



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**TESIS DOCTORAL**

**EL NEXO AGUA-ALIMENTO EN LOS LLANOS DE  
APAN: ESCENARIOS DE ADAPTACIÓN Y  
MITIGACIÓN**

Para obtener el grado de  
Doctora en Ciencias Ambientales

**PRESENTA**

Ing. Evelyn Corona López

**Directoras**

Dra. Alma Delia Román Gutiérrez

Dra. Elena María Otazo Sánchez



Mineral de la Reforma, Hgo. a 4 de septiembre de 2023

**Número de control:** ICBI-D/1419/2023  
**Asunto:** Autorización de impresión de tesis.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO**  
**DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado a la C. I. T. F. Evelyn Corona López, alumna del Doctorado en Ciencias Ambientales (Directo) con número de cuenta 297894, autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado "El Nexo Agua Alimento en los Llanos de Apan: Escenarios de Adaptación y Mitigación" en virtud de que se han efectuado las revisiones y correcciones pertinentes.

A continuación, se registran las firmas de los integrantes del jurado de examen de grado.

**PRESIDENTE** Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval

**SECRETARIO** Dra. Claudia Romo Gómez

**1<sup>er</sup> VOCAL** Dra. Alma Delia Román Gutiérrez

**2<sup>do</sup> VOCAL** Dra. Elena María Otazo Sánchez

**3<sup>er</sup> VOCAL** Dra. Silvia. Chamizo Checa

**2<sup>do</sup> SUPLENTE** Dr. Eric Galindo Castillo

**3<sup>er</sup> SUPLENTE** Dra. Fabiola Araceli Guzmán Ortiz

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

**ATENTAMENTE**  
**"Amor, Orden y Progreso"**

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval  
 Director del ICBI

OAAS/CRG

Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia  
 Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,  
 México. C.P. 42184  
 Teléfono: 771 71 720 00 ext. 2231 Fax 2109  
 direccion\_icbi@uaeh.edu.mx



---

## DEDICATORIAS

A mi amado hijo Santiago, en este momento trascendental de mi vida, cuando sostengo en mis brazos a la mayor fuente de inspiración que jamás hubiera imaginado, deseo dedicarte esta tesis doctoral con todo mi amor. Quiero que sepas que esta tesis es un testimonio de mi compromiso contigo y siempre estaré aquí para apoyarte en cada paso de tu propio viaje.

A mi amado esposo, Miguel Ángel, tu constante apoyo, comprensión y aliento han sido un pilar fundamental en mi vida. Tus palabras de ánimo y paciencia infinita me han impulsado a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Que cada logro que alcance en mi carrera sea también un tributo a nuestro compromiso y a la vida que estamos construyendo juntos.

---

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las siguientes personas e instituciones que han contribuido de manera significativa en la realización de esta tesis doctoral.

A Dios, en quien creo fervientemente, por brindarme fuerza, inspiración y orientación a lo largo de este camino.

A mi querida familia, su presencia y apoyo constante han sido un motor de inspiración y motivación.

A mi directora de tesis, Dra. Alma Delia, le agradezco por su compromiso inquebrantable en mi formación como profesional y por ser un apoyo no solo en lo profesional, sino también en lo personal. Su exigencia y determinación han sido invaluable para mi desarrollo académico, ayudándome siempre a crecer y mejorar en cada etapa de este proceso.

A la Dra. Elena que es una fuente de sabiduría e inspiración constante. Su apoyo y disposición para compartir sus conocimientos han enriquecido mi investigación y crecimiento como estudiante. Siempre estaré agradecida por su mentoría y amistad, su presencia en mi vida ha sido un honor y un privilegio.

A mi comité tutorial, Dra. Fabiola, Dra. Silvia, Dr. Otilio Arturo y Dr. Eric por brindarme las herramientas necesarias y su orientación experta. Su compromiso y sus valiosos comentarios han enriquecido este trabajo y me han ayudado a alcanzar todos los objetivos planteados.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo que me ha dado la oportunidad de perseguir este Doctorado, le estoy eternamente agradecida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca no. 926502 otorgada para la realización del doctorado.

---

## CONTRIBUCIONES DERIVADAS DE LA TESIS DOCTORAL

### Producción científica en eventos académicos

- ❖ Corona-López, E., Román-Gutiérrez, A.D., Otazo-Sánchez, E.M., Guzmán-Ortiz, F.A., Acevedo-Sandoval, O.A. **2020**. El Nexa Agua-Alimento: estudio de caso en los Llanos de Apan, Hidalgo, México. **Foro** sobre la apropiación social de Tecnologías para la gestión sostenible del agua del 28 al 30 de octubre en Izúcar de Matamoros
- ❖ Corona-López, E., Román-Gutiérrez, A.D., Otazo-Sánchez, E.M., Acevedo-Sandoval, O.A., Guzmán-Ortiz, F.A. **2019**.Sustentabilidad ganadera a través del Nexa Agua-Alimento: estudio de caso en los Llanos de Apan. Hidalgo, México. **VI Encuentro Internacional** sobre Biotecnología en la UATx del 1 al 4 de diciembre.
- ❖ Corona-López, E., Román-Gutiérrez, A.D., Otazo-Sánchez, E.M., Acevedo-Sandoval, O.A., Guzmán-Ortiz, F.A. **2019** Sustentabilidad agrícola hacia el Nexa Agua-Alimento: estudio de caso en los Llanos de Apan. Hidalgo, México. **VI Encuentro Internacional** sobre Biotecnología en la UATx del 1 al 4 de diciembre
- ❖ Corona-López, E., Román-Gutiérrez, A.D., Otazo-Sánchez, E.M., Acevedo-Sandoval, O.A., Guzmán-Ortiz, F.A. **2019**.El Nexa Agua-Alimento en los Llanos de Apan, Hidalgo, México. **XV aniversario** del programa de Doctorado en Ciencias Ambientales el 21 de noviembre.
- ❖ Corona-López, E. **2019**. Desarrollo sustentable a través del Nexa Agua-Alimento.5to **Congreso** Nacional de Ingeniería y Tecnologías para el Desarrollo Sustentable el 25 de octubre.

### Producción científica aceptada y enviada:

- ❖ Corona-López, E., & Román-Gutiérrez, A. D. (2019). Agua, biodiversidad y Alimentos *Somos Agua*, 1(6), 16. Retrieved from <https://www.aquanet.com.mx/archivos/SOMOSAGUA6.pdf> **(PUBLICADA)**
- ❖ Corona-López, E., Román-Gutiérrez, A. D., Otazo-Sánchez, E. M., Guzmán-Ortiz, F. A., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2021). Water–Food Nexus Assessment in Agriculture: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4983. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/9/4983> **(PUBLICADA)**
- ❖ Corona-López, E., Román-Gutiérrez, A.D., Otazo-Sánchez, E.M., Guzmán-Ortiz, F.A., Acevedo-Sandoval, O.A. (2020). El Nexa Agua-Alimento: estudio de caso en

---

los Llanos de Apan, Hidalgo, México. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 11(28), 2. **(PUBLICADA)**

- ❖ Corona-López, E., Román-Gutiérrez, A. D., Otazo-Sánchez, E. M., Guzmán-Ortiz, F. A., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2020). Hacia una planeación sostenible del Nexo Agua-Alimento: estudio de caso en los Llanos de Apan, Hidalgo, México *Ecosistemas y Recursos Naturales*. **(ENVIADA)**

**Estancias de investigación:**

- ❖ **Estancia de investigación.** Periodo agosto-diciembre, **2020**. Entrenamiento del software WEAP. Dra. Silvia Chamizo Checa. Facultad de Agrobiología. Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- ❖ **Estancia de investigación.** Periodo enero-junio, **2021**. Generación de escenarios al año 2060. Dra. Silvia Chamizo Checa. Facultad de Agrobiología. Universidad Autónoma de Tlaxcala.

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xiii
<b>RESUMEN</b> .....	xiv
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>I. MARCO TEÓRICO</b> .....	3
<b>1.1 Uso de agua por sectores</b> .....	3
<b>1.2 El Nexo Agua-Alimentos (AA)</b> .....	5
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	8
<b>2.1 Modelos de evaluación del Nexo Agua-Alimentos (AA)</b> .....	8
<b>2.2 Conveniencia de WEAP para la estimación del recurso hídrico</b> .....	10
<b>2.3 Perspectiva Nacional: Agricultura y Gestión Sustentable del Agua en México</b> <b>10</b>	
<b>2.4 Caso de estudio. Desarrollo histórico de los Llanos de Apan</b> .....	11
<b>III. OBJETIVOS</b> .....	14
<b>3.1 Objetivo general</b> .....	14
<b>3.2 Objetivos específicos</b> .....	14
<b>IV. METODOLOGÍA</b> .....	16
<b>4.1 Descripción de la Zona de estudio.</b> .....	16
<b>4.2 Orografía e hidrografía</b> .....	16
<b>4.3 Climatología</b> .....	17
<b>4.4 Confección de bases de datos del sector alimentario en los Llanos de Apan</b> <b>18</b>	
4.4.1 Agricultura.....	18
4.4.2 Ganadería.....	19
<b>4.5 Delimitación de subcuencas en la zona de estudio</b> .....	20
<b>4.6 Modelo Matemático con el programa WEAP.</b> .....	23
4.6.1 Recopilación de información.....	23
4.6.2 Diseño del modelo hidrológico-matemático de Los Llanos de Apan.....	24
4.6.3 Esquema base de WEAP .....	25
4.6.4 Datos de entrada al modelo: Demandas .....	27

4.6.5	Datos de entrada al modelo: Recursos y suministros .....	36
<b>4.7</b>	<b>Interpolación para los datos meteorológicos. ....</b>	<b>36</b>
<b>4.8</b>	<b>Predicción de precipitaciones al 2060 .....</b>	<b>37</b>
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>38</b>
<b>5.1</b>	<b>Producción alimentaria.....</b>	<b>38</b>
5.1.1	Agrícola .....	38
5.1.2	Ganadera .....	43
<b>5.2.</b>	<b>Situación hídrica de los Llanos de Apan.....</b>	<b>45</b>
5.2.1.	Modelo conceptual .....	45
5.2.2.	Modelación matemática del recurso hídrico para el año base 2014 .....	46
5.2.3	Validación del modelo matemático.....	49
5.2.4	Cálculo del balance hídrico en el año base 2014.....	50
<b>5.3</b>	<b>Simulación de escenarios .....</b>	<b>53</b>
5.3.1	Escenario 1: Inercial (BAU).....	54
5.3.2	Escenario de cambio climático (CC) .....	58
5.3.3	Escenario de cambio de uso de suelo a urbano (CUS) .....	62
5.3.4	Escenario de adaptación.....	66
<b>5.4</b>	<b>Demanda de agua de los Llanos de Apan. ....</b>	<b>68</b>
<b>5.5</b>	<b>Explorando las implicaciones del Nexo Agua-Alimentos .....</b>	<b>69</b>
5.5.1	El Nexo Agua-Alimentos de los Llanos de Apan y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	73
5.5.2	Huella hídrica verde en los Llanos de Apan.....	75
<b>5.6</b>	<b>Alternativas de adaptación para lograr un Nexo sustentable Agua-Alimentos</b>	<b>76</b>
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>VII.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>81</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANEXO TABLAS .....</b>	<b>82</b>
<b>IX.</b>	<b>ANEXO FIGURAS.....</b>	<b>86</b>
<b>X.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>88</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Disponibilidad y uso de agua en el sector agrícola, industrial y doméstico.....	3
<b>Figura 2.</b> Interacción entre el Nexa Agua-Alimentos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.....	6
<b>Figura 3.</b> Interacción Agua-Energía-Alimentos (WEF)(AEA), Agua-Energía (WE)(AE), Agua-Alimentos (WF)(AA) y otros.....	7
<b>Figura 4.</b> Área de estudio: Municipios de la región de los Llanos de Apan.....	11
<b>Figura 5.</b> Comparativa de 1960 a 2022 del crecimiento industrial. a) Cartografía de los Llanos de Apan en el año 1960 b) Cartografía de los Llanos de Apan en el año 2022.....	12
<b>Figura 6.</b> Identificación y distribución espacial de las fuentes de agua subterránea en la región de Los Llanos de Apan. ....	16
<b>Figura 7.</b> Características de la distribución del suelo y paisaje en los Llanos de Apan: orografía, hidrografía, zonas urbanas e industriales. Elaboración propia según el mapa de elevaciones de INEGI, 2013 .....	17
<b>Figura 8.</b> Diagrama de flujo de la metodología para recopilar información agrícola en la zona de estudio: una herramienta para identificar y analizar variables relevantes del sector agropecuario.....	19
<b>Figura 9.</b> Proceso metodológico para la recopilación de información, identificación y análisis de la producción ganadera en los Llanos de Apan.....	19
<b>Figura 10.</b> Representación cartográfica de la elevación del terreno en los Llanos de Apan. ....	20
<b>Figura 11.</b> Identificación y ubicación de los principales cuerpos de agua y lagos en los Llanos de Apan. Elaboración propia. ....	21
<b>Figura 12.</b> Subcuencas del acuífero Apan-Tecocomulco pertenecientes a la zona de estudio. Elaboración propia.....	22
<b>Figura 13.</b> Etapas del proceso para la elaboración de balance hídrico en los Llanos de Apan.....	25
<b>Figura 14.</b> Representación esquemática de la zona de estudio para la elaboración del modelo en WEAP. ....	26
<b>Figura 15.</b> Introducción de datos al modelo de la plataforma WEAP .....	27
<b>Figura 16.</b> Datos de entrada al programa WEAP. ....	27
<b>Figura 17.</b> Distribución espacial de uso de suelo y vegetación en los Llanos de Apan....	28

<b>Figura 18.</b> Comportamiento de la precipitación promedio acumulada mensual en los Llanos de Apan (periodo de 1980 al 2015). .....	32
<b>Figura 19.</b> Resultados de interpolación de precipitación mensual en los Llanos de Apan (periodo 1951-2010) .....	33
<b>Figura 20.</b> Distribución de uso de suelo agrícola por cultivo en la subcuenca Apan (año base 2014). .....	35
<b>Figura 21.</b> Estaciones meteorológicas elegidas para la interpolación de datos obtenidos de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio. ....	36
<b>Figura 22.</b> Proyección de años normales, secos y húmedos utilizados en los escenarios de los Llanos de Apan. ....	37
<b>Figura 23.</b> Porcentaje de superficie agrícola, cuerpos de agua, zonas urbanas y rurales. ....	39
<b>Figura 24.</b> Datos de producción y rendimiento en cebada grano de temporal en los municipios que pertenecen a los Llanos de Apan en los años 2007 al 2018. ....	40
<b>Figura 25.</b> Datos de producción y rendimiento de maíz grano de temporal en los municipios que pertenecen a los Llanos de Apan en los años 2005 y 2018. ....	42
<b>Figura 26.</b> Producción ganadera en pie durante el periodo 2005-2018 en los Llanos de Apan. ....	44
<b>Figura 27.</b> Análisis de ETR, escorrentía, infiltración y precipitación en cada subcuenca perteneciente a los Llanos de Apan. ....	48
<b>Figura 28.</b> Correlación entre valores de caudales mensuales de las estaciones hidrométricas Tecocomulco(n=6) e Irolo (n=8) y los caudales calculados con la herramienta WEAP (período 2014) .....	50
<b>Figura 29.</b> Balance hídrico de las cinco subcuencas pertenecientes a la zona de estudio .....	51
<b>Figura 30.</b> Implicaciones hidrológicas de los Llanos de Apan para el año base 2014. ....	52
<b>Figura 31.</b> Demandas de agua subterránea en los Llanos de Apan (a) por subcuenca y (b) por tipo de sector. ....	55
<b>Figura 32.</b> Demandas de agua superficial en un escenario inercial. ....	57
<b>Figura 33.</b> Escenarios de balance hídrico en el escenario inercial en 2060. ....	58
<b>Figura 34.</b> Resultados calculados en los Llanos de Apan en un escenario de cambio climático: comparación de valores de evapotranspiración y precipitación en $\text{hm}^3$ .....	59
<b>Figura 35.</b> Valores de infiltración en $\text{hm}^3$ en un escenario de cambio climático en los Llanos de Apan. ....	60

<b>Figura 36.</b> Proyección de la producción agrícola por subcuenca en toneladas en los Llanos de Apan en un escenario de cambio climático.....	61
<b>Figura 37.</b> Escenarios de balance hídrico en el escenario de cambio climático en 2060.	62
<b>Figura 38.</b> Resultados de escenarios de cambio de uso de suelo: Áreas correspondientes a los asentamientos humanos y agricultura .....	63
<b>Figura 39.</b> Resultados de escenarios de cambio de uso de suelo: Demanda de agua por sectores en los Llanos de Apan. ....	64
<b>Figura 40.</b> Escenarios de balance hídrico en el escenario de cambio de uso de suelo en 2060. ....	66
<b>Figura 41.</b> Valores de infiltración en el escenario de cambio de uso de suelo (CUS), cambio climático (CC) y adaptación.....	67
<b>Figura 42.</b> Escenarios de balance hídrico en el escenario de adaptación en 2060.....	68
<b>Figura 43.</b> El Nexa AA en los Llanos de Apan: Contribuciones a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y análisis de la huella hídrica.....	74
<b>Figura 44.</b> Propuestas de adaptación del Nexa Agua-Alimentos en los Llanos de Apan .	77

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Uso de agua subterránea en algunos países y su distribución por sectores. ....	4
<b>Tabla 2.</b> Principales estrategias y modelos reportados para la evaluación del Nexo Agua Alimentos.....	8
<b>Tabla 3.</b> Estaciones climatológicas utilizadas en el análisis de datos climáticos en los Llanos de Apan.....	18
<b>Tabla 4.</b> Parámetros introducidos al software WEAP para el modelo matemático. ....	23
<b>Tabla 5.</b> Porcentajes correspondientes de uso de suelo y vegetación en las subcuencas de los Llanos de Apan. ....	29
<b>Tabla 6.</b> Parámetros requeridos para calcular el coeficiente de escorrentía e infiltración para las subcuencas de los Llanos de Apan. ....	30
<b>Tabla 7.</b> Datos de coeficientes de cultivo para las zonas agrícolas de los Llanos de Apan. Elaboración propia.....	31
<b>Tabla 8.</b> Datos de temperatura (T) y evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) en los Llanos de Apan. Elaboración propia,.....	34
<b>Tabla 9.</b> Análisis de parámetros hidrológicos para la subcuenca Apan (período 1951-2010). ....	47
<b>Tabla 10.</b> Balance hídrico de los escenarios para los Llanos de Apan al año 2060 (hm <sup>3</sup> )	69
<b>Tabla 11.</b> Huella hídrica verde del sector agrícola en producción de granos y por área en los Llanos de Apan en 2014.....	76

## ACRÓNIMOS

AA	Agua-Alimentos
AE	Agua-Energía
AEA	Agua-Energía-Alimentos
AT	Apan-Tecocomulco
BAU	Business As Usual
CAPRI	Impacto Regionalizado de la Política Agraria Común
Ce	Coeficiente de escorrentía
Ci	Coeficiente de Infiltración
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAGUA	Comisión Nacional del agua
CC	Cambio Climático
CUS	Cambio de Uso de Suelo
DEM	Modelo Digital de Elevación
ETo	Evapotranspiración
ETP	Evapotranspiración potencial
ETR	Evapotranspiración real
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GFWS	Sistema Global de Agua y Alimentos
Ha	Hectáreas
HH	Huella Hídrica
Hm <sup>3</sup>	Hectómetros cúbicos
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IWA	Asociación Internacional del Agua
LCA	Análisis del ciclo de vida
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
P	Precipitación
REPDA	Registro Publico de Derechos del Agua
S	Superficie
SEI	Instituto Ambiental de Estocolmo
SIAP	Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera

SIATL	Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SWAP	Modelo hidrológico Suelo Agua Atmosfera Planta
SWAT	Herramienta de evaluación de suelo y agua
t	Toneladas
USV	Uso de Suelo y Vegetación
WEAP	Evaluación y planificación de los recursos hídricos

---

## **ABSTRACT**

The growing demand for the world's water and food resources has been significant in recent years. The Water-Food Nexus (WFN) was created to assess the interrelationships and diagnose the sustainability level of both resources. This study evaluated this interaction in the Llanos de Apan, a region of great agricultural and industrial importance. Therefore, the objective of this work was to conduct a qualitative and quantitative assessment of the Water-Food Nexus in the Llanos de Apan through the calculation of indicators from different demand sectors to propose strategies for the rational use of water that promote sustainable development in the area. The water balance of the Llanos de Apan was conducted by sub-basins (Apan, Atocha Tecocomulco, Tepozán, and Zapata) from 2014 to 2060 using conceptual and mathematical models that consider the demands for surface and groundwater from the agricultural, population, and industrial sectors, as well as climatic conditions. The groundwater balance determined the net recharge for the base year 2014, with precipitation being the sole source of water supply and evapotranspiration being the most significant outflow. A decrease in precipitation and an increase in evapotranspiration are expected in the climate change scenario, which will pose the greatest threat to agricultural production in the Llanos de Apan. The sub-basins most affected by climate change are projected to be Apan and Atocha due to the importance of the agricultural sector and industrial activities in both areas. Mitigating water use in a probable scenario for 2060 includes sustainable alternatives for Water-Food Nexus adaptation, such as increasing surface water storage capacity, expand vegetation coverage, and utilizing wastewater.

## RESUMEN

La creciente demanda de los recursos hídricos y alimentarios del mundo ha sido considerable en los últimos años. El Nexo Agua-Alimentos (AA) se creó con el fin de evaluar las interrelaciones y diagnosticar el grado de sostenibilidad de ambos recursos. En este estudio, se evaluó esta interacción en los Llanos de Apan, una región de gran importancia agropecuaria e industrial. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación cualitativa y cuantitativa del Nexo Agua-Alimentos de los Llanos de Apan mediante cálculos de indicadores de diferentes sectores de demanda. Para proponer estrategias de adaptación del uso racional de agua que promuevan el desarrollo sustentable de la zona. Se realizó el balance hídrico de los Llanos de Apan por subcuencas (Apan, Atocha Tecocomulco, Tepozán y Zapata) del año 2014 al 2060 mediante los modelos conceptual y matemático que consideran las demandas de aguas superficiales y subterráneas del sector agropecuario, poblacional e industrial y las condiciones climáticas. El balance de aguas subterráneas determinó la recarga neta de para el año base 2014, siendo la precipitación la única fuente de suministro de agua y la evapotranspiración el flujo de salida más importante. Se prevé una disminución de la precipitación y aumento de la evapotranspiración en el escenario de cambio climático que será la mayor amenaza a la producción agrícola de los Llanos de Apan. Las subcuencas que se afectarán en mayor medida debido al cambio climático son Apan y Atocha por la importancia del sector agrícola y las actividades industriales que se desarrollan en ambas. Se calcula la mitigación del uso del agua de un escenario probable para el año 2060 que contempla alternativas sustentables de adaptación del Nexo Agua-Alimentos como son: aumentar la capacidad de almacenamiento de agua superficial, incremento cobertura vegetal y uso de aguas residuales.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para la producción de alimentos y su utilización puede tener un impacto considerable en los recursos hídricos disponibles (Amorim et al., 2018). Esto sucede por el consumo directo de agua, la contaminación causada por químicos agrícolas y la alteración de los ecosistemas acuáticos debido a la expansión de la agricultura y la ganadería (R. K. Mishra, 2023). Esta interdependencia se vuelve crucial en regiones donde la disponibilidad y calidad del agua son limitadas y la seguridad alimentaria es un desafío constante (Fan et al., 2022).

En las últimas décadas, el concepto del Nexo Agua-Alimentos (Nexo AA) se ha reconocido como un enfoque integral para abordar los desafíos interrelacionados de la seguridad hídrica y alimentaria (Sathre, Antharam, & Catena, 2022). Además de la interdependencia entre el agua y la producción de alimentos, el Nexo AA destaca cómo los cambios en uno pueden afectar directa o indirectamente al otro (Delavar et al., 2020; Oti, Kabo-bah, & Ofose, 2020). Este enfoque alerta los controladores críticos para las dinámicas del sector hídrico y alimentario (Smajgl, Ward, & Pluschke, 2016). En los últimos años, múltiples estudios han manifestado que las conexiones entre los alimentos y el suministro de agua deben explorarse para trabajar hacia un estado de seguridad global de ambos (Abdelkader et al., 2018; Mannan, Al-Ansari, Mackey, & Al-Ghamdi, 2018; Mortada, Abou Najm, Yassine, El Fadel, & Alamiddine, 2018; Ren, Yang, Yang, Richards, & Zhou, 2018).

En la región de los Llanos de Apan, ubicados al sur del estado de Hidalgo en la región del Valle de México (CONABIO, 2006), se presenta un escenario relevante para examinar el Nexo AA y detectar los desafíos y oportunidades asociados con su gestión. Esta región se destaca por su importancia agrícola y el desarrollo industrial actual y prospectivo. La superficie total de esta zona de estudio es de 1275.5 km<sup>2</sup>, presenta dos Acuíferos: Apan y Tecocomulco, en veda parcial desde el año 1954 clasificada como tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos (CONAGUA, 2013). En los últimos años se han instalado diversas industrias con diferentes giros dentro de la región, las cuales tienen concesiones de alta demanda de agua, tanto a nombre de las industrias como del gobierno (REPD, 2020). Por otro lado, la productividad de cebada y otros cultivos presenta un descenso gradual año con año, posiblemente debido a la falta de rotación de cultivos y a las afectaciones climáticas, ya que su sistema de siembra es mayormente de temporal.

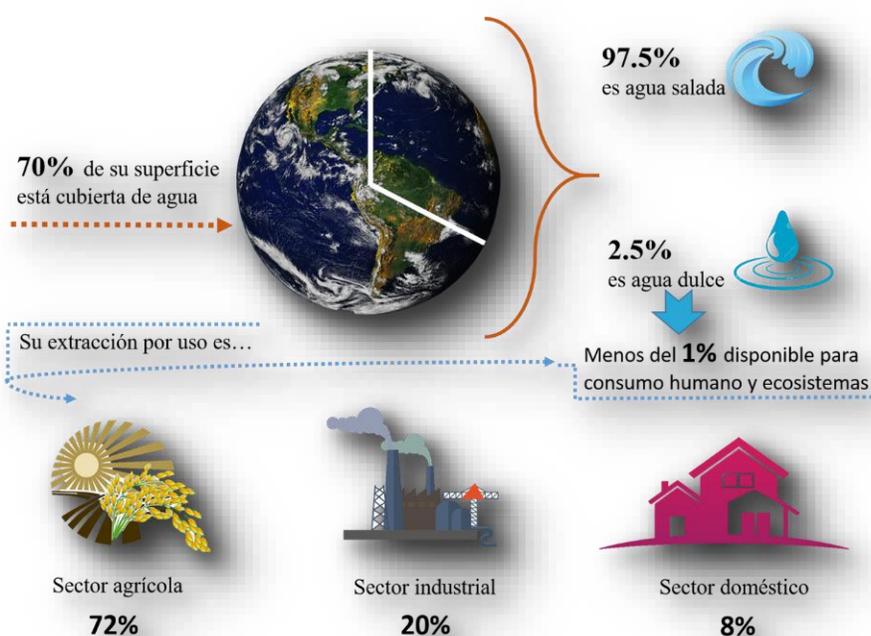
En este contexto, es importante calcular el balance hídrico de la zona, ya que es una herramienta fundamental en la planificación y gestión de agua en los Llanos de Apan. Este balance permitirá conocer la cantidad de agua disponible, así como su distribución temporal y espacial para tomar decisiones informadas sobre el uso de agua y asegurar una gestión sostenible del recurso. Además, se podrá estimar la cantidad de agua de lluvia disponible para los cultivos, su relación con la eficiencia agrícola y evaluar en qué grado mejoran los problemas de estrés hídrico y la seguridad alimentaria con las medidas de adaptación y mitigación propuestas para los Llanos de Apan.

