográfica, subcuencas hidrográficas de México, escala: 1:50000, edición: 2*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx>
- INEGI. (2016). *Modelo digital de terreno de la carta F13D75*. Obtenido de Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM): <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto de Información Estadística y Geografía [IIEG] (2016). *Cartas Edafológicas Vectorizadas, Escala 1:50,000. Unidades de suelo. Digitalización de las cartas edafológicas, Escala 1:50,000*. INEGI (1970).
- National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). [NCAR]. (2017). *The Climate Data Guide: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)*. Obtenido de: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>
- Norwegian International Climate and Forest Initiative (NICFI). (2024). *Imágenes satelitales para regiones tropicales [Enero, 2024]*. Planet Labs. <https://www.planet.com/nicfi/>
- Universidad de Salamanca. (s.d.). *Obtención del hietograma de diseño*. [PDF]. [https://hidrologia.usal.es/practicas/Hietog\\_diseno\\_fundamento.pdf](https://hidrologia.usal.es/practicas/Hietog_diseno_fundamento.pdf)