La presente tesis está estructurada de la siguiente manera: En el Capítulo I, se presenta el marco teórico que fundamenta esta investigación. El Capítulo II se enfoca en los antecedentes y modelo de evaluación del Nexo AA. Además, se analizan las transformaciones territoriales específicas en los Llanos de Apan, lo que brinda un contexto más preciso para el estudio de caso. En el Capítulo III, se presentan los objetivos de la investigación. El Capítulo IV describe detalladamente la metodología utilizada en el estudio. En el Capítulo V se presentan los resultados obtenidos y su discusión. En los capítulos VI y VII, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación. Se muestra la bibliografía utilizada en todo el documento y los Anexos que contienen material adicional.

## I. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Uso de agua por sectores

El agua es un recurso indispensable para la vida, es ocupada en todas las actividades sociales y económicas a nivel mundial. Numerosos estudios han clasificado el uso del agua en tres importantes sectores: agrícola, industrial y doméstico. El agua en la agricultura, es fundamental para el cultivo y cosecha de alimentos (Giordano, Barron, & Ünver, 2019). En la industria es imprescindible para la producción y cadena de suministro (Revollo-Fernández, Rodríguez-Tapia, & Morales-Novelo, 2019). En el sector doméstico es necesaria para consumo, aseo personal, preparación de alimentos, limpieza, etc.



**Figura 1.** Disponibilidad y uso de agua en el sector agrícola, industrial y doméstico.  
Elaboración propia con datos de CONAGUA, 2011; FAO, 2016

La Figura 1 esquematiza la disponibilidad mundial de agua con los porcentajes de uso por extracción para el sector agrícola, industrial y doméstico. Se observa (Figura 1) que el 70% de la superficie de la tierra está cubierta de agua; el 2.5% es dulce y el resto es salada (BUREAU, 2017; IWA, 2018). No obstante, la disponibilidad de agua dulce para consumo humano y ecosistemas es menor a 1%, debido a que el resto es de difícil acceso o se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo (CONAGUA, 2011; FAO, 2016). A nivel mundial el mayor porcentaje de uso de agua es para el sector agrícola con 72%, seguido

del sector industrial que representa el 20% de uso y finalmente el sector doméstico con el 8% (FAO, 2016). Existen cifras específicas del porcentaje de uso por sectores para cada país. La Tabla 1 muestra datos de porcentajes de extracción y uso de agua subterránea por sectores agrícola, industrial y doméstico de algunos países en 2016.

**Tabla 1.** Uso de agua subterránea en algunos países y su distribución por sectores.

Continente	País	Extracciones anuales (km <sup>3</sup> )	Porcentaje (%)		
			Doméstico	Industrial	Agrícola
América	Canadá	41.3	14.2	80.1	5.6
	U. S	485.6	12.8	51.1	36.1
	México	86.5	14.5	9.1	76.3
	Nicaragua	1.5	18.5	4.7	76.7
	Brasil	74.8	23	17	60
	Argentina	37.7	15.5	10.6	73.9
Europa	España	37.3	14.2	17.6	68.1
	Francia	29.8	19	71.5	10.5
	Italia	53.8	20	35.9	44.1
África	Egipto	72.3	13.3	1.6	85.1
	Nigeria	12.5	40.1	15.7	44.2
	Sur África	15.5	27	10.4	62.6
Asia	Rusia	61.1	20.3	59.8	19.9
	India	647	7.3	2.3	90.4
	China	900	12.6	22.2	65.2
Oceanía	Australia	16.1	23	17	60
	Nueva Zelanda	5.2	15.5	22.8	61.7

(FAO, 2016; Mundial, 2017)

Se observan datos de agua en países pertenecientes a los cinco continentes habitados: América, Europa, África, Asia y Oceanía. Las extracciones anuales son variables por países y sector aún en el mismo continente. Los países con mayores extracciones son Estados Unidos, India y China con valores de 419, 647 y 900 km<sup>3</sup> respectivamente. Las menores

extracciones se observan en países como Nicaragua y Nueva Zelanda con valores de 1.5 y 5.2 km<sup>3</sup> respectivamente (FAO, 2016).

Estas variaciones de extracción y uso de agua están directamente relacionadas con el número de población. Estados Unidos, India y China son los países con mayor número de habitantes con valores de 325147, 1339180 y 1386395 km<sup>3</sup>, respectivamente.

Respecto al porcentaje utilizado en el sector doméstico, los valores más altos se observan en el continente africano en Nigeria (40.1%) y Sudáfrica (27%). Los países industrializados que utilizan el mayor porcentaje de su extracción anual para este sector son Canadá (80.1%) y Francia (71.5%). El 76% de los países utilizan el porcentaje más alto para su uso en el sector agrícola, siendo India (90.4%) y Egipto (85.1%) los más demandantes.

La evaluación de uso de agua es importante para poder establecer medidas de adaptación y mitigación para las actividades más demandantes en cada sector permitirá gestionar eficazmente el uso del recurso hídrico (UNESCO, 2019).

## 1.2 El Nexo Agua-Alimentos (AA)

El Nexo AA se ha convertido en un tema esencial para las comunidades científicas debido a la incertidumbre futura sobre el acceso seguro a los recursos que son esenciales para la vida (Ahmadzadeh, Morid, Delavar, & Srinivasan, 2016). La interconexión entre los recursos hídricos y alimentarios ha dado lugar a un impulso creciente para cambiar los enfoques de gestión (Kaddoura & El Khatib, 2017). El Nexo AA llama la atención para asegurar esos recursos, y para hacerlo; los modelos cuantitativos deben permitir su evaluación.

En el contexto de Nexo AA, la Figura 2 muestra la relación con 10 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (Nations, 2015). De acuerdo con este enfoque, el Nexo AA es clave para el cumplimiento de los ODS debido a los desafíos emergentes de disponibilidad hídrica y alimentaria.

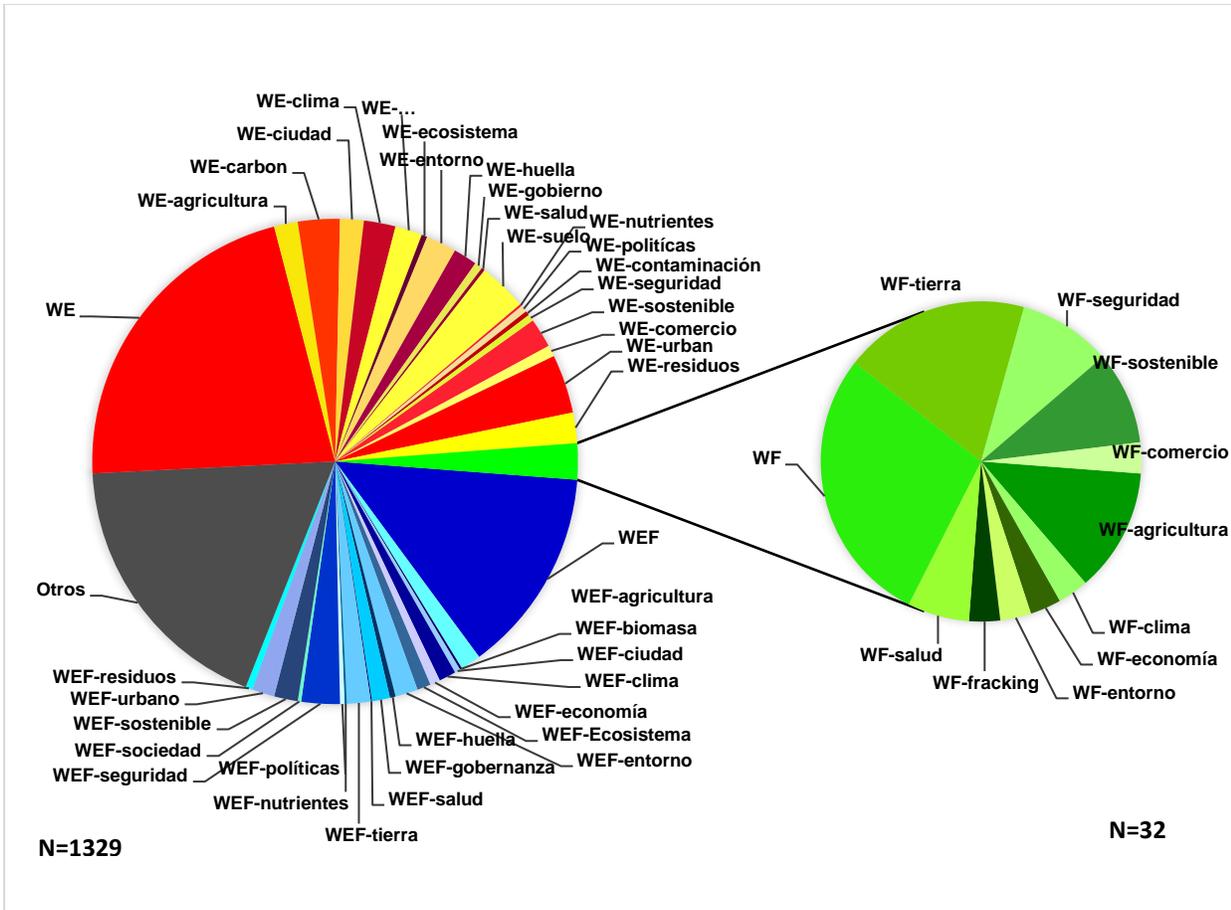


**Figura 2.** Interacción entre el Nexo Agua-Alimentos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.  
(Corona-López, Román-Gutiérrez, Otazo-Sánchez, Guzmán-Ortiz, & Acevedo-Sandoval, 2021)

El Nexo AA es un concepto muy complejo, utilizado para el estudio y gestión de los sistemas de recursos globales (agua y alimentos) de manera integral (Rasul, 2016; Smajgl et al., 2016; Yillia, 2016; C. Zhang, Chen, Li, Ding, & Fu, 2018). Se han propuesto diversos marcos y modelos para comprender la complejidad del Nexo.

La Figura 3 muestra los trabajos publicados sobre las interacciones del Nexo Agua-Energía-Alimentos, Agua-Energía y Agua-Alimentos, sus variantes y otros.

Como se observa en la Figura 3, existen múltiples interacciones con energía dentro de las clasificaciones del Nexo. Se realizó una búsqueda en SCOPUS con palabras clave “water” and “nexus” obteniendo un resultado de 1329 publicaciones durante el periodo 2002-2020. Las investigaciones AEA ocupan el 13.7% y sus 19 interacciones equivalen al 16.1%, AE representa el 21.7% con 19 interacciones que representan el 27.8%, AA 0.7% con 10 interacciones que representan 1.7% y el resto son publicaciones enfocadas al estudio del agua sin alguna interacción. La elaboración de esta grafica se realizó con el fin de visualizar la importancia del estudio del Nexo AA y la necesidad de cuantificarlo mediante indicadores.



**Figura 3.** Interacción Agua-Energía-Alimentos (WEF)(AEA), Agua-Energía (WE)(AE), Agua-Alimentos (WF)(AA) y otros.  
 Consulta en SCOPUS, 23-junio-2020.

Cada vez más investigaciones se enfocan en cómo satisfacer sustentablemente las necesidades humanas, por ello, regular el uso de recursos agua y alimentos es fundamental. Es importante poder utilizar una herramienta que facilite la evaluación del Nexo AA y ayude a la creación de nuevas políticas y gestión de recursos. Los métodos de evaluación del Nexo Agua Alimentos son útiles para predecir escenarios futuros ante la escases y demanda de ambos recursos. Sin embargo, la mayoría de los estudios publicados acerca de los nexos lo abordan de una manera cualitativa y pocos trabajos han proporcionado información sobre la evaluación cuantitativa del Nexo AA como se observa en la Figura 3.

## II. ANTECEDENTES

En los siguientes apartados se incluye la importancia del agua en la agricultura, industria y de uso doméstico. También se describe la utilidad de un Nexo y sus modelos de evaluación, así como las investigaciones relacionadas desde una perspectiva global hasta el nivel regional.

### 2.1 Modelos de evaluación del Nexo Agua-Alimentos (AA)

La revisión compila seis modelos matemáticos para evaluar los recursos hídricos y alimentarios. No obstante, inicialmente fueron creadas para un fin distinto a la evaluación del Nexo AA. La Tabla 2 muestra los seis principales modelos encontrados y sus características adaptadas para la evaluación de AA.

**Tabla 2.** Principales estrategias y modelos reportados para la evaluación del Nexo Agua Alimentos.

Modelo	Desarrollador	Aplicación	Ventajas	Limitaciones	Referencia
Life Cycle Assessment (LCA)	Harry Teasley, 1969	E. Impactos ambientales	Identifica los puntos de impacto	Interpretación de subjetiva	(Hunt, Franklin, & Hunt, 1996)
Water Evaluation and Planning system (WEAP)	Jack Sieber, SEI 1988	Evaluación de recursos hídricos	Simulación dinámica de escenarios	Requiere capacitación	(Sieber, 2018)
Soil & Water Assessment Tool (SWAT)	Jeff Arnold, USDA 1991	Simulación hidrológica	Transporte de contaminantes	No simula escenarios de disponibilidad de agua	(Gassman, Reyes, Green, & Arnold, 2007)
Common Agricultural Policy Impact Analysis (CAPRI)	ILR, UE 1997	Impacto de las políticas agrícolas	Análisis de escenarios agrícolas	Cobertura media global	(Lin, Chen, Hua, Liu, & Yan, 2019)
Soil, Atmosphere and Plant (SWAP)	Reinder Feddes, WUR 1978	Uso de agua en cultivos	Simula el transporte de agua	No dispone de una interfaz gráfica	(Lubis, Delinom, Martosuparno, & Bakti, 2018)
Global Food and Water System (GFWS)	Quentin Grafton, 2014	Plataforma de simulación	Escenarios de Nexo AA en la agricultura	Los datos están precargados	(Quentin & Claudia, 2014)

Como se observa en la Tabla 2, algunos de estos modelos se desarrollaron hace aproximadamente 50 años. A través del tiempo se elaboraron nuevos métodos de cálculo y actualmente su campo de aplicación es diverso.

LCA fue desarrollada con el objetivo inicial de evaluar los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio (Peter et al., 2017) y actualmente está regulado por la norma ISO 14040/14044. Su aplicación se ha ampliado a cuestiones económicas, sociales y ambientales (Balanay & Halog, 2019).

WEAP fue elaborado para la planificación integrada de recursos hídricos, evaluación de sustentabilidad y exploración de escenarios (Sieber, 2018). Su principal característica es la capacidad de un análisis del balance hídricos modelando escenarios de demanda suministro, escorrentía, caudales y disponibilidad de agua, así como el tratamiento, descarga de contaminantes y calidad del agua en las corrientes, bajo diferentes condiciones de manejo y variabilidad climática (Chamizo-Checa et al., 2020). WEAP está soportado por una plataforma en línea que tiene disponible la descarga del software (WEAP, 2023).

SWAT es un modelo a escala de cuenca hidrográfica utilizada para simular la cantidad de agua superficial y subterránea, predecir el impacto ambiental del uso de suelo, evaluar las prácticas de gestión y los efectos del cambio climático (Luan, Wu, Sun, Wang, & Gao, 2018). Sin embargo existe restricción para simular escenarios futuros de disponibilidad de agua (Chamizo, Otazo, & Gordillo, 2018).

CAPRI evalúa el equilibrio parcial global para el sector agrícola diseñado en 2010 para la Unión Europea (Lin et al., 2019) para la evaluación del impacto de las políticas agrícolas, ambientales y comerciales (Blanco, Doorslaer, & Britz, 2012). y analiza la presión sobre los recursos hídricos a nivel regional (Blanco, Doorslaer, Britz, & H.P, 2012).

SWAP es el sucesor de la primera versión llamada SWATR (Kroes & van Dam, 2020). Es un modelo diseñado para la simulación de procesos de flujo y transporte a escala de campo durante temporadas de crecimiento y para series de tiempo a largo plazo (Lubis et al., 2018). La aplicación a escala regional dentro de un entorno SIG requiere características adicionales que no se distribuyen de forma estándar con el modelo.

GFWS es una plataforma creada por la red Food Energy Environment Water (FE2W) (Grafton, Williams, & Jiang, 2015) del Sistema Mundial de Alimentos y Agua (GFWS) y está diseñada para explorar la relación entre el rendimiento de los cultivos, el uso de agua y

fertilizantes y la superficie terrestre, simulando escenarios de producción, demanda y suministro de agua y alimentos hasta el año 2050.

Para poder hacer uso de cada uno de los modelos mencionados anteriormente se requiere de una capacitación y conocimientos técnicos. De los mostrados en la tabla 2, WEAP proporciona la mayor ventaja al ser más completa y disponible para la simular estimaciones de los recursos hídricos en escenarios para la evaluación cuantitativa del Nexo AA.

## 2.2 Conveniencia de WEAP para la estimación del recurso hídrico

De acuerdo con la revisión de la literatura se han encontrado diversos estudios de caso en los que se aplica el modelo WEAP para las evaluaciones cuantitativas de los recursos hídricos enfocados a la agricultura que ilustran la adaptabilidad del modelo para definir su propio conjunto de variables en función de la información recabada por el usuario (Kaddoura & El Khatib, 2017).

Se han reportado estudios de caso en los que se utiliza WEAP para analizar la reducción de las necesidades de agua, análisis de evapotranspiración y evaluación de la disponibilidad de agua en cultivos. Dentro de su modelo de simulación se incluye la planeación de recursos hídricos e incorpora modelos para los requerimientos de cultivos y rendimientos. Presenta la ventaja de poder elegir las ecuaciones y variables, así como la capacidad para poder construir modelos con un número de funciones predefinidas.

WEAP ha sido una herramienta eficiente para la mejora en técnicas de riego y evaluar su impacto en los recursos hídricos a gran escala como lo reportaron Schneider, Sander, Wassmann, & Asch en una revisión publicada en 2019. La página web de la comunidad de WEAP contiene la revisión actualizada de todos los estudios de caso llevados a cabo utilizando este modelo (SEI, 2023)

La mayor ventaja de la modelación de escenarios futuros consiste en la simulación de asignación de recursos y planes de gestión para equilibrar la demanda con la oferta y promover un desarrollo sostenible.

## 2.3 Perspectiva Nacional: Agricultura y Gestión Sustentable del Agua en México

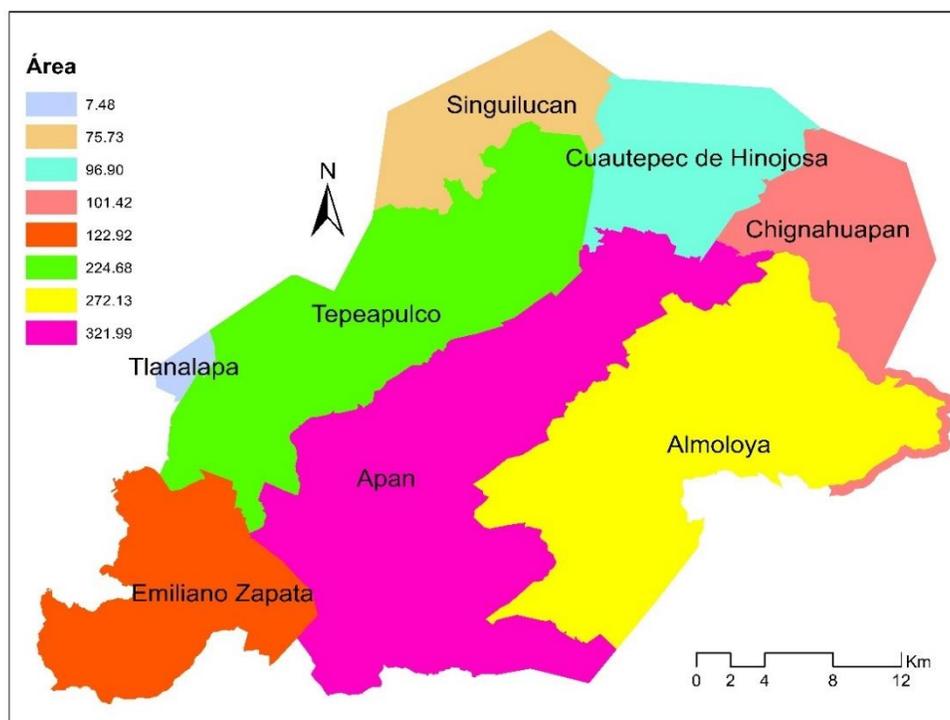
En México se publicó un reporte en el año 2015, del Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSAR) enfocado a la agricultura y la gestión sustentable del agua en México. Concluyendo que la gestión sustentable de los recursos hídricos es una necesidad para asegurar el abasto de alimentos para las presentes

y futuras generaciones en México (CEDRSSA, 2015).

Se han realizado trabajos de tesis enfocados al agua y alimentos como: Estrategia integral para el aprovechamiento y uso eficiente del agua para riego en Sinaloa (Zavala Cabanillas, 2013). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada (Salazar-Moreno, Rojano-Aguilar, & López-Cruz, 2014). El valor del agua en México y su aprovechamiento en el campo. Descripción de las asociaciones público privadas como vía para maximizar el uso del recurso hídrico en el sector agrícola (Del Rincón, 2017).

#### 2.4 Caso de estudio. Desarrollo histórico de los Llanos de Apan

Los Llanos de Apan se encuentran ubicados al sur del estado de Hidalgo. En la Figura 4 se observan los municipios que se incluyen dentro de la región de los Llanos de Apan. Se encuentran ubicados dos acuíferos: Apan y Tecocomulco (Corona-López, Román-Gutiérrez, Acevedo-Sandoval, & Otazo-Sánchez, 2023)



**Figura 4.** Área de estudio: Municipios de la región de los Llanos de Apan.

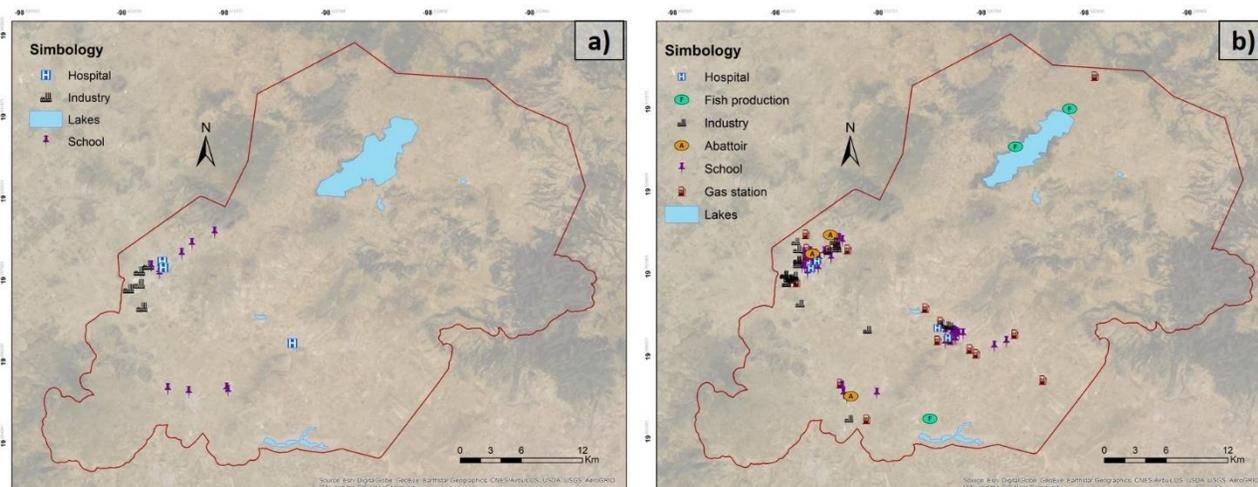
Los Llanos de Apan en 1960 fueron una zona con elevadas producciones de pulque (83.5 millones de litros anuales) disminuyendo aproximadamente 98.25% para el año 2021. El suelo agrícola tuvo una transición hacia la producción de cereales que ha estado influenciada por la calidad del suelo y las condiciones climáticas al ser el 98% de temporal.

El 30.4% de la región presenta declinación de la fertilidad del suelo, afectando la producción alimentaria que es una importante actividad de subsistencia para pobladores de la región.

El crecimiento y la expansión de las áreas urbanas han dado como resultado la transformación dinámica del uso de suelo en la región de los Llanos de Apan. En los últimos años se han instalado diversas industrias, lo que ha tenido como consecuencia el crecimiento de nuevos centros de población. Durante el periodo 2001-2016 el incremento de las áreas urbanas aumento 188%, esto ha derivado en una mayor demanda de servicios. Se ha observado que la zona de estudio presenta cambios en su dinámica agrícola debido al crecimiento industrial, lo que ha tenido como consecuencia el incremento poblacional.

Las industrias ubicadas en los Llanos de Apan han aumentado 400% desde 1960 al año 2022. El parque industrial de Cd. Sahagún (municipio de Tepeapulco) uno de los parques industriales más importantes dentro del estado de Hidalgo tiene actualmente alrededor de 18 industrias.

Estas industrias pertenecen al sector metalmecánico, ferroviario, automotriz, alimentario y químico (Romo Cruz, 2019). En la Figura 5 se presenta una comparación de la cartografía en 1960 y en 2022 incluyendo las principales industrias en la que se observa que la densidad industrial ha aumentado considerablemente.



**Figura 5.** Comparativa de 1960 a 2022 del crecimiento industrial. a) Cartografía de los Llanos de Apan en el año 1960 b) Cartografía de los Llanos de Apan en el año 2022 (Elaboración propia con datos de los cuadernos estadísticos para los años correspondientes y consulta de DENU, 2022).

En la Figura 5a, se observan las 4 principales industrias del año 1960, hospitales y escuelas de los Llanos de Apan. En la Figura 5b, se representan las principales industrias, empresas

de producción pesquera, rastros municipales, gasolineras y escuelas. Se puede observar que durante el periodo de 62 años el número de empresas ha aumentado considerablemente.

La construcción de nuevas industrias ha generado cambios en el uso de suelo, se ha observado que la superficie que estaba dedicada a la producción agrícola ha sido desplazada para la creación de industrias y fraccionamientos. Estas transformaciones inciden directamente en la recarga de los mantos acuíferos al disminuir los porcentajes de infiltración y escorrentía por el efecto de la construcción de zonas industriales y urbanas.

El caso de los Llanos de Apan es un claro ejemplo de cómo las regiones rurales comienzan el proceso de transformación urbana. En muchas regiones del mundo el ser humano busca incrementar su economía y la producción alimentaria al ser variable puede ser sustituida por diversas actividades.

### III. OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo general

Analizar el estado del Nexo Agua-Alimentos en los Llanos de Apan mediante el análisis de su productividad agrícola y el cálculo de la disponibilidad de agua, así como el balance hídrico en diferentes escenarios para demostrar la conveniencia de estrategias de adaptación proponiendo otras fuentes de agua disponibles en la zona que promuevan su desarrollo sustentable.

#### 3.2 Objetivos específicos

- I. Confeccionar una base de datos en el periodo 2005-2018 que compile prácticas de riego, producción y rendimiento de cultivos en los Llanos de Apan, mediante la búsqueda digital de fuentes oficiales de los sectores involucrados, para evaluar el comportamiento agrícola de la zona.
- II. Identificar y categorizar las áreas dedicadas a la ganadería mediante la consulta de plataformas digitales y la elaboración de mapas con herramientas especializadas para obtener un panorama de la distribución espacial de la ganadería en la zona de estudio.
- III. Obtener datos de demanda y concesiones de agua de las diferentes industrias instaladas en la región de estudio mediante la búsqueda de concesiones autorizadas para estimar el impacto que tiene la extracción de agua a los acuíferos y proponer escenarios con usos eficientes de agua.
- IV. Seleccionar un año base normal mediante el análisis de las variaciones de precipitación basado en datos climatológicos anuales históricos y la existencia de información suficiente que permita diseñar los modelos para la zona de estudio.
- V. Diseñar el modelo conceptual para el año base (2014) y el correspondiente modelo matemático para su calibración y posterior cálculo del balance hídrico de la zona por subcuencas, considerando el agua superficial y subterránea, desagregando sectores urbano, industrial y agropecuario mediante el programa de evaluación WEAP (Water Evaluation and Planning System)
- VI. Simular los volúmenes de agua superficial y subterránea mediante el cálculo del balance hídrico de diferentes escenarios hasta el año 2060, en donde se consideren las tasas de crecimiento poblacional, de las áreas agrícolas y urbanas y del desarrollo industrial, así como de los efectos del cambio climático.

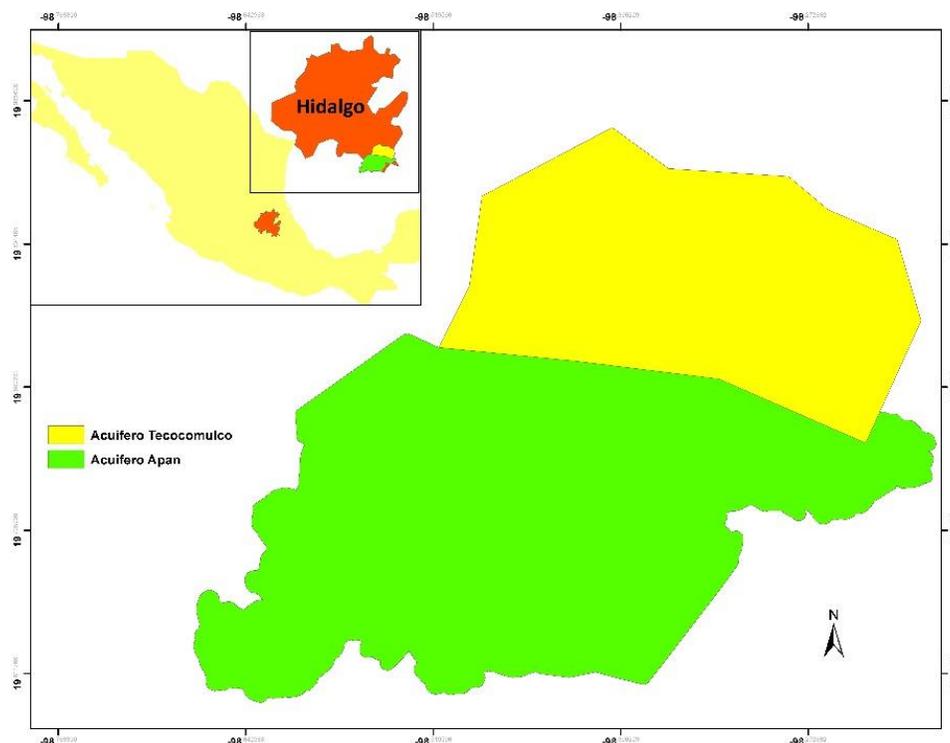
- VII. Diseñar y simular un escenario que contemple varias estrategias de adaptación como son la reutilización del agua industrial tratada, aumentar la capacidad de almacenamiento de agua superficial y el incremento de zonas para agricultura de temporal para obtener información que facilite la toma de decisiones para el desarrollo sustentable de los Llanos de Apan y mejorar el uso eficiente de agua entre los diferentes sectores para satisfacer la demanda de recursos hídricos y alimentarios a las presentes y futuras generaciones.
- IV. Evaluar la Huella Hídrica verde del sector agrícola, como un indicador relacionado con el Nexo Agua Alimentos mediante los resultados obtenidos en el escenario base.

#### IV. METODOLOGÍA

A continuación, se describe la metodología utilizada para la evaluación aspectos agropecuarios e hídricos para la valoración del Nexo AA en los Llanos de Apan. se proporciona una visión detallada de cada una de las secciones incluidas en esta metodología.

##### 4.1 Descripción de la Zona de estudio.

Los Llanos de Apan se encuentran ubicados en la zona sur del Estado de Hidalgo, pertenecientes a la región del Valle de México (CONABIO, 2006). Dentro de esta región de estudio se encuentran ubicados 2 acuíferos: Apan y Tecocomulco como se observa en colores amarillo y verde en la Figura 6. La superficie total que abarca esta zona de estudio es de 1275.5 km<sup>2</sup>.



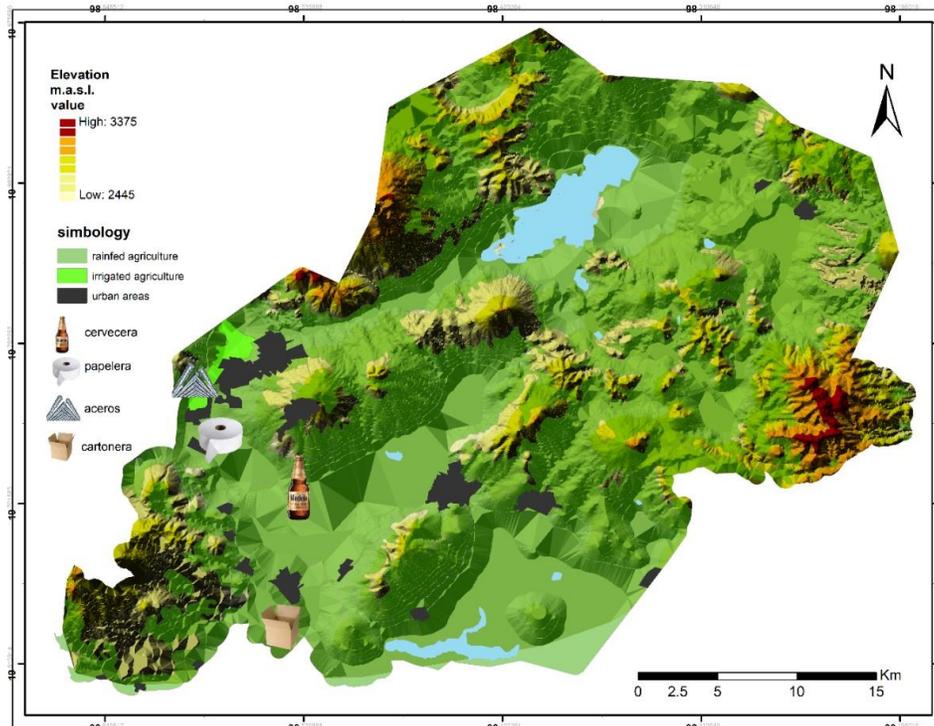
**Figura 6.** Identificación y distribución espacial de las fuentes de agua subterránea en la región de Los Llanos de Apan. (CONAGUA, 2003)

##### 4.2 Orografía e hidrografía

Las elevaciones topográficas de los Llanos de Apan se muestran en la Figura 7. Las alturas máximas aparecen en tonos rojizos y las mínimas en amarillo, en un rango de 3375 a 2445

msnm. Dentro de esta región de estudio se encuentran ubicados 4 municipios: Almoloya, Apan, Emiliano Zapata y Tepeapulco y partes de los municipios de: Cuautepec de Hinojosa, Singuilucan, Tlanalapa y Chignahuapan.

Se puede observar que la mayor parte de la zona está dedicada a la agricultura de temporal y solo una pequeña región a la agricultura de riego, al noreste. También se representan las zonas urbanas en tonos grises y se incluyen las principales industrias que demandan agua. Se observan los principales cuerpos de agua siendo los de mayor tamaño las lagunas de Tecocomulco y de Atocha, ubicadas al Norte y Sur respectivamente.



**Figura 7.** Características de la distribución del suelo y paisaje en los Llanos de Apan: orografía, hidrografía, zonas urbanas e industriales. Elaboración propia según el mapa de elevaciones de INEGI, 2013

### 4.3 Climatología

El clima en la zona se clasifica como templado subhúmedo y semiárido-templado con lluvias en verano y una precipitación invernal menor del 5% al 10.2% del total anual. La precipitación promedio es de 634.6 mm anuales. Entre los meses de mayo y octubre la precipitación varía entre 75 y 172 mm, mientras que entre noviembre y abril oscila entre 10 y 44 mm. La temperatura media anual es de 13°C, con una mínima de -3°C y máxima de 26°C. La evapotranspiración total anual es de 489 mm. (SMN, 2018)

En la tabla 3 se muestra la relación de las estaciones climatológicas utilizadas para el análisis climatológico de la región de los Llanos de Apan (CONAGUA, 2021).

**Tabla 3.** Estaciones climatológicas utilizadas en el análisis de datos climáticos en los Llanos de Apan.

Clave	Nombre	Clave	Nombre
21140	Chignahuapan	13138	Emiliano Zapata
13002	Apan (DGE)	15101	San Miguel Tlaixpan
13031	Santiago Tulantepec	15135	Xochihuacan
13022	Pachuca (OBS)	15210	San Juan Totolapan
13024	Potrerito	21107	Zacatlán
13029	San Lorenzo Sayula	21190	Venta Grande
13030	San Rafael Mazatepec	21210	Ahuazotepec
13033	Singuilucan	29003	Atlanga San José
13041	Tulancingo (OBS)	29004	Cuamantzingo
13079	Presa el Girón	29010	Hueyotlipan
13082	Presa la Esperanza	29025	San Marcos Huaquilpan
13085	Presa Tezoyo	13133	San Pedro Tlaquilpan
13127	El Aserradero	13132	El Tepozán
13129	San Agustín Zapotlán		

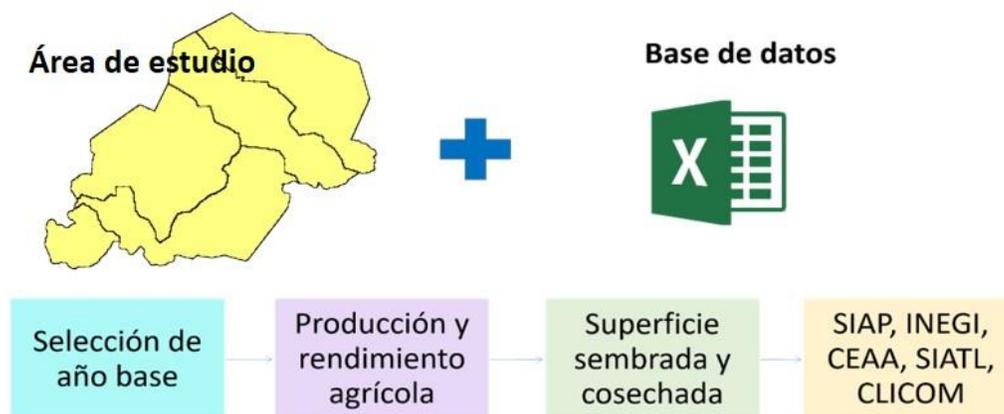
(CONAGUA, 2021).

#### 4.4 Confección de bases de datos del sector alimentario en los Llanos de Apan

Los Llanos de Apan son una zona importante dentro del sector alimentario ya que existen elevadas producciones agrícolas y ganaderas. En los siguientes apartados se describe la metodología seguida para el análisis del sector alimentario. Las bases de datos se elaboraron con información agroalimentaria de plataformas como SAGARPA, SIAP e INIFAP.

##### 4.4.1 Agricultura

Se obtuvo una base de datos en Excel por municipios a través de la búsqueda digital en los diferentes organismos y sectores involucrados para tener antecedentes reales de la zona de estudio. La Figura 8 muestra la metodología utilizada para recabar la información agrícola de la zona de estudio.



**Figura 8.** Diagrama de flujo de la metodología para recopilar información agrícola en la zona de estudio: una herramienta para identificar y analizar variables relevantes del sector agropecuario.

Se eligió el año 2014 como año base y las bases de datos en Excel se elaboraron con información de la producción, el rendimiento agrícola, las superficies sembrada y cosechada desde el año 2005 al 2018. Se incluyeron datos de años anteriores al año base para asegurar una cobertura histórica completa.

#### 4.4.2 Ganadería

De la misma manera que el sector agrícola, se elaboró una base de datos por municipio en Excel durante el periodo 2005 – 2018 de la ganadería en los Llanos de Apan (Figura 9).

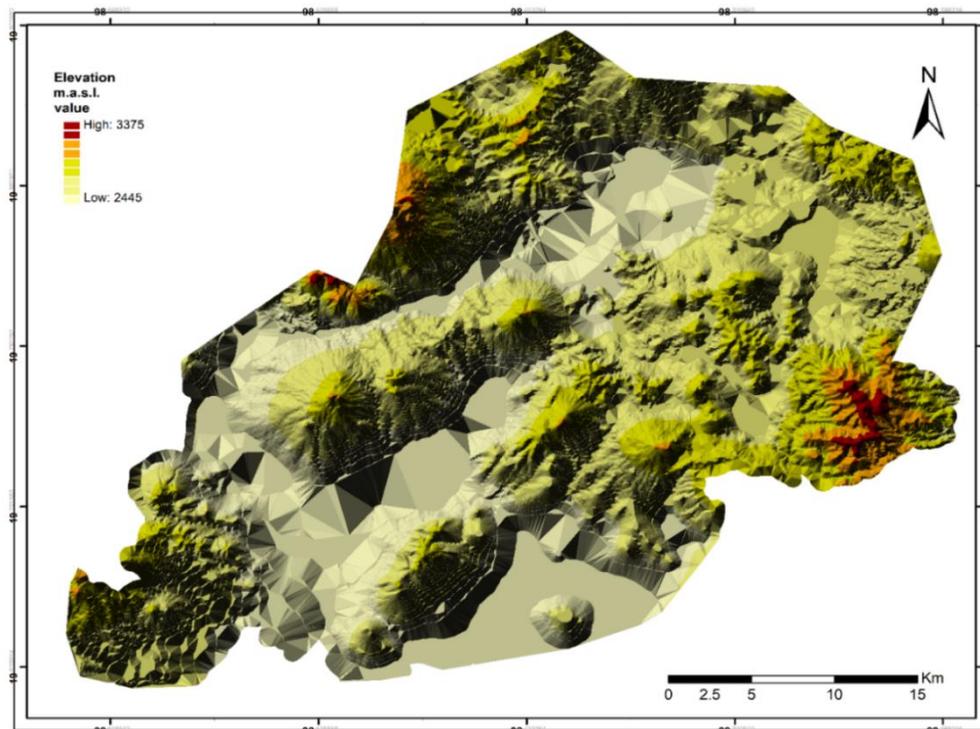


**Figura 9.** Proceso metodológico para la recopilación de información, identificación y análisis de la producción ganadera en los Llanos de Apan.

Esta base de datos se clasificó en tres categorías: ganadería de pie (contabilizada por el número de cabezas), carne en canal y otros productos (huevo y leche). Se utilizaron los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de mapas temáticos que representen la distribución espacial de la ganadería por municipio en los Llanos de Apan que visualizan la distribución y la intensidad de la actividad ganadera en cada municipio. Se identifican patrones de concentración o dispersión de la ganadería, áreas de mayor producción, diferencias entre municipios, entre otros aspectos relevantes, que identifican áreas de oportunidad para mejorar la actividad ganadera.

#### 4.5 Delimitación de subcuencas en la zona de estudio

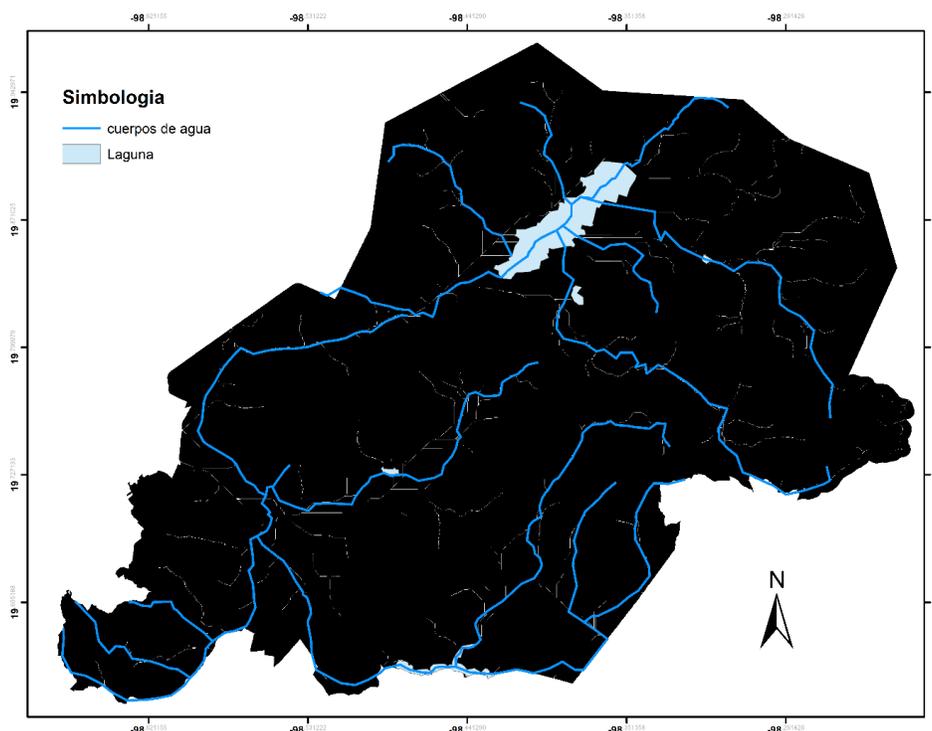
La delimitación por subcuencas en la zona de estudio se llevó a cabo mediante la descarga del Modelo Digital de Elevaciones (DEM) del Estado de Hidalgo, el cual fue obtenido de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Para la delimitación, se utilizaron herramientas de análisis espacial en un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el fin de identificar y mapear las subcuencas presentes en la zona de estudio.



**Figura 10.** Representación cartográfica de la elevación del terreno en los Llanos de Apan. Elaboración propia según el Mapa Digital de Elevaciones (CONABIO, 2013).

A través del uso del programa ArcGIS se obtuvo el Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona de estudio mostrado en la Figura 10 con las alturas máximas en tonos rojizos y las mínimas en amarillo, siendo la máxima de 3375 y la mínima 2445 msnm.

Siguiendo el proceso descrito por Caycho Torres en 2020 (Caycho Torres, 2020), se realizó la división por subcuencas de acuerdo a las direcciones de flujo y acumulaciones de agua. Para lo cual se empleó la herramienta “*Hydrology*” de “*Spatial Analyst*” en ArcGIS, 2010. Se identificaron los ríos principales como se muestra en la Figura 11 y se delimitaron las subcuencas.

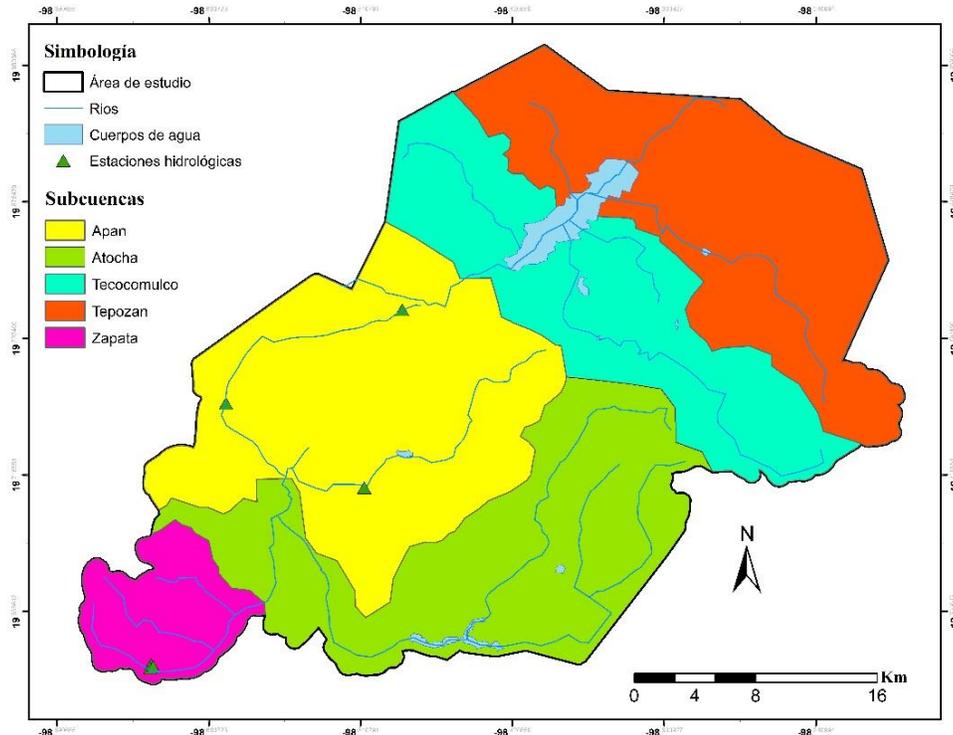


**Figura 11.** Identificación y ubicación de los principales cuerpos de agua y lagos en los Llanos de Apan. Elaboración propia.

Finalmente, se obtuvieron 5 subcuencas dentro de la zona de estudio, a las cuales se les asignó el nombre de acuerdo con el afluente principal. Se generaron mapas vectoriales de cada una de las subcuencas de estudio empleando la herramienta *Clip*, los cuales sirvieron para generar información específica de cada subcuenca (Perez Soriano & Reyes Mondragon, 2022).

La Figura 12 muestra las 5 subcuencas pertenecientes a la zona de los Llanos de Apan: Atocha (verde), Zapata (fucsia), Apan (amarillo) Tecocomulco (azul) y Tepozán (naranja).

Se representan los principales ríos en cada subcuenca, las estaciones hidrométricas y almacenamientos superficiales de agua.



**Figura 12.** Subcuencas del acuífero Apan-Tecocomulco pertenecientes a la zona de estudio. Elaboración propia.

Esto fue de gran importancia para la elaboración de la base de datos de uso de suelo, variables climáticas y sitios de demanda. La finalidad de trabajar con subcuencas permite evitar errores de cálculos por transferencia de agua y hacer análisis más individualizados.

#### 4.6. Definición del año base.

Se eligió un año base que refleje las condiciones hidrológicas típicas en las subcuencas de los Llanos de Apan. Se realizó un análisis de registros históricos de precipitación, caudales y demandas de agua. Se priorizaron los años que mostraron una variabilidad hidrológica moderada y que no estuvieron marcados por eventos extremos, como sequías o inundaciones. El año base seleccionado fue el 2014 debido a que cumple con los criterios de representatividad hidrológica. Este año servirá como base para la calibración y validación del modelo hidrológico en WEAP.

En el proceso de identificación de los años secos, lluviosos y normales, se llevaron a cabo análisis de los datos climatológicos disponibles en los Llanos de Apan. Para definir los años secos, se consideraron los períodos en los que la precipitación anual estuvo

significativamente por debajo de la media histórica. Por otro lado, los años lluviosos se identificaron en función de un aumento considerable en la precipitación anual en comparación con el promedio histórico. Finalmente, los años considerados como normales presentaron un equilibrio manteniéndose cerca de la media. El año 2014 representa un punto de referencia adecuado para calibrar y proyectar el modelo hidrológico utilizando el software WEAP.

#### 4.6 Modelo Matemático con el programa WEAP.

##### 4.6.1 Recopilación de información

Fue indispensable contar con datos precisos y detallados sobre las subcuencas de los Llanos de Apan para la elaboración de un modelo hidrológico utilizando la herramienta WEAP. Se incluye información sobre la topografía, la hidrología, la geología, el clima, el uso del suelo, la población, entre otros aspectos. Estos datos se recopilaron y organizaron en una base de datos, para ser utilizada como entradas para el modelo hidrológico. La tabla 4 presenta la información recopilada para la elaboración del modelo matemático utilizando el programa WEAP. Se utilizó la metodología propuesta por Chamizo et al. (2018) y se modificaron datos para adaptarlo al modelo actual (Chamizo et al., 2018).

**Tabla 4.** Parámetros introducidos al software WEAP para el modelo matemático.

Datos obtenidos	Información necesaria	Método o procesamiento empleado	Fuente de información
<b>Variables de suelo</b>			
Uso de suelo y vegetación (USV) de acuíferos AT	Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional)	Recorte de capas vectoriales y manejo de información de tablas de atributos	(INEGI, 2016)
Zonas agrícolas y principales cultivos para cada municipio perteneciente a los acuíferos AT	Superficie cultivada y cosechada para cada tipo de cultivo en los municipios	Manipulación de la información contenida en archivos de hojas de cálculo de Excel.	(SIAP, 2019)
Coeficiente de cultivo (Kc)	Establecimiento de fechas de siembra y cosecha, valores de Kc para cada cultivo	Elaboración de bases de datos mensuales de Kc.	(Fernández, Velarde, Hernández, & Murguía, 2014)
Máximo rendimiento potencial de los cultivos	Rendimiento máximo potencial de, maíz, frijol, forrajes, cebada, trigo, hortalizas y pasto	Se calcularon los valores anuales de rendimiento potencial máximo para cada cultivo en kg/ha.	(SIAP, 2019)
<b>Variables climáticas</b>			

Precipitación mensual acumulada y Temperatura promedio mensual	Datos de precipitación y temperatura: Extractor Rápido de Información Climatológica	Bases de datos mensuales de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas ubicadas en las subcuencas	(IMTA, 2009)
Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> )	Datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento	Cálculos de ET <sub>o</sub> empleando la Ecuación de Penman – Monteith	(Majidi, Alizadeh, Vazifedoust, Farid, & Ahmadi, 2015)
Precipitación efectiva (Pe)	Datos de precipitación acumulada mensual	Pe = 1–Ki, Ki es la precipitación interceptada por el follaje (0.12)	(Schosinsky, 2006)
Índice de infiltración	Pendiente de las subcuencas	Cálculo del coeficiente de infiltración (Ci):	(Schosinsky & Losilla, 2000)
	Textura del suelo	Ci= (1-0.12) (Kp + Kv + Kfc)	
Índice de escorrentía	Cubierta vegetal	Cálculo de coeficiente de escorrentía (Ce): Ce = 1 – Ci	(Schosinsky & Losilla, 2000)
<b>Sitios de demanda</b>			
Consumo de agua per cápita en m <sup>3</sup> hab <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Población, Volumen de agua concesionado para el sector doméstico	Manejo de información de tablas de atributos de población Consumo per cápita = (Volumen de agua concesionado / número de habitantes) Debido a que no se cuenta con información del consumo de agua para cada tipo de industria, se declara una unidad de producción	(REPD, 2020)
Tasa anual de uso de agua para la industria en Mm <sup>3</sup> km <sup>-2</sup>	Volumen de agua concesionado para la actividad industrial	El riego se calcula dividiendo el volumen de agua concesionado para riego por las áreas de irrigación en km <sup>2</sup>	(CONAGUA, 2013)
Tasa anual de uso de agua para riego en Mm <sup>3</sup> km <sup>-2</sup> .	Volumen de agua concesionado para riego agrícola y área en km <sup>2</sup> de las zonas y distritos de riego	Se declaró una unidad de producción	(Sánchez & Mata Vásquez, 2006)
Tasa anual de uso de agua para el sector servicios	Volumen de agua concesionado para el sector servicios		

Tomado y modificado de (Chamizo et al., 2018)

#### 4.6.2 Diseño del modelo hidrológico-matemático de Los Llanos de Apan

Este modelo se utilizó como base para la herramienta WEAP para desarrollar el modelo matemático que incluye y considera las diferentes clases de cobertura vegetal utilizando la metodología publicada por Estebe et al. (2015). Se calculó el balance hídrico tanto por subcuenca como para los Llanos de Apan en conjunto. La Figura 13 muestra las etapas para el desarrollo del balance hídrico empleando WEAP.



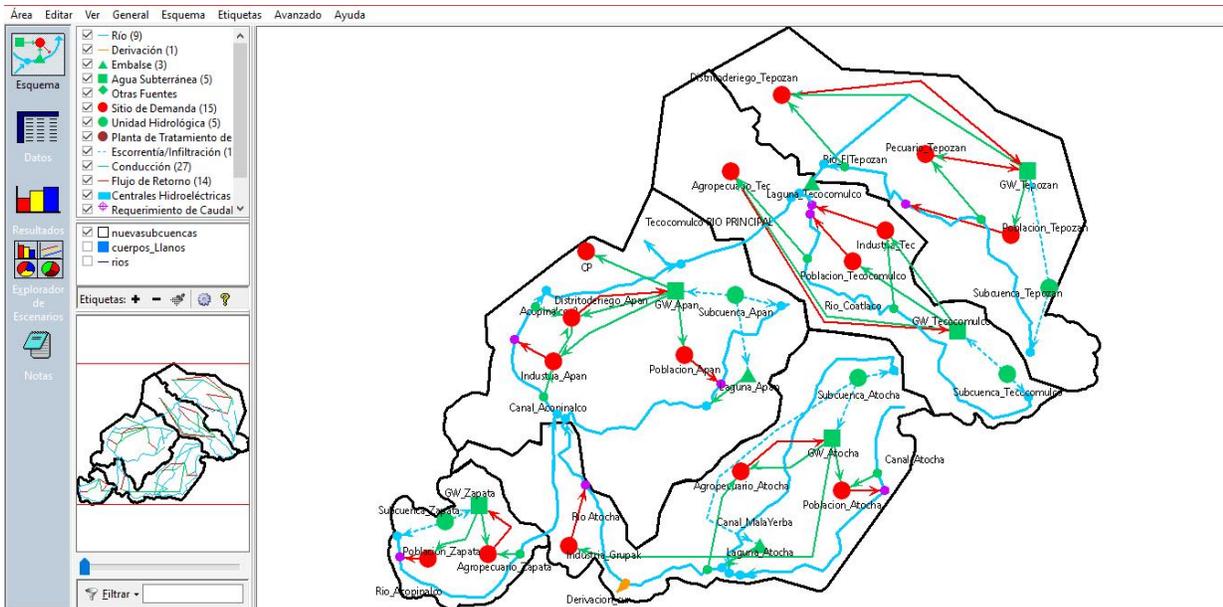
**Figura 13.** Etapas del proceso para la elaboración de balance hídrico en los Llanos de Apan.

En la figura 13 se muestra la metodología para la elaboración de balance hídrico en los Llanos de Apan. Se representa las etapas del proceso para evaluar el balance hídrico en las subcuencas. En las siguientes secciones se describe detalladamente la metodología de la Figura 13.

#### 4.6.3 Esquema base de WEAP

Una vez identificando los límites de área de estudio, se comienza trazando el esquema base en la plataforma de simulación WEAP. El esquema se realiza en una capa de información hidrológica de la cuenca en formato vectorial y declarando las interacciones existentes para el suministro y demanda de agua en la zona. Los datos corresponden al año base 2014.

En este esquema que se elabora en la plataforma de simulación, es importante ubicar los principales aprovechamientos. Esta infraestructura física debe contener: aprovechamientos de agua, como son ríos, embalses, presas, sistemas de regadío, sistemas de distribución de agua potable (subterránea), plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros.



**Figura 14.** Representación esquemática de la zona de estudio para la elaboración del modelo en WEAP.

A través de los mapas elaborados en ArcGIS para la delimitación de la zona de estudio y del modelo conceptual, el esquema con los flujos de entradas y salidas de agua del sistema se representó en la plataforma de WEAP. En la figura 14 se observa la división por subcuencas (línea negra), los afluentes principales (línea azul), la representación de agua subterránea (cuadros verdes), la representación de captación pluvial (círculos verdes), los sitios de demanda de población. Agropecuario e industrial (círculos rojos), lagunas principales (triángulos verdes) y exportaciones de agua (líneas amarillas).

Una vez que se ha terminado el trazado del modelo conceptual en WEAP, se procede a la asignación de valores a las variables del modelo matemático para el año base (2014) mediante el módulo “Datos” (Figura 15). En este módulo hay cuatro opciones para la inserción de datos: Demand Sites and Catchments, Hidrology, Supply and Resources y Water Quality.

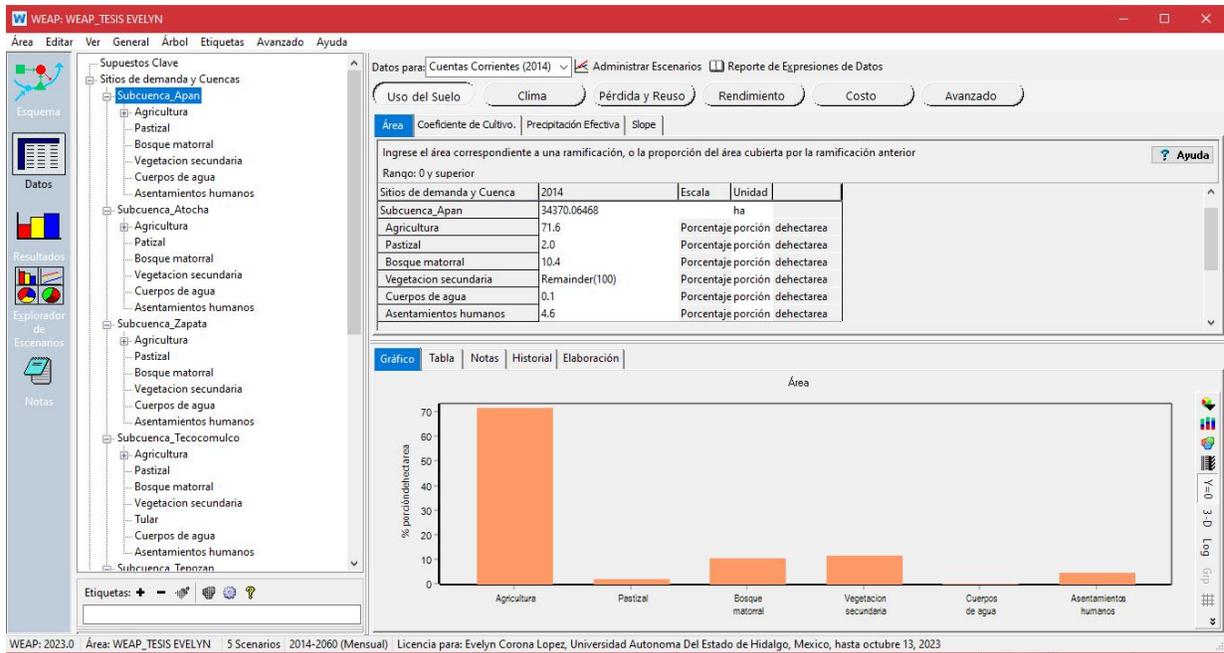


Figura 15. Introducción de datos al modelo de la plataforma WEAP

La Figura 15 muestra el apartado “Datos”, mismos que se describen en las siguientes secciones detalladamente.

#### 4.6.4 Datos de entrada al modelo: Demandas

Los datos de entrada al modelo se dividieron en “demandas” y “recursos y suministros” como se muestra en la Figura 16.

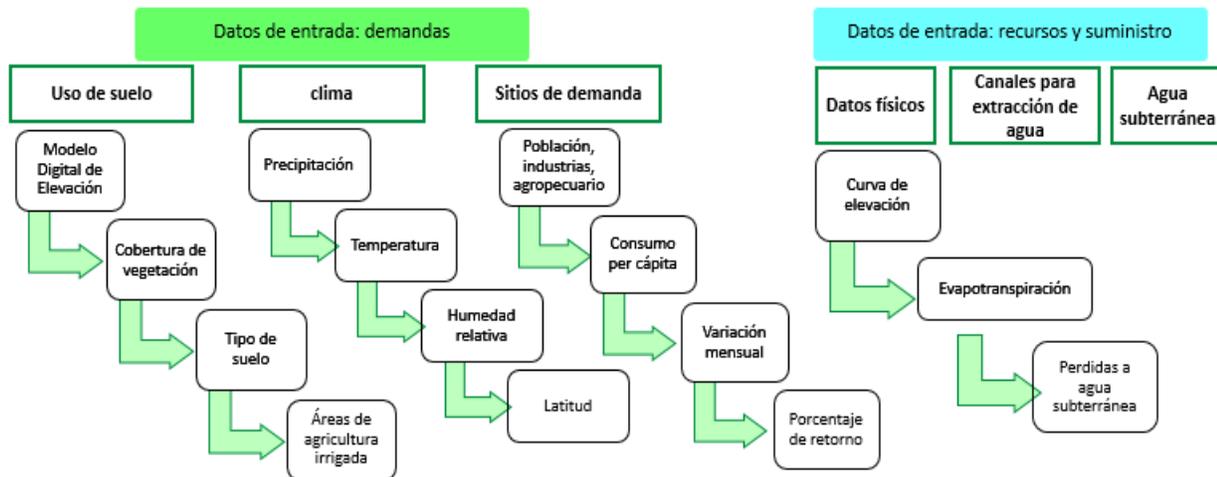
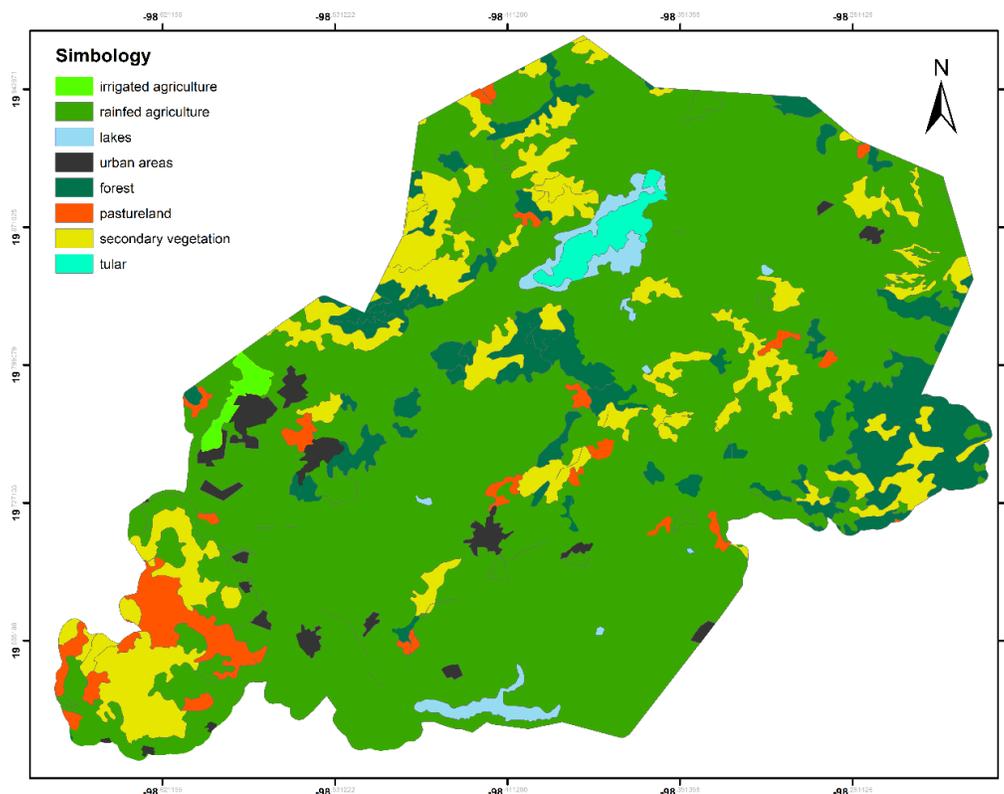


Figura 16. Datos de entrada al programa WEAP.

A. *Uso de suelo*

A través de la elaboración del mapa de uso de suelo y vegetación (Figura 17) en ArcGIS, se obtuvieron los porcentajes de área de uso de suelo para cada subcuenca. En la Figura 17 se observan las áreas de producción agrícola de temporal y riego, cuerpos de agua, zonas urbanas, bosque, pastizal, vegetación secundaria y tular.



**Figura 17.** Distribución espacial de uso de suelo y vegetación en los Llanos de Apan

La Tabla 5 muestra los porcentajes correspondientes a cada clasificación de uso de suelo en cada una de las subcuencas de la zona de estudio.

La subcuenca Apan es la de mayor extensión territorial con 350.25 km<sup>2</sup> y Emiliano Zapata es la subcuenca de menor extensión con 75.53 km<sup>2</sup>. En cada subcuenca predomina la actividad agrícola de temporal.

**Tabla 5.** Porcentajes correspondientes de uso de suelo y vegetación en las subcuencas de los Llanos de Apan.

Subcuenca	S (km <sup>2</sup> )	Zonas habitadas (%)	Agricultura (%)		Pastizal (%)	Bosque/Matorral (%)	Vegetación secundaria (%)	Tular (%)	Cuerpos de agua (%)
			Riego	Temporales					
Apan	350.2	2.6	1.6	70	2	10.4	11.2	0	0.2
Atocha	295.0	1.8	-	89.1	2.6	1	3.2	0	2.3
Tecocomulco	252.1	0.3	-	61.6	0.5	13.3	17.8	3.3	3.2
Tepozán	302.1	0.5	-	71.8	0	14.2	10	1.5	1
Zapata	76.1	0.8	-	37.6	26	0.06	35.4	0	0.14
Total	1275.5	6.0	0.5	68.5	3	7.5	9.7	2.4	2.4

(CONABIO, 2013)

a) *Estimación de los coeficientes de infiltración y escorrentía*

De acuerdo a la metodología descrita por Chamizo (Chamizo et al., 2018) en la que se describe que el "Manual de Instrucciones de Estudios Hidrológicos" (ONU, 1972) propone la ecuación 1 para el cálculo del coeficiente de infiltración, que se define como la fracción de lluvia que aparentemente se infiltra. La ecuación 1 considera las características de la zona, como son: cubierta vegetal, textura del suelo y pendiente (Schosinsky & Losilla, 2000).

$$Ci = Kp + Kv + Kfc \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde Ci: Coeficiente de infiltración. Kp: fracción que se infiltra por efecto de la pendiente. Kv: fracción que se infiltra por efecto de la cobertura vegetal. Kfc: fracción que se infiltra por efecto de la textura del suelo.

Para calcular el coeficiente de infiltración y escorrentía, se descargó el conjunto de datos vectorial de uso de suelo y vegetación y el conjunto de datos de erosión de suelo a escala 1:250000 reportada por INEGI. Estos datos fueron procesados en QGis para la obtención de las texturas de suelo, pendientes y coeficiente de escorrentía. Se consideraron los

parámetros de textura del suelo, y pendiente (Tabla 6); así como la cubierta vegetal descrito anteriormente en el Tabla 5.

La fracción que infiltra por textura de suelo ( $K_{fc}$ ) se valora entre 0.2 a 0.40; a la fracción que infiltra por efecto de la pendiente ( $K_p$ ) se le otorgaron valores entre 0.10 (3-4%). La fracción que infiltra por efecto de la cubierta vegetal ( $K_v$ ) se asignó en 0.10 (terrenos cultivados), 0.18 (cobertura con pastizal) y 0.2 (bosques). La textura de los suelos de las subcuencas de los Llanos de Apan es en su mayoría media y fina. Las pendientes de esta zona varían entre 3.7 y 7.8%, de ahí su característica de ser “Llanos”.

El coeficiente de escorrentía se calculó por diferencia, mediante la ecuación 2, donde  $C_e$ : Coeficiente de escorrentía; y  $C_i$ : Coeficiente de infiltración.

$$C_e = 1 - C_i \quad \text{Ecuación 2}$$

**Tabla 6.** Parámetros requeridos para calcular el coeficiente de escorrentía e infiltración para las subcuencas de los Llanos de Apan.

Subcuencas	Textura del suelo		Pendiente (%)	$K_v$	$K_p$	$K_{fc}$	$C_i$	$C_e$
	Media	Fina						
Apan	21.3	78.7	6.03	0.13	0.1	0.29	0.52	0.48
Atocha	72.1	27.9	3.7	0.22	0.1	0.28	0.6	0.4
Tecocomulco	69.7	30.3	7.8	0.18	0.06	0.31	0.55	0.45
Tepozán	79.2	20.8	6.6	0.18	0.1	0.27	0.55	0.45
Zapata	100	0	4.8	0.16	0.1	0.2	0.46	0.54

(Sánchez-Cohen, Bueno-Hurtado, Esquivel-Arriaga, & Velásquez-Valle, 2015)

$K_v$ = fracción que se infiltra por efecto de la cobertura vegetal,  $K_p$ =fracción que se infiltra por efecto de la pendiente,  $K_{fc}$ = fracción que se infiltra por efecto de la textura del suelo,  $C_i$ = Coeficiente de infiltración,  $C_e$ = coeficiente de escorrentía

*b) Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) y rendimiento máximo de los cultivos*

La Tabla 7 muestra los valores de coeficiente de los cultivos ( $K_c$ ) en los Llanos de Apan y el rendimiento máximo para cada uno. Para la obtención de  $K_c$ , se establecieron las fechas de siembra y cosecha, con la finalidad de identificar etapas de crecimiento y requerimientos hídricos (Sánchez-Cohen et al., 2015).

El rendimiento máximo de cada cultivo se tomó de la base de datos generada en Excel con datos del sistema de información agroalimentaria y pesquera (SIAP) del estado de Hidalgo en un periodo de 2005 a 2018.

**Tabla 7.** Datos de coeficientes de cultivo para las zonas agrícolas de los Llanos de Apan. Elaboración propia

Cultivos	Valores de Kc												Rendimiento máximo anual (t/ha)
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
cebada y avena	0.05	0.05	0.34	0.74	1.31	1.6	1.45	0.88	0.05	0.05	0.05	0.05	2.2
maíz	0.05	0.05	0.05	0.48	0.63	0.94	1.08	1.04	0.92	0.05	0.05	0.05	2.1
hortalizas	0.05	0.05	0.05	0.71	1.02	1.07	0.87	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	1.4
frijol	0.05	0.05	0.05	0.63	1.01	1.01	0.787	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.8
forraje	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	20
pasto	0.5	0.5	0.61	0.75	0.87	0.92	0.93	0.95	0.87	0.8	0.67	0.52	5.5

Kc=coeficiente de cultivo, t= toneladas, ha= hectáreas

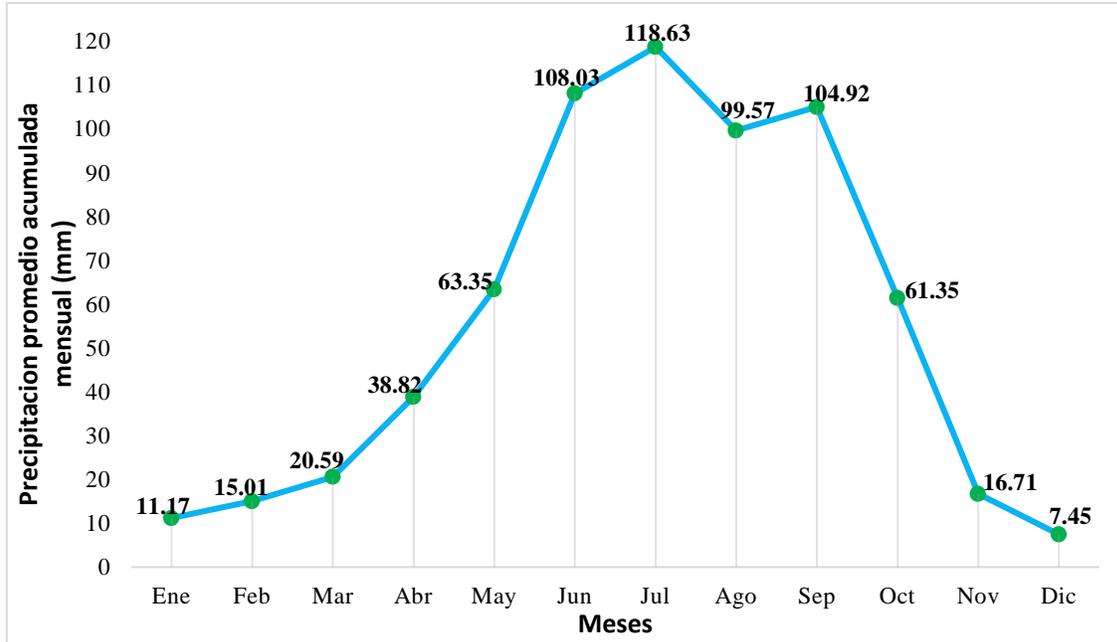
### B. Condiciones climáticas

Para el cálculo de datos de entrada al programa WEAP, se obtuvieron los reportes de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media para cada mes del año, latitud y altitud de 32 normales climatológicas del sistema meteorológico nacional. Con todo lo anterior se realizó una base de datos en Excel, que fue procesada en ArcGIS utilizando un método de interpolación para estimar valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie. Esta técnica también se conoce como interpolación por lámina delgada.

#### a) Precipitación

La precipitación acumulada mensual se obtuvo de la serie de datos históricos desde 1980 a 2010 (Figura 18). Debido a que las estaciones meteorológicas de las subcuencas no contienen información completa para un período mínimo de 20 años, se consideró que la

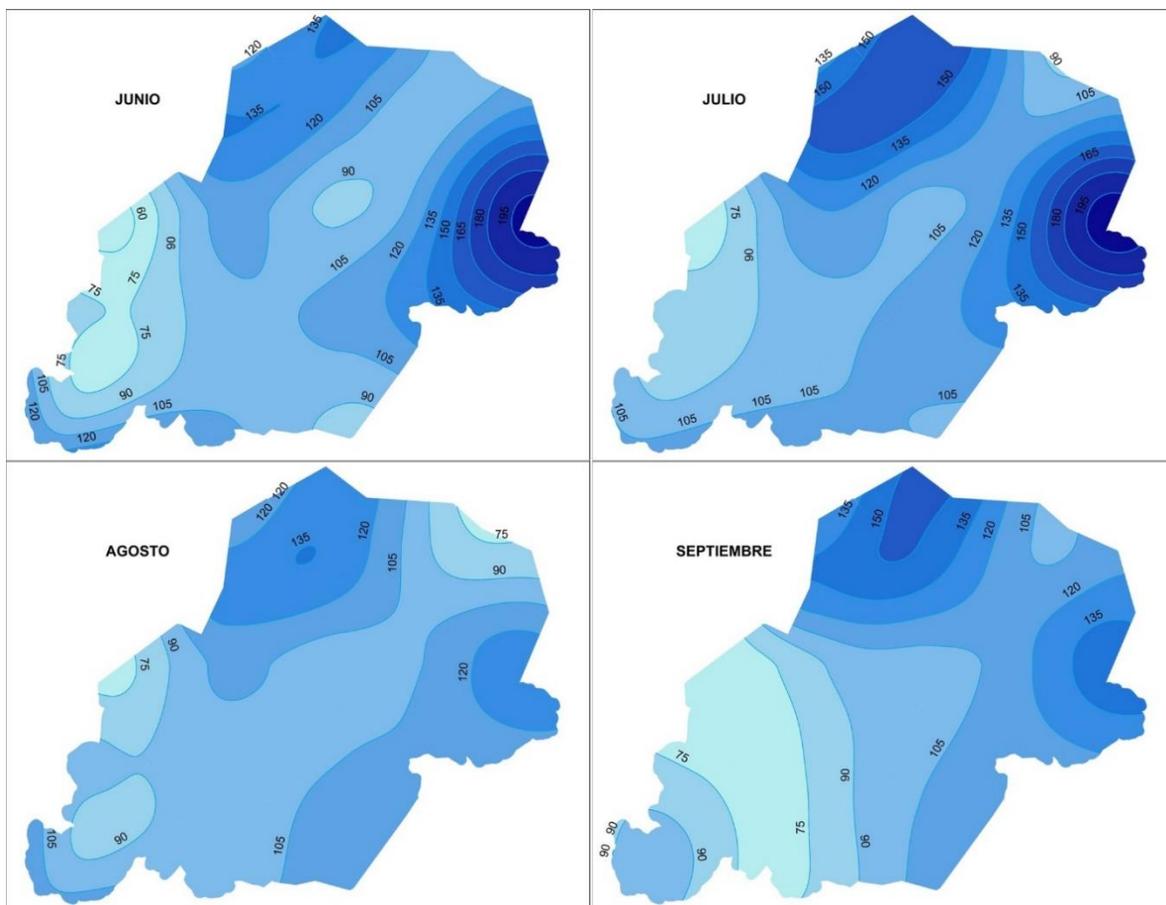
precipitación y la temperatura son homogéneas para las áreas de los Llanos de Apan. En la Figura 18 se puede observar que la mayor parte de la lluvia se presenta en los meses de junio, julio, agosto y septiembre.



**Figura 18.** Comportamiento de la precipitación promedio acumulada mensual en los Llanos de Apan (periodo de 1980 al 2015).

La herramienta WEAP utiliza datos hidrológicos y climáticos para simular y modelar el comportamiento de las subcuencas. Al tener un histórico de precipitaciones, se puede proporcionar información más precisa sobre las condiciones climáticas pasadas y su impacto en el sistema hídrico de las subcuencas. Las estimaciones de precipitación a partir de las interpolaciones se muestran en la Figura 19. Se observan los cuatro meses más representativos (junio - septiembre). Sin embargo, esto se realizó para los 12 meses y se pueden observar las Figuras en el Anexo (A1).

En la Figura 19 se puede observar la variabilidad de precipitación por mes. La precipitación es mayor durante los meses de junio y julio siendo de 572 y 605 mm/mes. En agosto y septiembre las precipitaciones son de 525 mm/mes en promedio. Estas estimaciones de los conjuntos de datos son la base para la evaluación y cuantificación de agua en WEAP. Es importante realizar el cálculo adecuado de la precipitación en el área de estudio debido a que es la única fuente de entrada de agua. A través de los valores de precipitación fue posible evaluar el inicio de los años hidrológicos para cada subcuenca. Esto en base a la comparación de la precipitación y la evapotranspiración.



**Figura 19.** Resultados de interpolación de precipitación mensual en los Llanos de Apan (periodo 1951-2010)

b) *Evapotranspiración (ET<sub>o</sub>)*

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se calculó a partir de la ecuación de Penman-Monteith de la FAO (Ecuación 3), que es un método estandarizado para el cálculo de la ET<sub>o</sub>. La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento (Majid et al., 2020). El enfoque de Penman-Monteith incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor de grandes extensiones de vegetación (Majid et al., 2020).

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

ET<sub>o</sub>: evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>), Δ: pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>), R<sub>n</sub>: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>), G: flujo de

calor del suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $R_a$ : radiación extraterrestre ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $T$ : temperatura media del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$ : velocidad del viento,  $e_s$ : presión de vapor de saturación (kPa),  $e_a$ : presión real de vapor (kPa),  $(e_s - e_a)$ : déficit de presión de vapor (kPa),  $\gamma$ : constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

Los cálculos de evapotranspiración ( $\text{ET}_o$ ) fueron calculados para cada estación meteorológica. En la Tabla 8 se reportan los datos de evapotranspiración de referencia, calculados a partir de la ecuación 3.

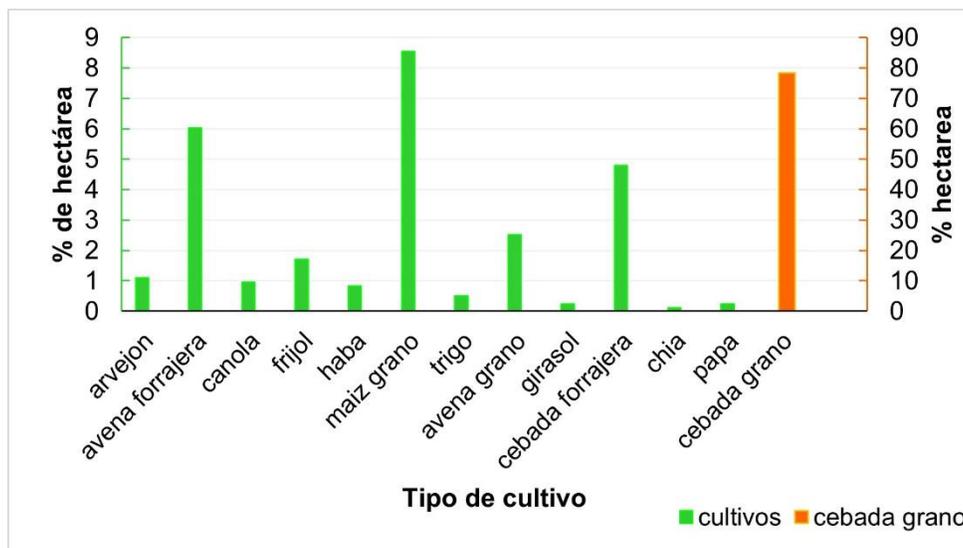
**Tabla 8.** Datos de temperatura ( $T$ ) y evapotranspiración de referencia ( $\text{ET}_o$ ) en los Llanos de Apan. Elaboración propia,

Meses	T mínima ( $^{\circ}\text{C}$ )	T máxima ( $^{\circ}\text{C}$ )	T media ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\text{ET}_o$ (mm/día)	$\text{ET}_o$ (mm/mes)
Enero	-0.6	20.2	9.8	3.0	92.6
Febrero	0.8	21.9	11.3	3.6	101.3
Marzo	2.8	23.9	13.3	4.5	140.0
Abril	5.4	25.3	15.3	5.2	154.6
Mayo	6.8	25.4	16.1	5.3	165.3
Junio	8.3	23.9	16.1	5.0	150.4
Julio	7.9	22.4	15.1	4.6	143.2
Agosto	7.6	22.3	15.0	4.5	139.5
Septiembre	8.0	21.5	14.7	4.2	126.2
Octubre	4.5	21.1	12.8	3.7	113.3
Noviembre	1.9	21.1	11.5	3.2	96.1
Diciembre	-0.2	20.6	10.2	3.5	107.1

Como se observa en la tabla 8, los datos de evapotranspiración son más elevados durante los meses de abril, mayo y junio porque se presentan las temperaturas más altas. Para poder desarrollar el modelo de simulación en WEAP, fue necesaria la obtención de los datos descritos anteriormente.

### C. Sitios de demanda

Las demandas de agua se dividieron en tres sectores principales que son el doméstico, agrícola e industrial. Se elaboraron bases de datos con información del sector agrícola, número de población e industrias, incluyendo el consumo per cápita de agua y la variación mensual.



**Figura 20.** Distribución de uso de suelo agrícola por cultivo en la subcuenca Apan (año base 2014).

Los cultivos que predominan en esta zona son arvejón, avena forrajera, calabacita, canola, cebada, frijol, haba, maíz, trigo, avena grano, girasol, cebada forrajera, maíz forrajero, chí, papa y tomate. Sin embargo, para cada subcuenca, la producción de estos cultivos puede variar.

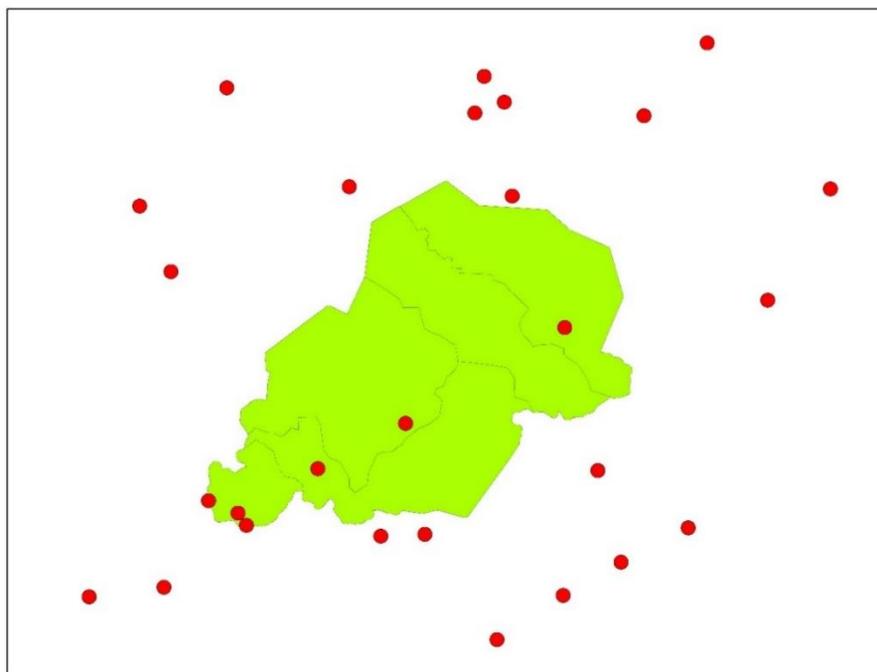
Como se observa en la Figura 20, en la subcuenca Apan los cultivos de cebada, maíz y avena representan los mayores porcentajes con 71.6, 8.5 y 4.7% respectivamente. La superficie correspondiente a cada cultivo se tomó de una base de datos generada en Excel con datos del sistema de información agroalimentaria y pesquera (SIAP) del estado de Hidalgo en un periodo de 2005 a 2018.

#### 4.6.5 Datos de entrada al modelo: Recursos y suministros

Las fuentes de suministro de agua para este estudio se dividieron en superficial y subterránea. El agua superficial en esta zona corresponde a escorrentía de agua de lluvia y aguas residuales que se generan en las subcuencas. El agua subterránea incluye la infiltración de agua de lluvia y los retornos de agua de riego.

#### 4.7 Interpolación para los datos meteorológicos.

Con el uso del programa de sistemas de información geográfica (ArcGIS y QGis), se determinaron los datos de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media, pendiente, coeficiente de infiltración, escorrentía y evapotranspiración. Fue aplicado el método de interpolación con las bases de datos generadas para las 30 estaciones meteorológicas. A través de los datos obtenidos fue posible realizar el análisis para cada subcuenca y determinar el valor de reserva en cada subcuenca.



**Figura 21.** Estaciones meteorológicas elegidas para la interpolación de datos obtenidos de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio.

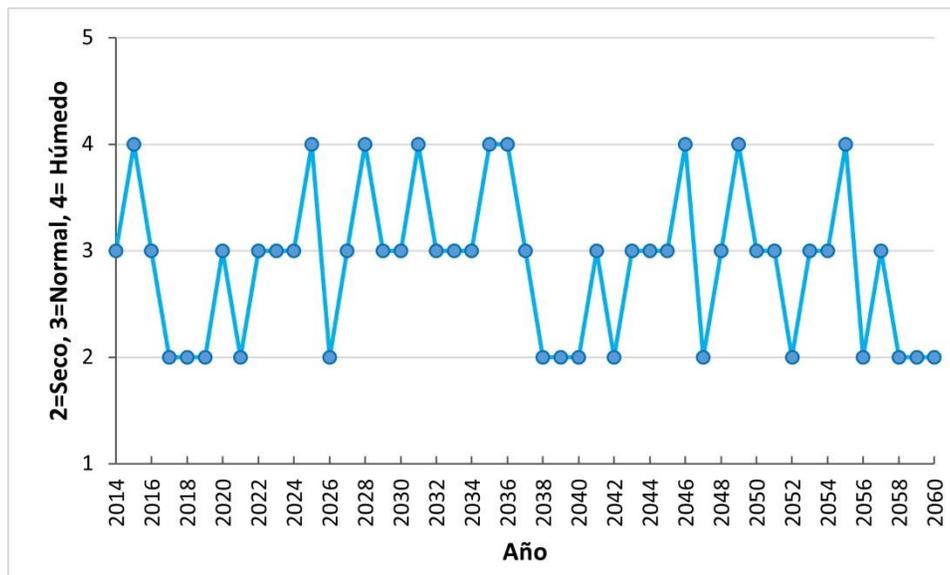
La precipitación (P) es el componente principal del ciclo hidrológico, pero su estimación es la más difícil (Herold et al., 2017). La distribución espacial y temporal de la precipitación es en gran parte desconocida (Immerzeel et al., 2015). La precipitación puede variar enormemente en distancias horizontales cortas debido a los efectos orográficos y la relación

entre altitud y precipitación (Bookhagen y Burbank, 2006). Debido a esto, fue imprescindible tener datos de estaciones meteorológicas que no sólo se incluyeran en el área de estudio. Por lo anterior se eligieron 27 estaciones meteorológicas que se muestran en la Figura 21.

Los reportes de las 27 estaciones meteorológicas (círculos rojos) que fueron utilizadas para la elaboración de la base de datos en Excel. Con los datos de cada una de las estaciones se aplicó el método de interpolación *Spline* en ArcGIS para obtener la precipitación en toda el área de estudio y no solo en los puntos que se encuentran dentro de la zona de estudio.

#### 4.8 Predicción de precipitaciones al 2060

Se realizó un análisis en Excel de las tendencias climáticas históricas y una proyección de las precipitaciones de los Llanos de Apan (Figura 22)



**Figura 22.** Proyección de años normales, secos y húmedos utilizados en los escenarios de los Llanos de Apan.

Estas proyecciones se introdujeron en el modelo WEAP como datos de entrada para los escenarios simulados.

## V. RESULTADOS

### 5.1 Producción alimentaria

En las siguientes secciones se muestran los resultados históricos de la producción agrícola y ganadera en los Llanos de Apan.

#### 5.1.1 Agrícola

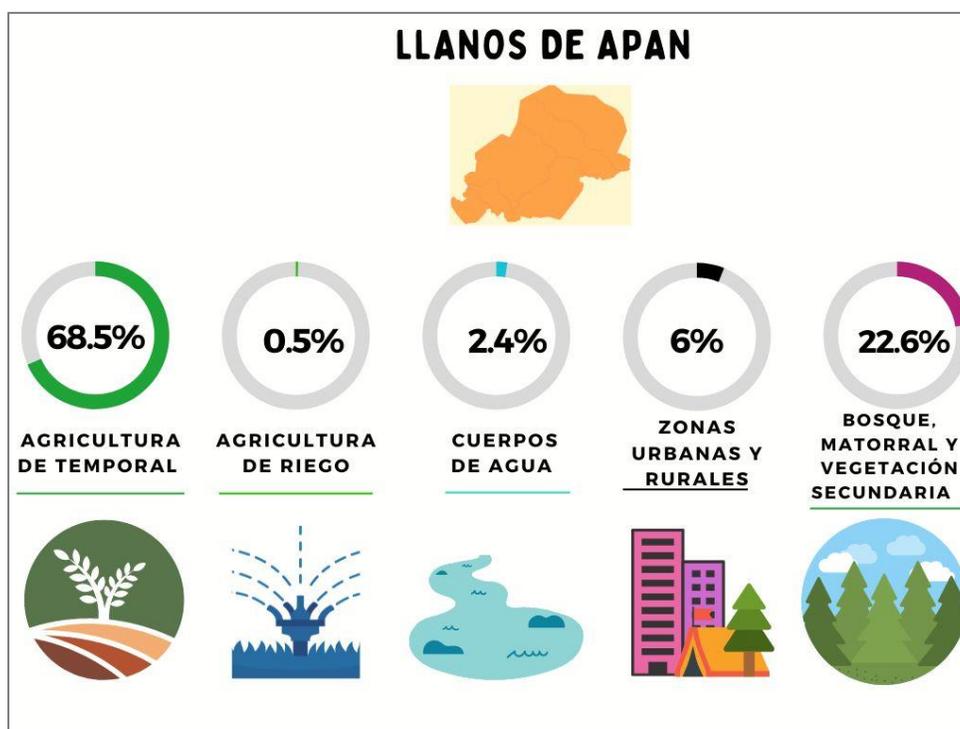
Se realizó una base de datos creando un intervalo de referencia de 2 años: el año base a partir del cual se recabó toda la información (2014) y el último año reportado (2018) en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Los cultivos reportados en el SIAP para los municipios de los Llanos de Apan son 14: cebada grano, avena grano, maíz grano, trigo grano, avena forrajera, maíz forrajero, frijol, arvejón, haba grano, chícharo, chíá, girasol, papa y tomate verde, entre los que destacan los cereales maíz y cebada.

En 2014, de acuerdo con la base de datos generada mediante la información del SIAP, en los Llanos de Apan se reportaron 69,758 ha de superficie agrícola, que en el año 2018 disminuyó a 64,700 ha, resultando una disminución de 7.2%. Probablemente, esta disminución fue a causa del incremento de población que ha derivado la construcción de nuevos fraccionamientos en zonas que eran destinadas a la producción agrícola.

En el año 2018, todos los municipios tuvieron la producción de maíz más alta comparada con los anteriores. Respecto a los cultivos que son de forraje (maíz y avena) y el chícharo sólo se producen en las subcuencas Tepozán y Tecocomulco, reportando la producción más alta en los tres cultivos en este año. Los cultivos que tienen una menor productividad son la papa y chíá.

De acuerdo con la base de datos generada, se encontró que, del total de la producción agrícola, el 98% es de temporal, mientras solo el 2% de riego. En la Figura 2 se muestra la importancia que tiene la agricultura en los Llanos de Apan.

Los resultados presentados muestran una disminución en la superficie agrícola en los Llanos de Apan entre 2014 y 2018, lo cual puede atribuirse al aumento de la población y la urbanización de la zona. Sin embargo, se destaca que la producción de maíz fue más alta en 2018 en comparación con años anteriores, lo que sugiere que la producción de cultivos no necesariamente disminuyó en la misma proporción que la superficie agrícola.



**Figura 23.** Porcentaje de superficie agrícola, cuerpos de agua, zonas urbanas y rurales. (Elaboración propia con datos de INEGI, 2018).

Es fundamental considerar los patrones climáticos debido a que la mayoría de la producción agrícola en los Llanos de Apan es de temporal. Durante el periodo 2014 a 2018 han predominado años normales y secos, estos períodos climáticos pueden haber influido en las variaciones observadas en la producción y el rendimiento de los cultivos. Los años secos con precipitaciones por debajo del promedio podrían haber impactado negativamente en el rendimiento de los cultivos debido a la escasez de agua disponible.

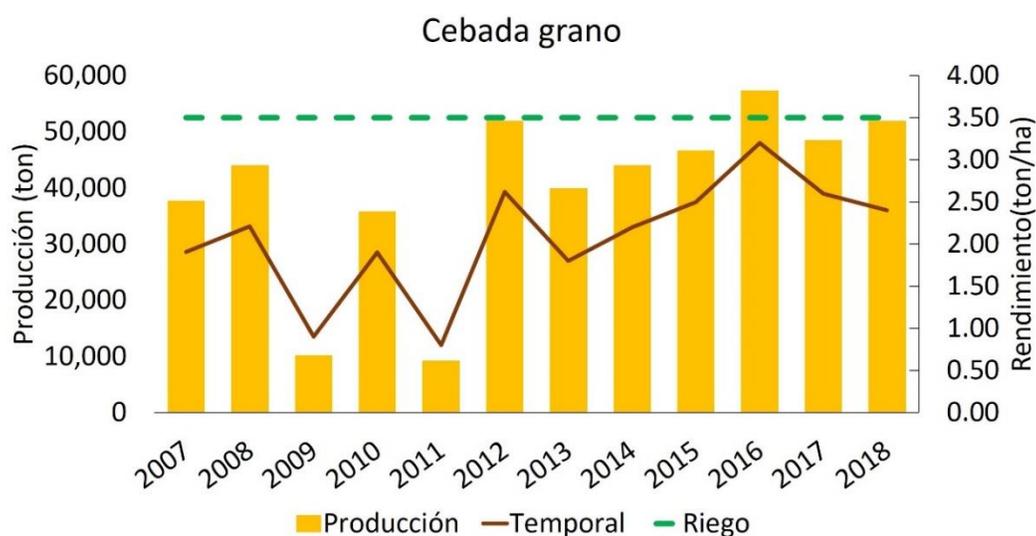
La agricultura de riego representa sólo el 2% de la producción agrícola, lo que sugiere que se necesita una mayor inversión en infraestructura de riego para aumentar la producción de cultivos en la zona. La agricultura de temporal es común en muchas regiones del mundo, especialmente en países en desarrollo sin tecnologías modernas de riego que requieren de la inversión en infraestructura y la adopción de prácticas agrícolas sostenibles para mejorar la productividad agrícola y garantizar la seguridad alimentaria.

La urbanización, la disminución de precipitación, el aumento de temperatura y la presión sobre el uso de suelo agrícola son desafíos comunes en muchos países. Esto destaca la necesidad de planificar y gestionar adecuadamente el uso de suelo para la agricultura. en los Llanos de Apan útiles para la toma de decisiones en el plan de desarrollo de la zona.

## 5.1.1.1 Cebada

A nivel Nacional, de acuerdo al atlas Agroalimentario, Hidalgo es el segundo productor de cebada después de Guanajuato (SAGARPA & SIAP, 2018). Del total de la producción de cebada de temporal en Hidalgo, los Llanos de Apan representan el 65.8% y el resto lo representan los municipios de Zempoala, Singuilucan y Cuauhtepac, principalmente. Esto de acuerdo con la base de datos generada de producción de cebada de temporal en 2018. Sin embargo, la productividad es variable anualmente debido a que las producciones están condicionados a las precipitaciones y temperaturas que se presentan durante el crecimiento de la planta.

El cultivo de cebada de temporal equivale al 99.2% en el área de estudio y el resto es de riego. El rendimiento de cebada-grano de temporal oscila entre 1.52 y 2.95 t/ha. La Figura 24 presenta datos de producción de temporal (barras amarillas), rendimiento de temporal (línea vino) y de riego (línea punteada verde) durante el periodo 2007 a 2018 en los Llanos de Apan. Cabe mencionar que la media del rendimiento estatal es de 3.25 t/ha de cebada grano (SIAP, 2018).



**Figura 24.** Datos de producción y rendimiento en cebada grano de temporal en los municipios que pertenecen a los Llanos de Apan en los años 2007 al 2018.

Fuente: SIAP, 2017.

Aunque el rendimiento de cebada de riego es más elevado comparado con el de temporal, el volumen de la producción es menor. En el análisis histórico de la productividad de los

cultivos se observan disminuciones notables en los años 2009 y 2011 debido a las condiciones climáticas.

Las subcuencas de Atocha, Apan y Tecocomulco representan las mayores producciones de cebada con valores de 23.7%, 21% y 20.9% respectivamente. La subcuenca de Zapata es la de menor producción, representa el 16.4% de la productividad total en los Llanos de Apan para el año 2018. Respecto al rendimiento, los valores se encuentran en un rango de 2.2 y 3.3 t/ha. No obstante, dichos valores de rendimiento se encuentran por debajo de Estados como Querétaro y Jalisco con valores de 6.09 t/ha y 5.24 t/ha respectivamente.

Si en el Estado de Hidalgo se incrementara el rendimiento en cultivo de cebada al nivel de Querétaro (6.09 t/ha), se obtendría una mayor productividad y por lo tanto las ganancias aumentarían más de 1.7 millones de pesos. Es interesante destacar que la región de los Llanos de Apan representa una importante producción de cebada de temporal en el país. Aunque la productividad es variable anualmente debido a las condiciones climáticas, la región sigue siendo un importante proveedor de cebada en el mercado nacional. Esto puede ser una oportunidad para mejorar la productividad y competitividad de la producción de cebada mediante prácticas agrícolas más eficientes y tecnologías innovadoras.

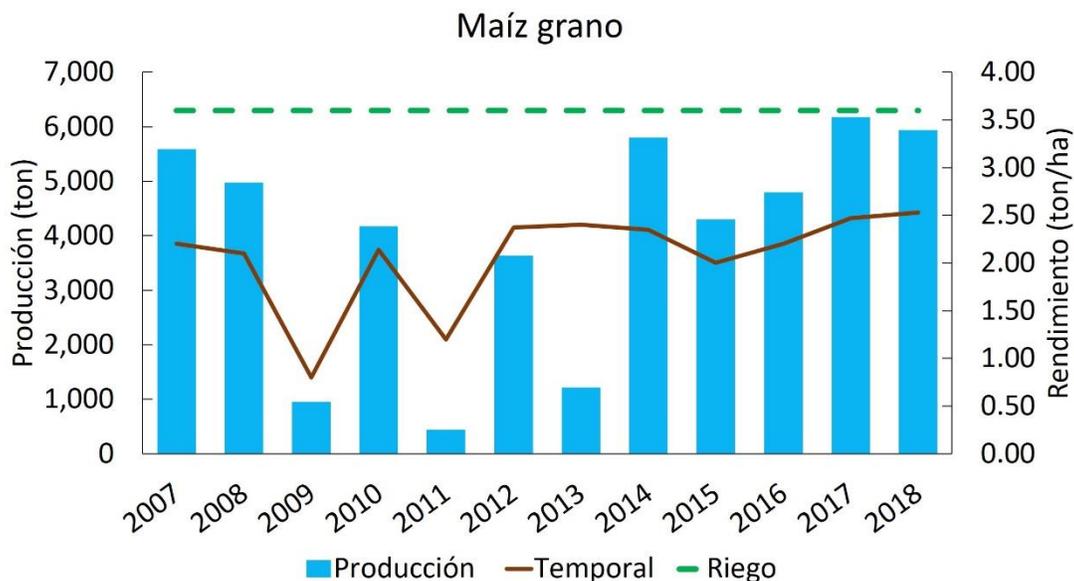
### 5.1.1.2 Maíz

Respecto al maíz, es el segundo cereal más cultivado a nivel mundial (Erenstein, Jaleta, Sonder, Mottaleb, & Prasanna, 2022). A nivel Nacional Hidalgo se posicionó en el lugar número 14 de acuerdo con datos reportados por el SIAP en 2018. Además de la cebada, el maíz es el más cultivado en la región de los Llanos de Apan.

En la región de los Llanos de Apan los rendimientos son variables por cultivo y por subcuenca. A nivel Nacional, de acuerdo con datos del SIAP de 2018, Jalisco tiene el valor más alto en rendimiento con 6.71 t/ha, mientras que Nuevo León presenta el rendimiento más bajo con un valor de 0.52 t/ha.

En la Figura 25 se presentan datos de producción de maíz de temporal (barras azules) y rendimiento en cultivo de temporal (línea vino) y de riego (línea punteada verde) durante el periodo 2007 a 2018 en los Llanos de Apan.

El rendimiento de maíz de temporal oscila entre 0.85 y 2.5 t/ha, este rendimiento se encuentra por encima de la media Estatal, debido a que el rendimiento en Hidalgo para el cultivo de maíz grano de temporal es de 1.39 t/ha.



**Figura 25.** Datos de producción y rendimiento de maíz grano de temporal en los municipios que pertenecen a los Llanos de Apan en los años 2005 y 2018.

Del total de la producción de maíz en los Llanos de Apan, el maíz de riego representa el 10.4%, siendo la subcuenca de Apan la única que produce maíz de riego. Las subcuencas más productivas de maíz de temporal son Tepozán y Apan.

El rendimiento que puede aportar un cultivo probablemente dependa de sus características genéticas de productividad, fisiología y de las condiciones ambientales. Sin embargo, afectara la producción final de cada cultivo, así como el valor monetario de producción final. En la base de datos generada, se contemplaron los valores productivos para cada estado y se ha observado que están directamente relacionados con el rendimiento. Por lo que se cree que las ventajas económicas de riego en la agricultura son elevadas.

Estos resultados de la creación de una base de datos que abarca el periodo comprendido entre 2005 y 2018, permitieron analizar la producción de cultivos y los factores agronómicos en la región de los Llanos de Apan. A través de exhaustivas búsquedas digitales en diversos organismos y sectores relacionados, se recopiló una amplia gama de datos relevantes que nos permitieron evaluar el comportamiento agrícola de la zona a lo largo de estos años. Se tuvo en cuenta una variedad de factores agronómicos, incluyendo el uso de tierras, el rendimiento de los cultivos, los métodos de cultivo, los factores climáticos, los insumos agrícolas utilizados, entre otros.

La base de datos resultante brinda una visión completa de la producción de cultivos en los Llanos de Apan. Esta información es de gran utilidad para los agricultores, investigadores, planificadores agrícolas y otros actores involucrados en el sector agrícola de la región. Los datos recopilados permitirán analizar las tendencias agrícolas a lo largo del tiempo, identificar patrones y factores que influyen en la productividad.

Es importante tener en cuenta que la base de datos está sujeta a ciertas limitaciones, como la disponibilidad de información digitalizada. No obstante, se ha hecho un esfuerzo riguroso para garantizar la confiabilidad y precisión de los datos recopilados.

La información recopilada permitió identificar los principales factores que limitan la producción agrícola, como el agua. Al ser cultivos de temporal la precipitación no es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos. Sin embargo, existen otros factores limitantes como las plagas y el uso de herbicidas, funguicidas y fertilizantes. De acuerdo con las encuestas realizadas a los agricultores, las plagas han afectado en gran parte los cultivos ocasionando una disminución en la productividad. El uso excesivo de herbicidas, plaguicidas y fertilizantes puede disminuir la calidad del suelo, provocando déficit de nutrientes en la planta y por lo tanto un bajo rendimiento. Por lo que la implementación de mejora en las técnicas de cultivo permitirá obtener una mayor productividad y por lo tanto una mayor ganancia económica.

Estos resultados son importantes para la toma de decisiones en el ámbito agrícola y sentará las bases para futuras investigaciones y acciones encaminadas a promover el desarrollo sostenible y la productividad agrícola en los Llanos de Apan.

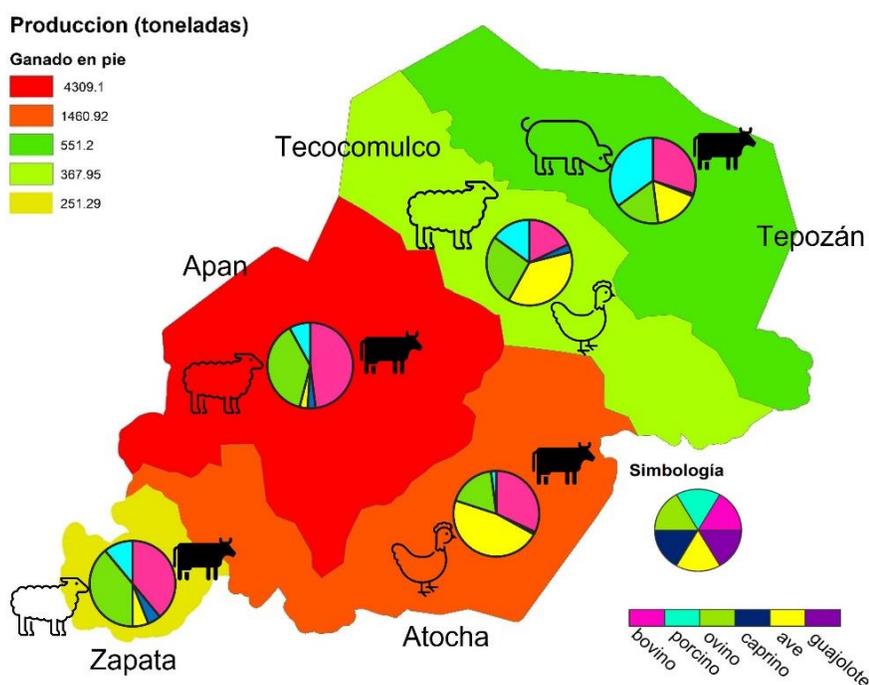
### 5.1.2 Ganadera

Se utilizaron los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de mapas en las tres clasificaciones: ganado en pie, carne en canal y otros productos (leche y huevo). La Figura 26 representa el promedio de producción ganadera durante el periodo 2005-2018 de cada especie por subcuenca.

Se puede observar que la subcuenca de Apan es la más productiva en ganado en pie y Zapata la de menor producción. La especie es variable en cada subcuenca.

La subcuenca de Atocha tiene la mayor producción de ganado bovino en pie. Siendo el año 2015 el de mayor producción con valor de 1,021 t y la menor en el año 2018 con 447 t. La subcuenca Zapata presenta la menor producción de este ganado. Se observa una relación

de la mayor productividad de ganado bovino en el año 2015 para las cinco subcuencas. Dicho aumento de productividad podría estar asociado con la producción de avena forrajera para ese año en la que se observó el mayor rendimiento en Atocha con un valor de 15,300 t/ha.



**Figura 26.** Producción ganadera en pie durante el periodo 2005-2018 en los Llanos de Apan.

A nivel Nacional, el Estado de Hidalgo ocupa el segundo lugar en la producción de ganado ovino. Los Llanos de Apan representan el 12.3% de la producción ovina a nivel Estatal y la subcuenca de Apan representa el 28% de la productividad total de la región. En el año 2014 se observó su valor más alto con 556 t y el valor más bajo en 2018 con 350 t.

Las subcuencas de Apan y Tecocomulco destacan como las principales regiones de producción de ganado porcino en pie, contribuyendo con un 35.5% y 37.5% del total de la producción, respectivamente.

La producción de ganado caprino en pie es mayor en la subcuenca Apan con un promedio de 49 t, presentando el valor más alto en el año 2011 con 58 t y el valor más bajo en el año 2018 con un valor de 35 t.

Respecto a la producción de ave en pie, se observan las mayores producciones en las subcuencas Atocha (45%) y Apan(41%). La productividad total de aves en los Llanos de

Apan es de 1910 t en promedio, comparado con la productividad a nivel Estatal que es de aproximadamente 32 mil toneladas.

El uso de los SIG permitió recopilar y analizar datos geospaciales relevantes para la ganadería de los Llanos de Apan. Mediante la consulta de plataformas digitales y el uso de SIG, se elaboraron mapas con información importante sobre los municipios dedicados a la producción de ganado bovino, ovino, porcino y caprino, así como la producción de aves en la región. Modelación hídrica de los Llanos de Apan.

## 5.2. Situación hídrica de los Llanos de Apan

La producción alimentaria está principalmente ligada a la disponibilidad y manejo del agua en el área de estudio. Debido a que no existen publicaciones que estudien su situación, se procedió al cálculo del balance hídrico de la zona y la perspectiva futura de la misma. Con estos datos podrá valorarse el estado del Nexo Agua-Alimentos, enfocado al sector agrícola.

### 5.2.1. Modelo conceptual

El modelo conceptual de los Llanos de Apan se representa en las figuras 10 a 12 y 14, y además considera los siguientes criterios y supuestos:

- El modelo corresponde al año base 2014.
- Los Llanos de Apan se dividieron en cinco subcuencas según el mapa de elevaciones que se presentan en la Figura 10 teniendo en cuenta las elevaciones, escorrentías y los principales afluentes.
- Cada subcuenca presenta un afluente principal por el cual fluyen las escorrentías de lluvia mezcladas con aguas residuales que se generan en la zona, el área de captación pluvial y los sitios de demanda por sectores.
- La precipitación promedio es de 634.6 mm anuales y la temperatura media anual de 13°C de los Llanos de Apan en el año 2014.
- La corriente principal de Llanos de Apan es el canal Acopinalco, al cual vierten los demás escurrimientos. Este canal fluye de sureste a noroeste, pasando por el municipio de Tepeapulco, para conectar con el Río Tecocomulco, que continua en dirección oeste. (ver Figura 12). Existen los ríos secundarios Mala Yerba y Atocha desembocan en la laguna de San Antonio de Atocha. Además de ésta, existe la

laguna de Tecocomulco, la mayor y más importante de la zona, que actúa como regulador de agua en las subcuencas de Tecocomulco y Tepozán.

- Existen dos acuíferos que se declaran legalmente vedados para el uso agrícola y sólo tienen concesiones para el suministro de la población e industrial.
- Las subcuencas Apan, Atocha y Tepozán presentan la mayor actividad agropecuaria. La subcuenca de Apan contiene industrias con gran demanda de agua subterránea como son la cervecera, la papelera y el parque industrial de Ciudad Sahagún.
- La única fuente principal de suministro de agua es la precipitación que da lugar a la recarga de agua subterránea por infiltración y constituye el recurso hídrico principal del que depende el sector agrícola.
- La evapotranspiración es la principal salida de agua del modelo y existe además un el flujo de agua subterránea con dirección Sureste-Noroeste, hacia el acuífero Cuautitlán-Pachuca. También se considera que la cervecera da lugar a una salida de agua de los Llanos en forma de cerveza.
- Se incorporan al modelo conceptual los retornos de agua que contribuyen a incrementar la infiltración al agua subterránea desde las zonas de irrigación de los sectores pecuarios e industrial.
- La demanda de agua se considera para los sectores: población, agrícola, pecuario, e industrial. En esta región no existen plantas de tratamiento que traten las aguas residuales domésticas, pero las empresas más importantes tienen plantas de tratamiento de aguas residuales que se vierten en los ríos de las subcuencas Apan y Emiliano Zapata.
- Se elige el método de Penman-Monteith para el cálculo de evapotranspiración. No se considera la evapotranspiración de la Laguna de Atocha.
- Existe una pérdida de 40% en el sistema de distribución de agua potable en las zonas urbanas (CONAGUA, 2007).

#### 5.2.2. Modelación matemática del recurso hídrico para el año base 2014

Se cuantificaron los flujos de entrada y salida de agua en cada subcuenca para estimar su disponibilidad. En la Tabla 9 se muestran los resultados de la subcuenca de Apan, sin embargo, el análisis se hizo para las 5 subcuencas y se muestran en el Anexo.

Se obtuvieron los resultados de precipitación, temperaturas, evapotranspiración potencial (ETP), evapotranspiración real (ETR), escorrentía e infiltración. Un resultado negativo en la resta de Precipitación y ETP significa que no se tiene disponibilidad de agua debido a que toda fue evaporada.

**Tabla 9.** Análisis de parámetros hidrológicos para la subcuenca Apan (período 1951-2010).

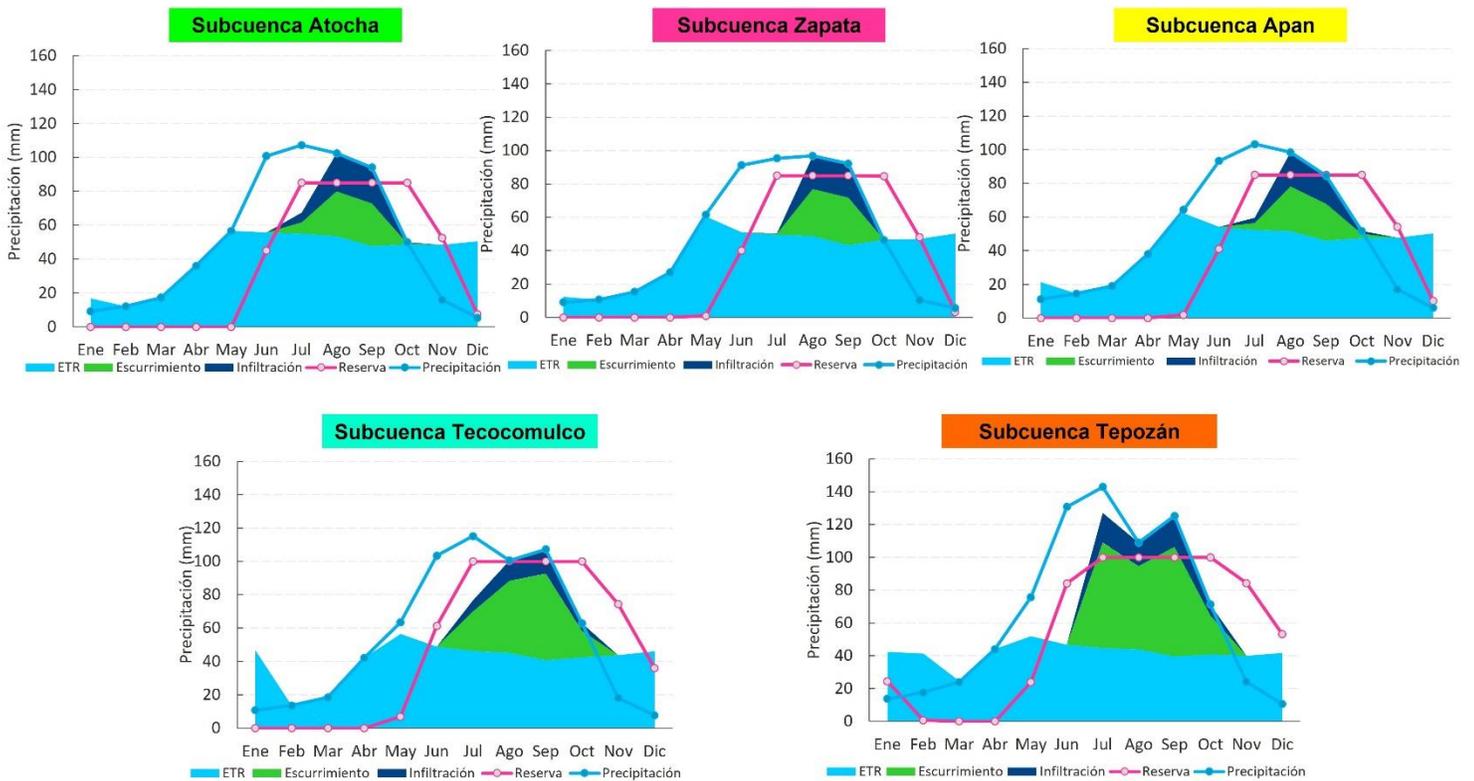
Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>P</b>	11.1	14.6	19.0	38.0	64.3	93.4	103.4	98.5	84.5	51.8	17.1	6.1
<b>T. Máx</b>	21.6	23.4	25.5	26.6	26.4	24.1	22.9	23.1	21.6	21.6	21.1	21.6
<b>T. Med</b>	9.8	11.2	13.0	14.7	15.5	15.2	14.4	14.4	13.7	12.8	11.1	10.3
<b>Temp Mín</b>	-4.2	-3.4	-2.1	1.8	4.4	6.4	6.5	6.6	6.1	3.9	-1.4	-4.4
<b>ETP</b>	50.1	49.3	60.3	60.8	62.4	54.2	52.4	51.6	45.9	47.6	47.8	50.2
<b>P-ETP</b>	-39.0	-34.7	-41.3	-22.8	1.9	39.2	51.0	46.9	38.6	4.2	-30.7	-44.1
<b>Reserva</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	41.1	85.0	85.0	85.0	85.0	54.3	10.2
<b>VR</b>	-10.2	0.0	0.0	0.0	1.9	39.2	43.9	0.0	0.0	0.0	-30.7	-44.1
<b>Excedente</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	46.9	38.6	4.2	0.0	0.0
<b>Déficit</b>	-28.8	-34.7	-41.3	-22.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>ETR</b>	21.3	14.6	19.0	38.0	62.4	54.2	52.4	51.6	45.9	47.6	47.8	50.2
<b>Esc</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	26.6	21.9	2.4	0.0	0.0
<b>I</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	20.3	16.7	1.8	0.0	0.0
<b>ETR+Esc+I</b>	11.1	14.6	19.0	38.0	64.3	93.4	103.4	98.5	84.5	51.8	17.1	6.1

P= precipitación, T. Max= temperatura máxima, T. Med= temperatura media, T. Mín.=temperatura mínima, ETP= evapotranspiración potencial, ETR= evapotranspiración real, Esc= escorrentía, Inf= infiltración.

Como ejemplo se tiene que si en el mes de enero llueven 11.13 mm como se presenta en la Tabla 9, toda esa cantidad de agua se evapotranspiraría por las condiciones de la región y los valores de ETP. En la Figura 27 se observa la representación gráfica de la Tabla 9 para cada subcuenca.

En la subcuenca Apan se observa que durante el periodo de junio a octubre la precipitación es más elevada que la capacidad que hay en el medio de evaporarse. Por lo que el año hidrológico comienza en junio a diferencia de las 4 subcuencas restantes en las que el inicio es en mayo. A partir del mes de mayo y junio puede establecerse un valor de reserva, estos valores se establecen en base al reporte y características de la zona. Con el análisis anterior se determinaron los porcentajes de evapotranspiración real, escorrentía e infiltración de cada subcuenca.

En la Figura 27 se presenta: el volumen de precipitación (línea azul), reserva (línea rosa), ETR (área turquesa), escorrentía (área verde) e infiltración (área azul oscuro) para cada subcuenca perteneciente a la región de los Llanos de Apan. A través de este análisis se determina el comienzo del año hidrológico, que para las 5 subcuencas varían ligeramente entre el mes de mayo y junio. Esto, debido a que en estos meses la precipitación es mayor que la evapotranspiración. Es decir, el año hidrológico de las subcuencas que comienza en mayo finaliza en abril y cuando comienza en junio finaliza en mayo



**Figura 27.** Análisis de ETR, escorrentía, infiltración y precipitación en cada subcuenca perteneciente a los Llanos de Apan.

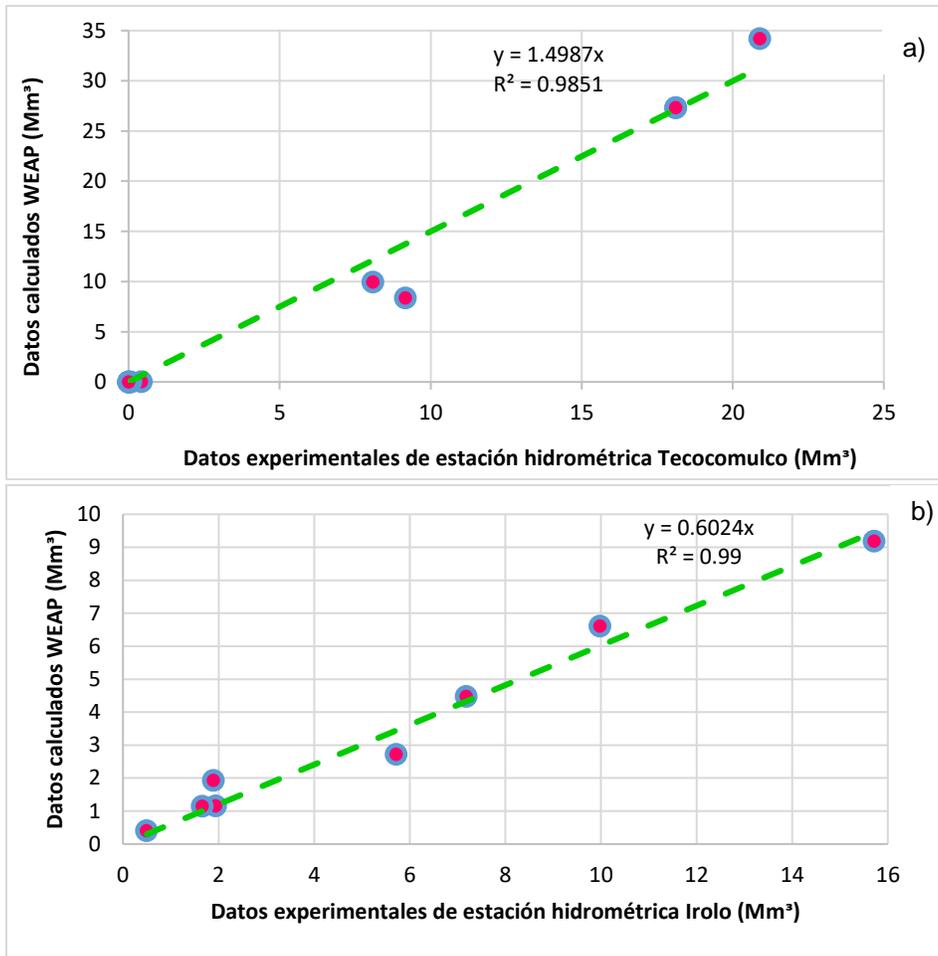
Se observa que durante el periodo enero-abril, no existe infiltración debido a la baja precipitación y alta evapotranspiración. Como se mencionó en el ejemplo anterior, toda el agua que precipita es evapotranspirada. En mayo la cantidad de agua es mayor que la cantidad de agua que pueda evaporarse, por ello se establece la reserva (línea rosa) y el excedente es repartido de acuerdo con los porcentajes de infiltración y escurrimiento de cada subcuenca. Este fenómeno deja de suceder en noviembre porque la cantidad de precipitación es menor que la evapotranspiración. Este análisis es de suma importancia para alimentar los datos de entrada al programa WEAP.

### 5.2.3 Validación del modelo matemático.

El modelo de simulación fue validado antes de analizar los impactos en escenarios futuros. Esto con la finalidad de asegurar que el modelo tiene la capacidad de representar correctamente la realidad del área de estudio. Fueron comparados los datos simulados en WEAP con los datos experimentales de dos estaciones hidrométricas ubicada en la zona de estudio. Se compararon los datos del canal Tecocomulco y Acopinalco con datos de las estaciones hidrométricas Tecocomulco (26347) e Irolo (26361) respectivamente. La figura 28 muestra esta relación entre datos calculados y datos experimentales.

Existe una correlación lineal significativa entre los caudales calculados y los datos experimentales del canal Tecocomulco ( $R^2 = 0.9851$ ) y Acopinalco ( $R^2 = 0.99$ ).

La calibración del modelo matemático demuestra que reproduce adecuadamente los datos reales para el año base 2014 y por tanto, se pueden calcular las interacciones hidrológicas de los Llanos de Apan y el balance hídrico para este año y diferentes escenarios futuros que contemplen nuevas condiciones climáticas y acciones de adaptación.



**Figura 28.** Correlación entre valores de caudales mensuales de las estaciones hidrométricas Tecocomulco(n=6) e Irolo (n=8) y los caudales calculados con la herramienta WEAP (período 2014)

#### 5.2.4 Cálculo del balance hídrico en el año base 2014.

##### a) Fuentes y caudales de abastecimiento de agua.

Los resultados de balance hídrico por subcuencas de los Llanos de Apan se muestran en la figura 29. La precipitación total de los Llanos es de 809.3 hm<sup>3</sup>. La subcuenca que recibe más lluvia es Tepozán y en menor medida es Zapata por las dimensiones de cada una. Se observan valores de infiltración entre 13% y 29% de la precipitación total, debido a las características físicas del suelo y las pendientes de las subcuencas.

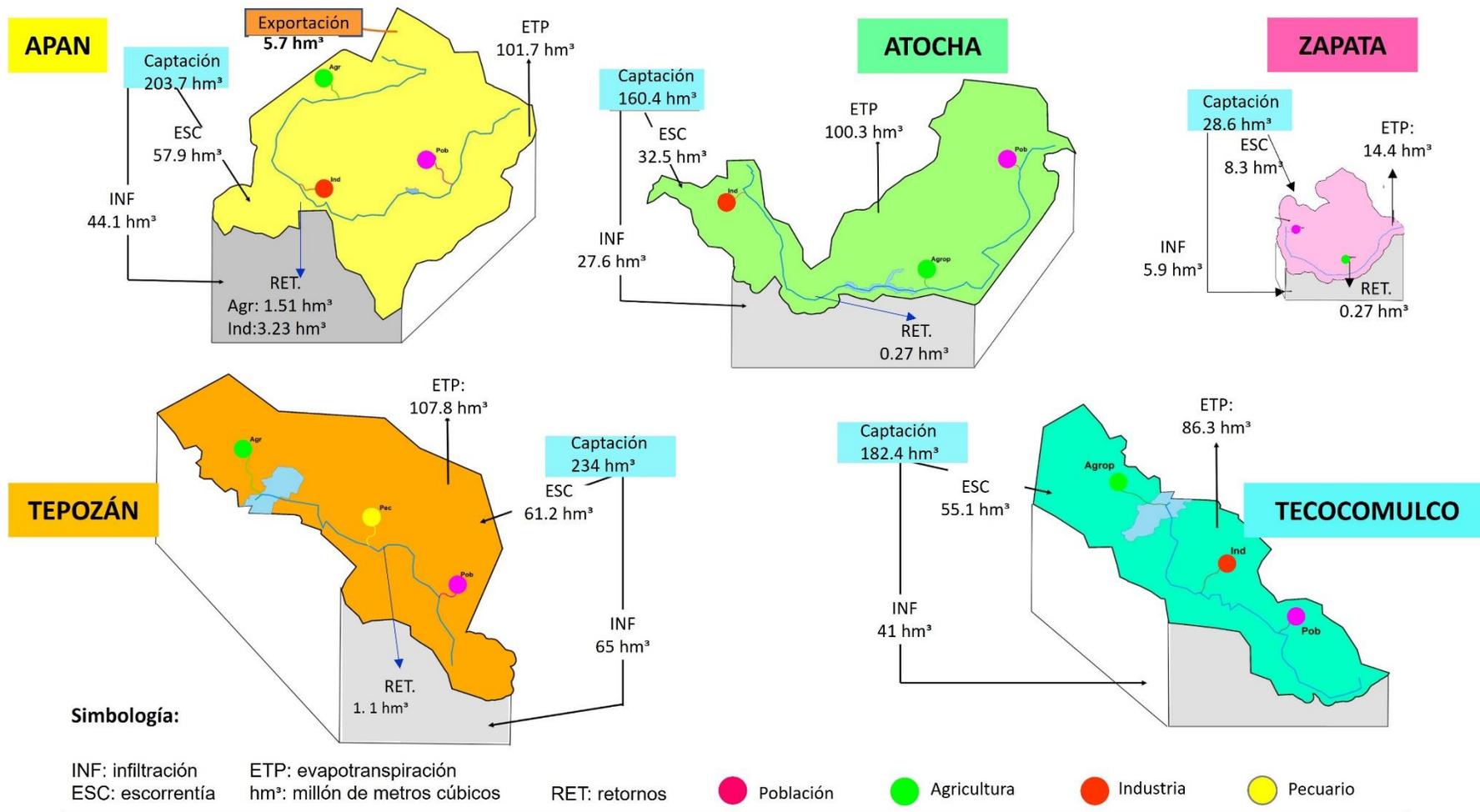


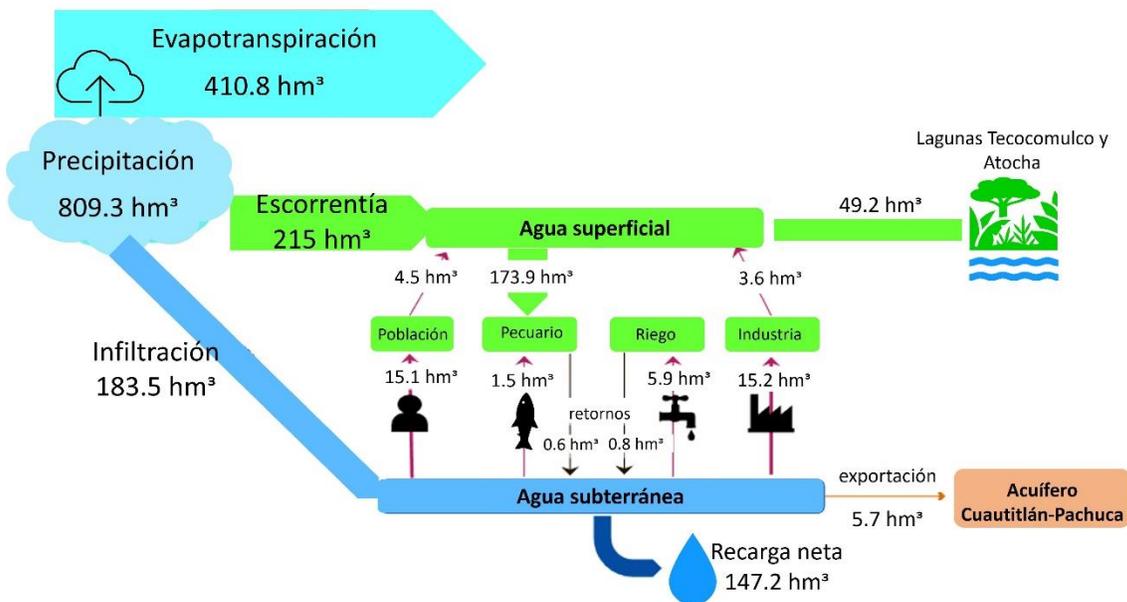
Figura 29. Balance hídrico de las cinco subcuencas pertenecientes a la zona de estudio

Los porcentajes de evapotranspiración oscilan entre 48.2% (Tepozán) y 66.4% (Atocha). La infiltración de agua y retornos de agua de riego contribuyen a la recarga natural de agua subterránea. El agua superficial incluye la escorrentía de agua de lluvia y los retornos de aguas residuales de las subcuencas, no existen importaciones de agua en las subcuencas. Solo existe agricultura de riego en las subcuencas Apan y Atocha con un 4-8% de todo el territorio, en donde se encuentran dos distritos de riego.

Las diferencias entre ellas, además del área y las condiciones climáticas, son debidas al desarrollo económico. Por ejemplo, la subcuenca de Apan tiene el mayor porcentaje de uso de agua industrial, seguida de Atocha. Aunque en todas las subcuencas se desarrollan actividades agrícolas y ganaderas, las subcuencas Tecocomulco, Tepozán y Atocha se destacan por sus actividades pecuarias.

Debido a que las actividades económicas y la población demandan porcentajes diferentes de agua, la subcuenca de Apan tiene el mayor estrés hídrico debido al mayor desarrollo industrial, agrícola y crecimiento poblacional.

Los resultados de balance hídrico general de toda la zona se representaron a través de diagramas de Sankey, donde el ancho de cada flujo es proporcional al volumen de cada tipo de recurso hídrico. En la Figura 30 se muestra el diagrama de Sankey para el balance hídrico de la zona de estudio con la desagregación por sectores.



**Figura 30.** Implicaciones hidrológicas de los Llanos de Apan para el año base 2014

En la Figura 30 se representan los flujos principales en los Llanos de Apan. La principal fuente de suministro para los Llanos de Apan es la precipitación ( $809.3 \text{ hm}^3$ ). No existen importaciones de agua y la evapotranspiración es el flujo de salida más importante con  $410.8 \text{ hm}^3$ , seguido de la exportación de agua hacia el acuífero Cuautitlán-Pachuca con  $5.7 \text{ hm}^3$ . La escorrentía es de  $215 \text{ hm}^3$  vertiéndose hacia los ríos y arroyos que se dirigen hacia la laguna de Tecocomulco y otros reservorios menores. La infiltración de  $183.5 \text{ hm}^3$  constituye la principal recarga de los acuíferos. Los flujos internos corresponden al sector poblacional, agropecuario e industrial. El balance de aguas subterráneas calcula una recarga neta de  $147.2 \text{ hm}^3$  anuales y por lo tanto, no es un acuífero sobreexplotado en el 2014, ya que aún no está en marcha la industria cervecera.

Las escorrentías suministran agua a los reservorios y lagunas a través del canal Apan-Atocha y el río Acopinalco con beneficios y desventajas. Las lagunas actúan como almacenamiento beneficioso para momentos de escasez y para mantener el equilibrio ecológico. Sin embargo, no se le da un uso específico a este recurso, que puede ser un aporte en la disponibilidad de agua para otros fines. El agua superficial de la zona puede ser utilizada para una variedad de propósitos, pero principalmente como riego agrícola, ya que actualmente se destina a recreación y mantenimiento de ecosistemas acuáticos. Para maximizar su uso, es importante implementar prácticas de gestión sostenible del agua, como el reúso y el tratamiento adecuado de las aguas residuales.

Debido a la veda del acuífero, es importante analizar el agua subterránea, generalmente más limpia en comparación con el agua superficial y por ello es la fuente principal de las actividades domésticas e industriales y de las áreas pobladas de los Llanos de Apan. Evaluarla a corto, mediano y largo plazo permite comprender su disponibilidad y gestionarla de manera sostenible, considerando la recarga de los acuíferos, las tasas de extracción por el aumento de la población e industrias que pueda llevar a la sobreexplotación del acuífero a largo plazo.

### 5.3 Simulación de escenarios

Con el uso de WEAP, se evaluó y analizó el recurso hídrico de las subcuencas y de toda la región de los Llanos de Apan que incluyen los acuíferos Apan-Tecocomulco en los siguientes escenarios:

- Escenario inercial (Business as Usual- BAU)
- Escenario de cambios climáticos (CC),
- Escenario del cambio de uso de suelo a urbano (CUS)
- Escenario de adaptación con propuestas de mejoras en el uso del agua.

Se consideraron las demandas de agua en los sectores urbano, industrial y agropecuario. Y además la proyección de los años lluviosos, normales y secos hasta el 2060.

En la siguiente sección se presentan los principales resultados del comportamiento dinámico hasta el 2060 para los cuatro escenarios mencionados.

### 5.3.1 Escenario 1: Inercial (BAU)

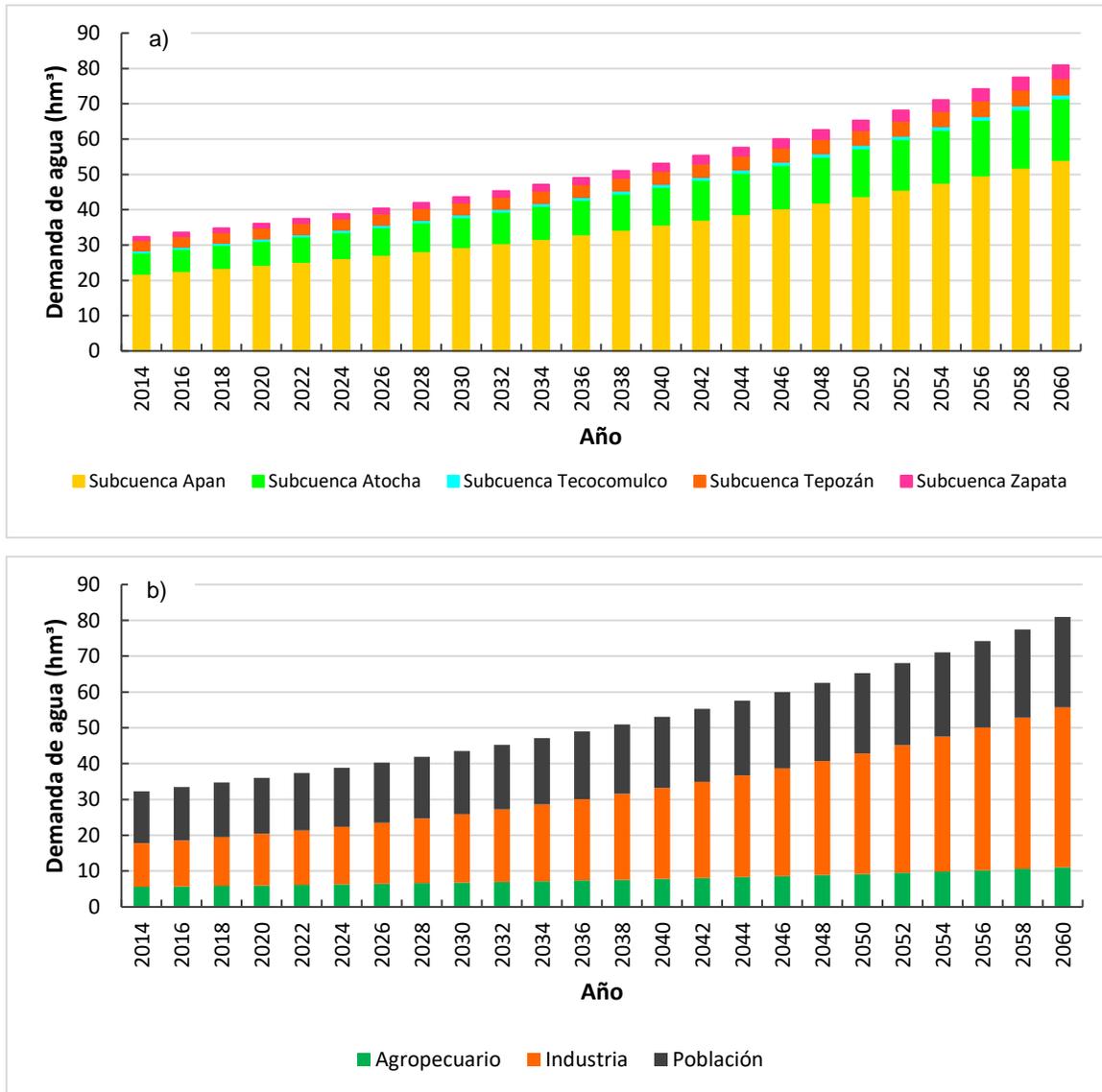
Este escenario inercial considera las tendencias actuales de demanda de agua agravadas por el crecimiento inercial de los sectores poblacional, agropecuario e industrial, sin que se considere ningún otro cambio y por eso es llamado habitualmente BAU (Business as Usual). Por lo tanto, este escenario inercial considera que no cambia la precipitación, ni la evapotranspiración. No obstante, se incluye la puesta en marcha de la cervecera en la subcuenca Apan que inició el año 2017 e introduce un aumento de la demanda de agua subterránea y una salida de agua del sistema en forma de cerveza exportada.

#### -Agua subterránea

En las subcuencas de los Llanos de Apan se encuentran ubicados dos acuíferos: Apan y Tecocomulco. El acuífero de Apan tiene una veda por tiempo indefinido y sólo se permite la extracción de agua para uso doméstico (CONAGUA, 2013). Además, se presenta un flujo subterráneo con dirección Sureste-Noroeste, hacia el acuífero Cuautitlán-Pachuca. La figura 31a) muestra la demanda de agua subterránea por subcuenca, la 32b) para los sectores agropecuario, poblacional e industrial.

En la Figura 31(a) se observa que la subcuenca de Apan es la que demanda el mayor porcentaje de agua subterránea. En 2060 las subcuencas Apan y Atocha serán las de mayor consumo de agua de los Llanos de Apan con 67.6 y 21.5% respectivamente por ser las más pobladas y desarrolladas industrialmente. Seguidas de Tecocomulco, Tepozán y Zapata. En la Figura 31(b) se representa el consumo de agua por sectores, las demandas inerciales crecerán 150.4% en 2060. Las necesidades de la población, sector agropecuario e industrial aumentaran 73%, 98% y 266% respectivamente para el año 2060. Esto coincide con lo reportado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) en

2016 (CEPAL, 2016).



**Figura 31.** Demandas de agua subterránea en los Llanos de Apan (a) por subcuenca y (b) por tipo de sector.

El sector poblacional presentará un aumento como resultado de las variaciones socioeconómicas por lo que la demanda de agua aumentará a medida que crezca la población y los sectores económicos de la región. Esto coincide con lo reportado por Galindo, (2004) en el cual se describe que existe una relación entre la urbanización y el crecimiento económico (Galindo, Escalante, & Asuad, 2004). El sector industrial es el que demandará el mayor porcentaje de agua a corto y mediano plazo.

Se mostraron las implicaciones de un crecimiento desigual entre los diferentes sectores en

términos de presión sobre los recursos hídricos. Cuando el sector poblacional e industrial tienen una mayor tasa de crecimiento que el sector agrícola, pueden existir varias implicaciones importantes para la gestión del agua y la seguridad alimentaria.

En primer lugar, una mayor demanda de agua por parte de los sectores poblacional e industrial puede ejercer una presión adicional sobre los recursos hídricos, lo que aumentará el riesgo de escasez de agua y presión sobre las fuentes de agua subterránea (Lu, Ji, Hou, Ma, & Mao, 2022). Si la oferta de agua no se distribuye de manera adecuada para satisfacer esta demanda creciente, es probable que haya una mayor competencia por los recursos hídricos y se produzcan conflictos entre los distintos usuarios.

En segundo lugar, el sector agrícola, al tener una tasa de crecimiento más baja que los otros sectores, ocasionará una disminución de la productividad de las cosechas. La agricultura de temporal ocupa un 98% del total de este sector y se requiere infraestructuras y tecnologías eficiente de riego para no afectar las fuentes de empleo agrícolas ni el suministro de alimentos. En tercer lugar, el mayor crecimiento en los sectores poblacional e industrial podría aumentar la contaminación del agua afectando su calidad y la salud humana.

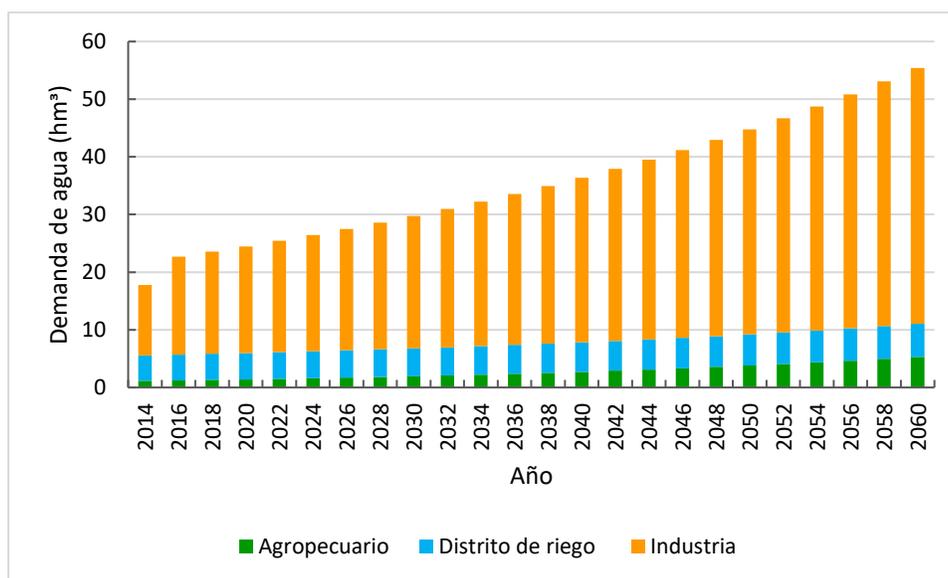
Este escenario proyecta un aumento significativo en la demanda de agua subterránea principalmente, aunque en estas condiciones negativas, el acuífero aún presenta una recarga neta positiva.

### -Agua superficial

Se presentan las proyecciones de demanda de agua superficial principalmente para el sector agropecuario y menor en el sector industrial y distrito de riego en el escenario inercial. En la Figura 32 se muestran los resultados de demanda de agua superficial para estos sectores durante el periodo de 2014 a 2060.

Los volúmenes de demanda son menores que los del agua subterránea, a pesar de la veda del acuífero. En el sector agrícola, se observa un crecimiento constante a lo largo del tiempo, con un aumento significativo de 1.2 hm<sup>3</sup> en 2014 a 5.3 hm<sup>3</sup> en 2060. El distrito de riego también mostró un crecimiento continuo, aunque a un ritmo más lento, pasando de 4.4 hm<sup>3</sup> en 2014 a 5.7 hm<sup>3</sup> en 2060. Por otro lado, la demanda industrial experimentó un crecimiento más pronunciado, pasando de 12.2 hm<sup>3</sup> en 2014 a 44.4 hm<sup>3</sup> en 2060. El aumento constante en la demanda de agua para la industria plantea el riesgo de escasez

de agua y puede afectar la producción de alimentos (Liu et al., 2022).



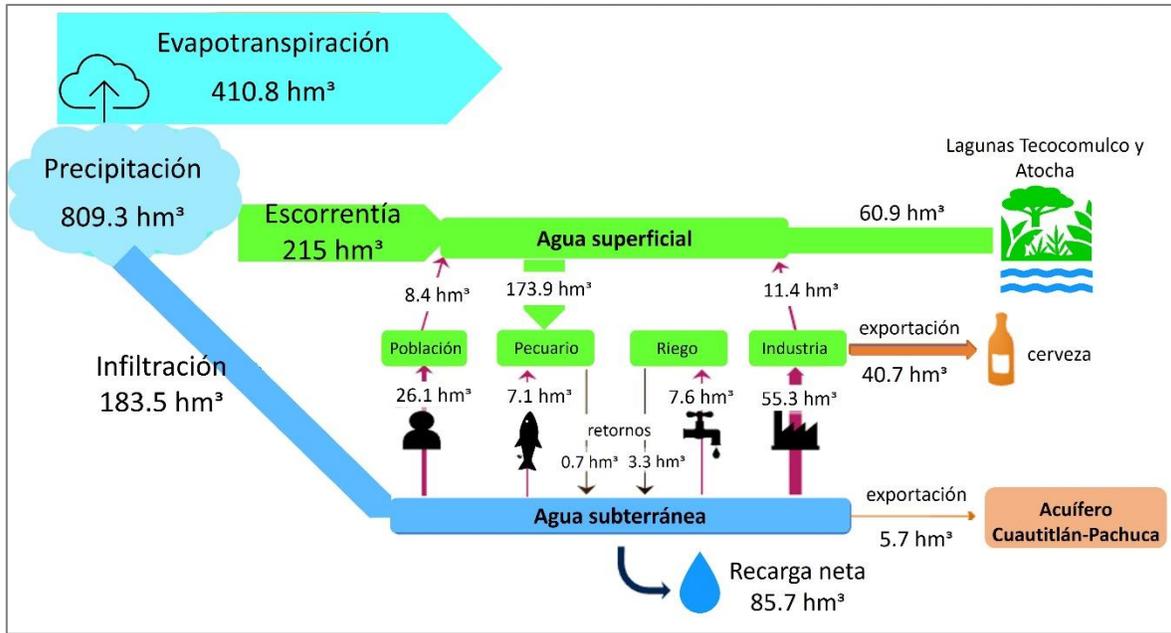
**Figura 32.** Demandas de agua superficial en un escenario inercial

La competencia por recursos hídricos también puede generar conflictos entre diferentes sectores (Uhlenbrook, Yu, Schmitter, & Smith, 2022). Además, el crecimiento pronunciado en la demanda industrial hasta 2060 indica la necesidad de gestionar eficientemente los recursos hídricos para evitar presiones excesivas y posibles impactos negativos en el medio ambiente.

Ante estas proyecciones, es crucial considerar medidas para abordar las consecuencias y desafíos identificados. Mas adelante se presentan los resultados de escenarios con estrategias de gestión eficiente del agua, como la creación de áreas de riego, el aprovechamiento de aguas superficiales y captación de agua de lluvia (C.-Y. Zhang & Oki, 2023). Además, es fundamental fomentar en la población la conservación del agua a través de la educación y la concientización.

-Balance hídrico del escenario inercial

En la Figura 33 se muestra mediante un diagrama de Sankey el balance hídrico del escenario inercial en donde se observa un aumento gradual de la demanda debido al aumento de la industria y población.



**Figura 33.** Escenarios de balance hídrico en el escenario inercial en 2060.

Se puede destacar que el sector industrial demanda la mayor parte del agua extraída, con 57.5% del total de las extracciones. También es importante señalar que el sector industrial exporta una cantidad significativa de agua para la elaboración de cerveza (40.7hm<sup>3</sup>). Se deberán considerar medidas para reducir la exportación de agua o para mejorar la eficiencia del uso de agua en la elaboración de cerveza. El balance de agua subterránea calcula una recarga neta de 85.7 hm<sup>3</sup> anuales. El crecimiento en la demanda subterránea destaca la importancia de considerar y gestionar de manera eficiente los recursos hídricos ante un crecimiento inercial y por lo tanto aumento en la demanda.

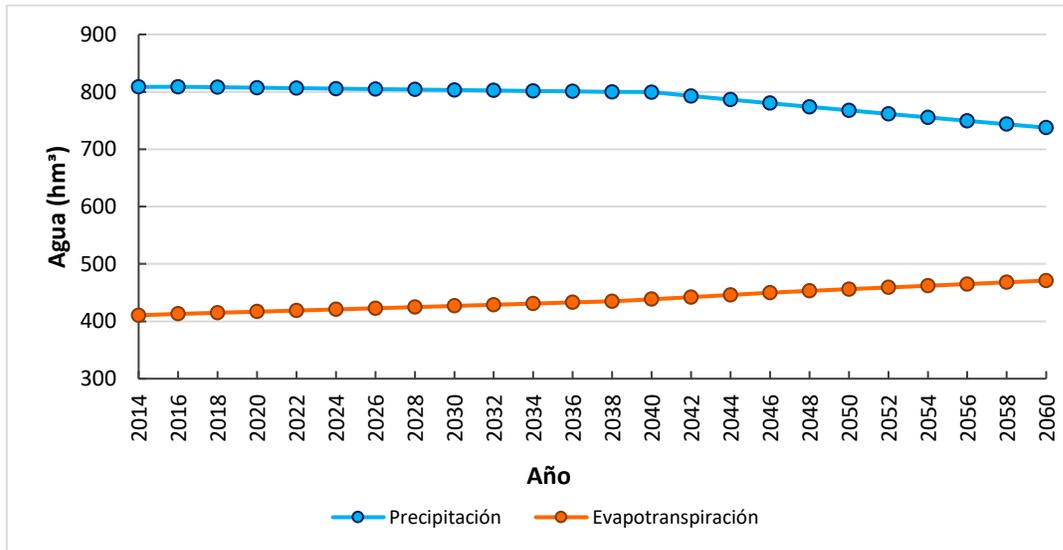
El cambio climático y los fenómenos extremos asociados, como la sequía, pueden tener un impacto significativo en los patrones de recarga (Cavelan et al., 2022) por lo cual se diseña el siguiente escenario de cambio climático.

### 5.3.2 Escenario de cambio climático (CC)

Este escenario de proyección climática se diseñó utilizando los datos del escenario BAU y adicionando las proyecciones de aumento de temperatura y por tanto, de la evapotranspiración, y de la disminución de precipitación hasta el año 2060, utilizando las simulaciones reportadas por el Instituto de Ecología y Cambio Climático y seleccionando los valores proyectados para la zona de estudio.

-Disponibilidad de agua

El análisis se centró en la disponibilidad natural de agua dulce afectada por la proyección de las condiciones climáticas locales. Se ha pronosticado en los Llanos de Apan un aumento de temperatura de 1.9°C y una disminución de la precipitación del 0.8% en 2060 (Iturbide, 2021).



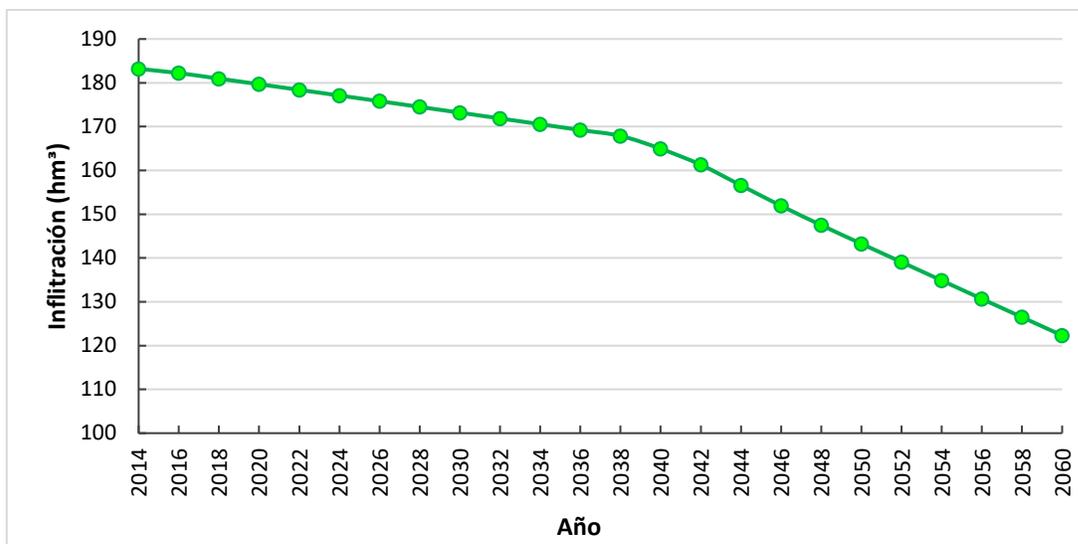
**Figura 34.** Resultados calculados en los Llanos de Apan en un escenario de cambio climático: comparación de valores de evapotranspiración y precipitación en  $\text{hm}^3$

El gráfico de la Figura 34 muestra los resultados de las proyecciones de la disminución de precipitación y aumento de evapotranspiración para el escenario de cambio climático hasta el año 2060. Hacia el año 2060 el porcentaje de evapotranspiración se incrementará 14.7% comparada con el año base 2014, esto concuerda con estudios similares (Gómez Martín, Máñez Costa, Egerer, & Schneider, 2021). Hacia el año 2060 el porcentaje de evapotranspiración aumentará en una zona que depende solamente de la precipitación.

Éste aumento en la evapotranspiración implica una mayor pérdida de agua de la superficie terrestre. Afectando la vegetación y los cultivos de temporal que en esta región son vulnerables a la sequía y a la falta de agua.

#### -Agua subterránea

Los resultados del escenario de cambio climático mostraron cambios significativos en la disponibilidad de agua subterránea. En la Figura 35 se muestra la disminución tan drástica de los valores de infiltración hacia el agua subterránea y por tanto, de la recarga del acuífero.



**Figura 35.** Valores de infiltración en  $\text{hm}^3$  en un escenario de cambio climático en los Llanos de Apan.

La Figura 35 muestra que el cambio climático impactará negativamente la recarga neta del agua subterránea y afectará su disponibilidad para diversos usos incluyendo el abastecimiento de agua potable a la población, agricultura e industria.

Estos resultados destacan la necesidad de tomar medidas preventivas y adaptativas para hacer frente a los impactos del cambio climático en la recarga del agua subterránea. Se requiere una gestión integrada de los recursos hídricos que promueva prácticas de conservación del agua y diversificación de fuentes de abastecimiento. La implementación de tecnologías eficientes de riego, captación y almacenamiento de aguas pluviales, tratamiento y reutilización de aguas residuales son algunas de las medidas que pueden ayudar a mitigar los efectos de la disminución en la infiltración hacia el agua subterránea (Sathre et al., 2022).

La gestión adecuada de los recursos hídricos, la conservación del agua y la planificación del uso del suelo son fundamentales para garantizar la disponibilidad de agua subterránea para las generaciones presentes y futuras.

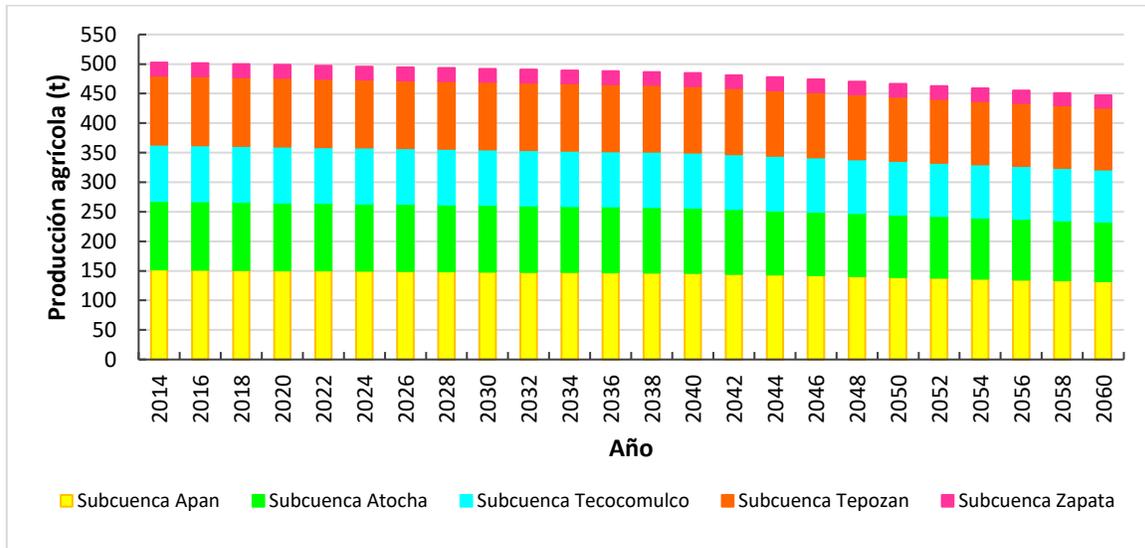
#### -Agua superficial

A medida que avanza el cambio climático, se observan cambios significativos en el comportamiento de los sistemas hídricos superficiales, ya que disminuye la escorrentía y aumenta la evapotranspiración (Ver Figura 34). Esto afectará la disponibilidad para satisfacer las demandas de agua del sector industrial y urbano.

Al disminuir la precipitación, los agricultores pueden verse obligados a reducir el área de siembra o desestimar ciertos cultivos ya que en los Llanos de Apan la agricultura que depende en gran medida de la lluvia (98% de temporal). Esta reducción puede influir en la producción agrícola.

-Proyección de la producción agrícola

En la Figura 36 se muestra la producción agrícola en el escenario de cambio climático



**Figura 36.** Proyección de la producción agrícola por subcuenca en toneladas en los Llanos de Apan en un escenario de cambio climático.

En la Figura 36 se muestran los valores de producción de granos principalmente, disminuyendo 11.1% al año 2060. Esto coincide con lo reportado por (Ortiz, 2012), se reporta que la producción agrícola podría disminuir un 24% por los efectos del cambio climático al año 2080 en América Latina y el Caribe.

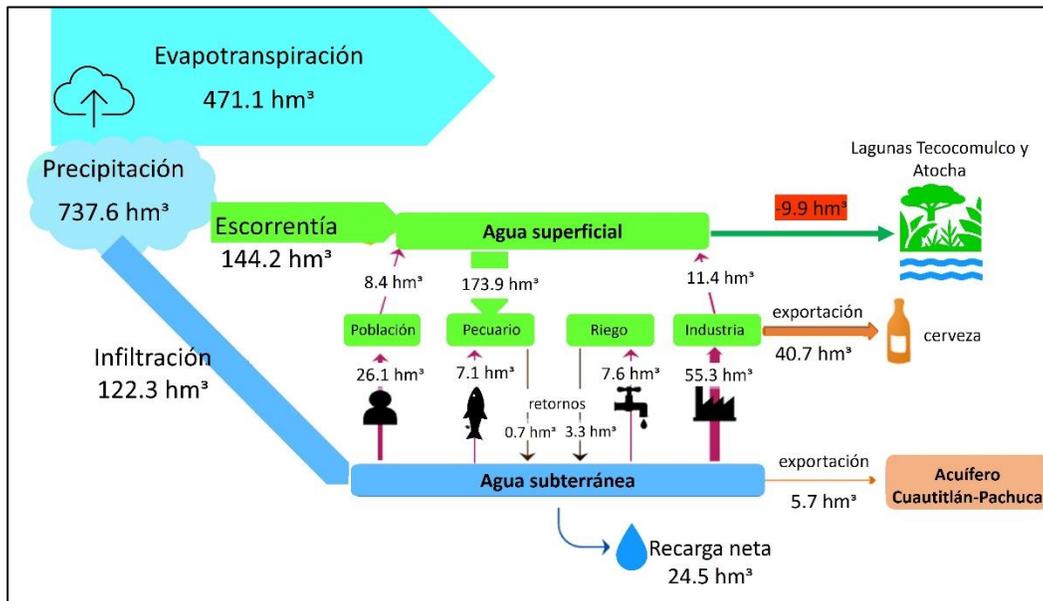
Si la producción agrícola disminuye, podría haber una escasez de alimentos y un aumento en los precios de éstos con un impacto negativo en la economía de la región, al ser la agricultura, una actividad económica tan importante en la zona.

Para enfrentar los desafíos actuales y futuros, se deben promover las prácticas agrícolas más sostenibles y resistentes al clima, la diversificación de cultivos y la implementación de sistemas de riego eficientes. También es importante fomentar la conservación y restauración de ecosistemas naturales, que pueden ayudar a mantener la calidad del agua.

La gestión del agua es imprescindible sobre todo en esta zona de estudio porque depende solamente de la lluvia.

-Balance hídrico de los Llanos de Apan

En la Figura 37 se muestran los resultados del escenario CC en un diagrama de Sankey. Se observan cambios significativos en los parámetros del ciclo hidrológico, con respecto al escenario anterior.



**Figura 37.** Escenarios de balance hídrico en el escenario de cambio climático en 2060.

Comparando los resultados mostrados en la figura 37 con los de la figura 33, se puede observar que la precipitación disminuye y la evapotranspiración aumenta. Este resultado indica que se reduce la disponibilidad de agua subterránea y superficial debido a que la escorrentía e infiltración disminuyen. Como resultado, hay una reducción en la recarga neta positiva de los acuíferos con una tendencia cercana a la sobreexplotación.

5.3.3 Escenario de cambio de uso de suelo a urbano (CUS)

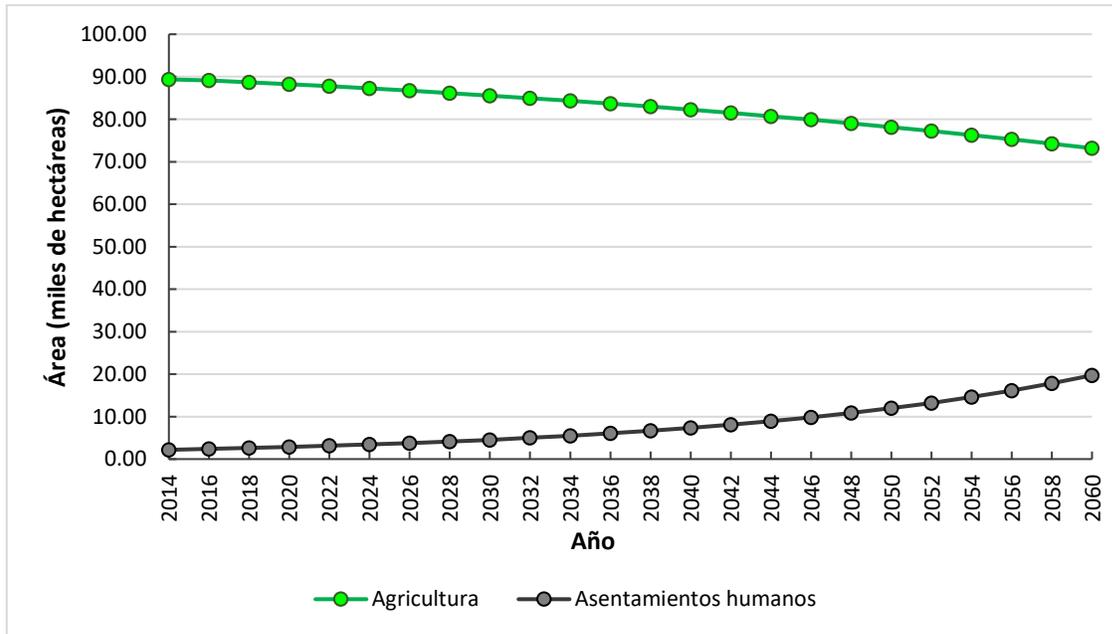
Este escenario de cambio de uso de suelo se calcula considerando los parámetros del anterior CC. La comparación entre el escenario CUS y el BAU muestra diferencias aún más significativas en el ciclo hidrológico de la región de estudio. Los cambios proyectados en el uso de suelo hacia 2060, por la conversión de áreas agrícolas a asentamientos urbanos e incluso la transformación de bosques en suelos agrícolas. Este hecho produce una perturbación importante en la infiltración debido al aumento de la mancha urbana y por tanto

un aumento de las escorrentías.

El área urbana y suelos agrícolas mostraron cambios considerables, mientras que los demás mostraron cambios relativamente pequeños. Las áreas de crecimiento urbano desplazan principalmente zonas agrícolas y forestales.

La tasa de crecimiento anual de asentamientos humanos calculada por los sistemas de información geográfica fue de 3.9% y en esa misma medida disminuye el área agrícola, que es la más afectada. Esta tasa de crecimiento es muy similar a la reportadas por Li, Chen, las zonas agrícolas disminuirán en un 0.57% anual y las zonas urbanas aumentaran 3.93% (C. Li et al., 2021).

La Figura 38 representa los incrementos correspondientes a los asentamientos humanos y la disminución en el área agrícola.



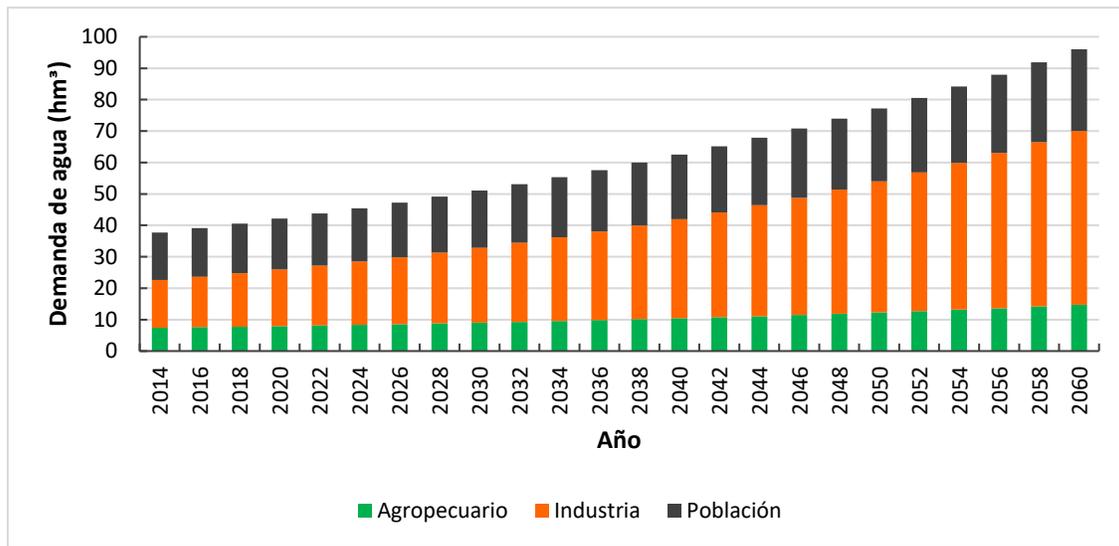
**Figura 38.** Resultados de escenarios de cambio de uso de suelo: Áreas correspondientes a los asentamientos humanos y agricultura

El incremento de la superficie impermeabilizada por edificaciones y pavimentos derivará en una mayor escorrentía superficial, generando aumento de la erosión del suelo y reduciendo la recarga de las subcuencas. La disminución de la infiltración del agua en el suelo unido al efecto del CC aumentará la vulnerabilidad del acuífero.

-Agua subterránea

La demanda de agua subterránea en el escenario CUS se ha evaluado en los sectores agropecuario, industria y población (Figura 39). Estos datos muestran la evolución de la demanda de agua subterránea en los Llanos de Apan.

En el sector agropecuario, se observa un aumento constante de la demanda de agua subterránea. Los datos muestran que la demanda de agua en este sector aumentará 98.1%. Este incremento refleja el crecimiento de las actividades agropecuarias en la región y la necesidad de agua para el riego de cultivos y el suministro de agua para el ganado.



**Figura 39.** Resultados de escenarios de cambio de uso de suelo: Demanda de agua por sectores en los Llanos de Apan.

En el sector industrial, también se observa un aumento significativo en la demanda de agua subterránea. Los datos muestran un crecimiento exponencial de la demanda industrial, pasando de 15.1 hm<sup>3</sup> en 2014 a 55.3 hm<sup>3</sup> 2060. Este aumento de 263.8% puede atribuirse al crecimiento económico, el desarrollo industrial y el aumento de la producción. La industria es un motor importante para el desarrollo económico y la generación de empleo, sin embargo, su alta demanda de agua puede generar desafíos para la gestión de los recursos hídricos. Es fundamental implementar medidas de eficiencia en el uso del agua, como la reutilización, el reciclaje del agua industrial y considerar fuentes alternativas de abastecimiento, como el uso de agua de superficial tratada.

En cuanto a la demanda de agua subterránea por parte de la población, los datos muestran un crecimiento de 73.1%. Este incremento se debe principalmente al crecimiento demográfico y al aumento de las necesidades de agua para consumo humano, uso

doméstico y actividades comunitarias. Satisfacer las necesidades básicas de agua potable y saneamiento para la población es esencial y debe considerarse como una prioridad en la gestión del agua. Es necesario promover el uso eficiente del agua en los hogares, la educación sobre la conservación del agua y la implementación de infraestructuras adecuadas para el suministro y tratamiento del agua potable.

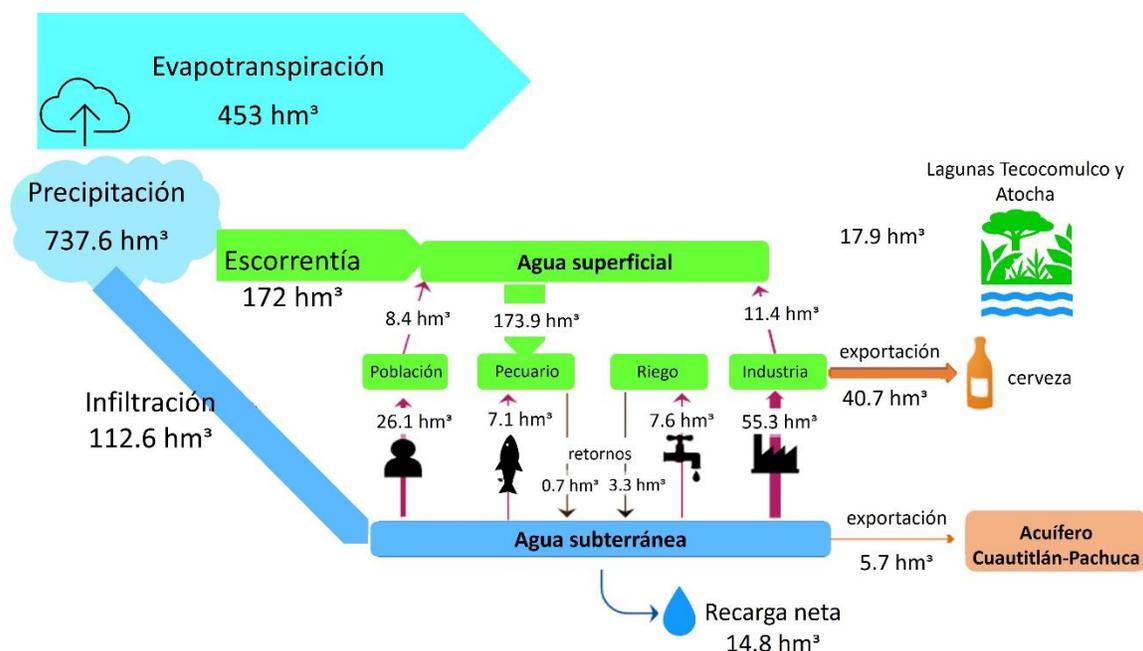
Cada sector desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico, la seguridad alimentaria y el bienestar de la población. Sin embargo, es necesario tener en cuenta cómo los cambios de uso de suelo pueden influir en la sostenibilidad de cada sector y la gestión de los recursos hídricos. Los cambios de uso de suelo, como la expansión urbana, la conversión de áreas agrícolas y la deforestación, tienen un impacto significativo en los recursos hídricos subterráneos. Estos cambios pueden alterar los patrones de infiltración y recarga de los acuíferos, así como aumentar la escorrentía superficial y la erosión del suelo. Además, la eliminación de la vegetación natural reduce la capacidad de retención de agua y la calidad del agua en los cuerpos de agua cercanos.

En este sentido, es crucial promover la eficiencia en el uso del agua en todos los sectores. Es necesario fomentar la restauración de áreas degradadas y la protección de las áreas naturales para mantener la funcionalidad hidrológica y la disponibilidad de agua. La colaboración y la participación de los diferentes actores, como los agricultores, industrias y la sociedad civil, son fundamentales para lograr una gestión sostenible del agua. Es importante promover la planificación del territorio que tome en cuenta la identificación de áreas adecuadas para la expansión urbana y la protección de áreas agrícolas productivas. Asimismo, es esencial educar y concienciar a la sociedad sobre la importancia de la conservación del agua y los efectos de los cambios de uso de suelo en los recursos hídricos.

Este escenario predice las consecuencias del CUS siguientes: la disminución de los patrones de infiltración, el aumento de la escorrentía y la mayor demanda de agua subterránea, y, por tanto, la menor disponibilidad de agua.

-Balance hídrico del escenario inercial

La Figura 40 representa los cambios en el uso de suelo y sus implicaciones en balance hidrológico de toda la zona.



**Figura 40.** Escenarios de balance hídrico en el escenario de cambio de uso de suelo en 2060.

El escenario de cambio de uso de suelo revela la influencia de las actividades humanas en la distribución de recursos hídricos. Comparando los resultados del CUS con los del escenario de CC, se puede observar que la escorrentía aumenta y la infiltración disminuye. Como resultado, hay una reducción en la recarga neta positiva de los acuíferos con una tendencia cercana a la sobreexplotación. La alteración en la evapotranspiración, infiltración y escorrentía subraya la importancia de considerar los impactos del desarrollo y la planificación del uso de suelo.

#### 5.3.4 Escenario de adaptación

Ante un escenario de cambio climático y cambio de uso de suelo influenciadas por las condiciones insostenibles, las subcuencas de los Llanos de Apan se verán afectadas por un mayor estrés hídrico. Es esencial implementar un plan de adaptación que permita mitigar los efectos negativos que se prevén al año 2060.

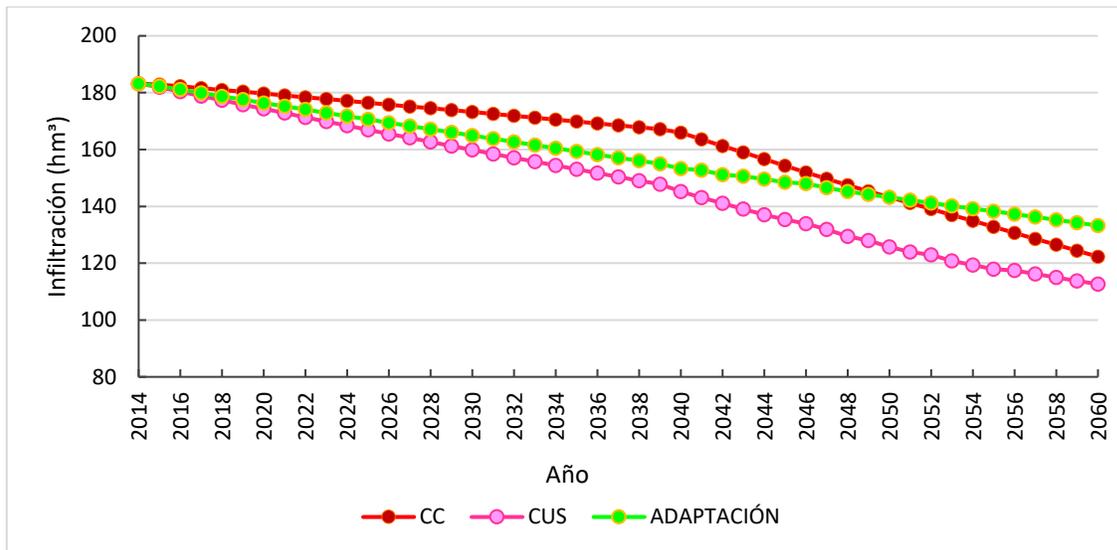
Los cambios en el uso de suelo sustentables también pueden incidir positivamente en la recarga de las subcuencas (Abraham, Muluneh, Girma, Hartmann, & Tekleab, 2022a), en este escenario se han propuesto las medidas de adaptación siguientes:

- Se propone disminuir a 1.6% la tasa de crecimiento de tular y aumentar la capacidad de almacenamiento de agua superficial en las lagunas principales de Tecocomulco

y Atocha en 0.5%.

- Aumentar la cobertura vegetal (9.3%) permitirá aumentar la capacidad de recarga de las subcuencas (Getachew & Manjunatha, 2022; Jin, Zhang, Xie, Liang, & Wang, 2023; Martínez-Retureta et al., 2022) .
- Hacer uso de aguas residuales industriales tratadas para crear nuevas áreas de riego que permitan incrementar las producciones agrícolas y preservarlas.

Con las condiciones mencionadas anteriormente, se realizó la proyección al año 2060 y los resultados de infiltración se muestran en la Figura 41.



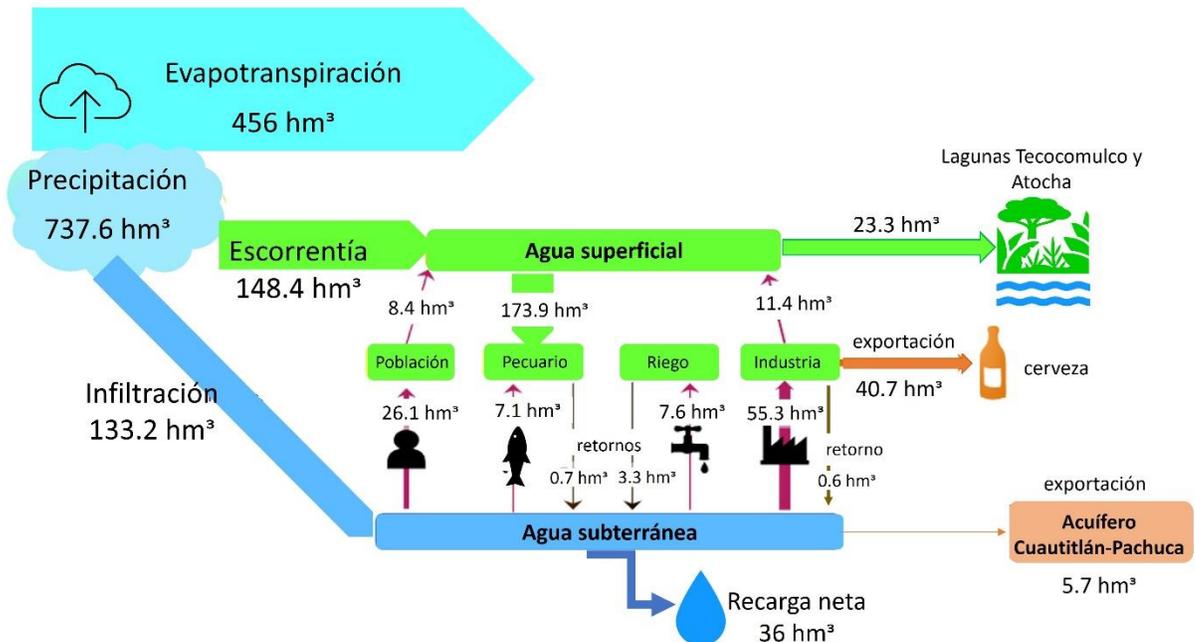
**Figura 41.** Valores de infiltración en el escenario de cambio de uso de suelo (CUS), cambio climático (CC) y adaptación.

Los resultados del cambio en la cobertura vegetal dieron respuesta a un aumento en la recarga de agua subterránea. En la Figura 41 se representan los valores de infiltración para este escenario de adaptación y la comparativa con los escenarios CC. Y CUS. Se puede observar que, ante las medidas de adaptación propuestas, es posible incrementar los valores de infiltración hacia el año 2060 en un 8.9% con respecto al escenario CC y un 18.2% con respecto al escenario CUS. Los cambios propuestos en la expansión de cobertura vegetal contribuyen a la recarga de agua subterránea y esto coincide con lo reportado por (Siddik et al., 2022).

Los resultados muestran que los asentamientos humanos y la industrialización ha impactado negativamente en la recarga de aguas subterráneas y esto coincide con lo reportado por (Abraham, Muluneh, Girma, Hartmann, & Tekleab, 2022b). El escenario de

adaptación no incluye crecimiento industrial, las demandas se han simulado con las industrias que se tienen hasta el momento. Si se instalaran nuevas industrias en los Llanos de Apan no se podría aumentar los porcentajes de infiltración. Además, para el año 2060 las subcuencas ya no tendrían la capacidad para suministrar la demanda de agua de los sectores. Es importante involucrar a los actores políticos y a la sociedad para una mejor gestión de agua y que se lleven a cabo las medidas sugeridas.

La Figura 42 representa los cambios de adaptación y sus implicaciones en balance hidrológico de toda la zona.



**Figura 42.** Escenarios de balance hídrico en el escenario de adaptación en 2060.

Este escenario (Figura 42), mediante el uso de aguas residuales y el cambio de uso de suelo sostenible, demuestra cómo las estrategias de gestión pueden influir en los patrones hidrológicos. La disminución en las demandas de agua superficial y subterránea resaltan la viabilidad de utilizar recursos hídricos alternativos para mantener un equilibrio en el suministro.

#### 5.4 Demanda de agua de los Llanos de Apan.

Las demandas de agua superficial y subterránea presentan una variabilidad a lo largo del tiempo debido a las condiciones de cada escenario simulado. A continuación, se presenta en la Tabla 10 un análisis comparativo de los valores de cada escenario para comprender

su distribución y disponibilidad de recursos hídricos en los Llanos de Apan.

**Tabla 10.** Balance hídrico de los escenarios para los Llanos de Apan al año 2060 (hm<sup>3</sup>)

Escenario	Características del escenario	Precip	Eto	I	E	DSB	DSP
Línea Base	2014	809.3	410.8	183.5	215.0	37.7	173.9
Referencia	BAU 2060	809.3	410.8	183.5	215.0	96.1	173.9
<b>Cambio Climático (CC)</b>	BAU+ CC 2060	737.6	471.1	122.3	144.2	96.1	173.9
<b>Cambio de Uso de Suelo (CUS)</b>	BAU+ CC + CUS 2060	737.6	453.0	112.6	172.0	96.1	173.9
<b>Adaptación</b>	Uso de aguas residuales	737.6	456.0	148.4	133.2	96.1	133.5

Precip: Precipitación Eto: Evapotranspiración I: Infiltración E: Escorrentía DBS: Demanda subterránea DSP: Demanda superficial

En la tabla 10 se muestran los resultados del balance hídrico. Cada escenario ofrece una perspectiva única sobre cómo diferentes factores pueden influir en la distribución y disponibilidad de los recursos hídricos en la región. El escenario BAU presenta las mismas condiciones del año base 2014 y solamente se observa el aumento de demanda de agua subterránea por el crecimiento de la población. En el escenario CC se observa una disminución de precipitación de 8.9% y aumento de evapotranspiración de 14.7% debido a las proyecciones y por tanto, disminuye la disponibilidad de agua para la agricultura de temporal y la recarga de acuíferos. En el escenario CUS el porcentaje de escorrentía aumenta respecto al CC debido al aumento de la mancha urbana, agravando lo anterior. Finalmente, el escenario de adaptación muestra la mitigación de la disponibilidad del agua para recarga del acuífero por incremento en la infiltración, pero aún no se logra el valor calculado para la línea base de 2014. También mitiga la demanda de agua superficial para el riego.

Estos resultados son esenciales para la toma de decisiones de gestión hídrica que promuevan la sostenibilidad y la resiliencia en un entorno en constante cambio.

### 5.5 Explorando las implicaciones del Nexo Agua-Alimentos

El Nexo Agua-Alimentos se relaciona estrechamente con los resultados presentados en cada escenario. A continuación, se detallan las conexiones de cada uno:

a) Conexiones del Nexo AA con el escenario BAU

*Demanda de agua y escasez:* El escenario BAU muestra un crecimiento inercial en los sectores poblacional, agropecuario e industrial, lo que resulta en un aumento en la demanda de agua (Du, Liu, Li, Zhang, & Santagata, 2022). Esta mayor demanda de agua por parte de los sectores poblacional e industrial ejercen presión sobre los recursos hídricos, lo que aumenta el riesgo de escasez de agua. La escasez de agua afectará la producción de alimentos al limitar el acceso al agua necesaria para la irrigación de los cultivos.

*Disminución de la productividad agrícola:* El sector agrícola experimenta una tasa de crecimiento más baja en comparación con los sectores poblacional e industrial. Esto resultará en una disminución de la productividad agrícola de temporal. Además la falta de inversión en infraestructuras de riego y tecnologías eficientes limita la disponibilidad de agua para el riego de los cultivos (Deo, Karmakar, & Arora, 2022). Esta disminución en la productividad agrícola tendrá un impacto negativo en el suministro de alimentos.

*Contaminación del agua:* El mayor crecimiento en los sectores poblacional e industrial puede aumentar la contaminación del agua, lo que afecta su calidad y la salud humana. La contaminación del agua podría tener consecuencias directas en la seguridad alimentaria, ya que el agua contaminada utilizada en la producción de alimentos puede poner en riesgo la salud de las personas (Soliman, Hesselberg, Mohamed, & Renault, 2022).

En el escenario BAU, el Nexo Agua-Alimentos se relaciona con los resultados presentados al destacar las implicaciones que surgen cuando los sectores poblacional e industrial tienen una tasa de crecimiento mayor que el sector agrícola. Estas implicaciones incluyen una mayor presión sobre los recursos hídricos, escasez de agua, disminución de la productividad agrícola y contaminación del agua. Para abordar estos desafíos, es necesario implementar medidas que promuevan un uso más eficiente del agua y una gestión sostenible de los recursos hídricos, considerando la interconexión entre el agua y la producción de alimentos.

b) Conexiones del Nexo AA con el escenario de CC

*Disminución de la disponibilidad de agua:* El escenario de cambio climático proyecta un aumento de temperatura y una disminución de la precipitación en los Llanos de Apan para el año 2060. Esto resulta en una disminución de la infiltración de agua subterránea, lo que afecta la recarga de los acuíferos y reduce la disponibilidad de agua dulce. La disminución

de la disponibilidad de agua tendrá un impacto directo en la producción agrícola al limitar el acceso al agua necesaria para el riego de los cultivos (Wubneh, Worku, & Chekol, 2023).

*Impacto en la producción agrícola:* La disminución de la disponibilidad de agua y los cambios en los patrones de lluvia y temperaturas debido al cambio climático afectan la producción agrícola en los Llanos de Apan. La Figura 36 muestra una disminución del 20.5% en la producción agrícola, especialmente en los cultivos de temporal que son altamente vulnerables a la sequía y la falta de agua. Esta disminución en la producción agrícola amenaza la seguridad alimentaria de la región y puede resultar en escasez de alimentos y aumentos en los precios (Wu, Tian, Xia, Hu, & Li, 2023).

El Nexo Agua-Alimentos se relaciona con los resultados presentados al destacar los efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua y la producción agrícola en los Llanos de Apan. Para abordar estos desafíos, se requiere la implementación de prácticas agrícolas sostenibles, el uso eficiente del agua y la conservación de ecosistemas naturales. Estas medidas son fundamentales para garantizar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los recursos hídricos en la región.

### c) Conexiones del Nexo AA con el escenario de CUS

*Disminución del área agrícola:* La Figura 38 muestra una disminución en el área agrícola debido al aumento de los asentamientos humanos y la expansión urbana. Este cambio de uso de suelo implica la conversión de tierras agrícolas en áreas urbanas, lo que reduce la disponibilidad de tierras para la producción de alimentos (S. Li et al., 2023). Como resultado, la capacidad de la región para cultivar cultivos se ve comprometida, lo que puede llevar a una disminución en la producción de alimentos.

*Aumento de la demanda de agua para consumo humano:* El crecimiento de los asentamientos humanos y la expansión urbana generan una mayor demanda de agua para uso doméstico y consumo humano (Maldonado Mejía, 2023). Esto significa que una parte del agua disponible que anteriormente se destinaba a la agricultura ahora se destina al abastecimiento de agua potable para la población. Como consecuencia, la disponibilidad de agua para la agricultura se ve reducida, lo que puede afectar negativamente la producción de alimentos.

*Incremento de la escorrentía superficial y erosión del suelo:* El aumento de la superficie impermeabilizada por edificaciones y pavimentos en áreas urbanas conlleva un aumento en la escorrentía superficial (Z. Zhang et al., 2023). Esto significa que el agua de lluvia no

puede infiltrarse en el suelo y recargar los acuíferos de manera adecuada. Se ha identificado que, en este escenario, el agua fluye sobre la superficie, lo que aumenta la erosión del suelo. La erosión del suelo representa un impacto negativo en la calidad del suelo y la capacidad de retención de agua, lo que afecta la productividad de los cultivos.

El Nexo Agua-Alimentos se relaciona con los resultados presentados al destacar cómo el cambio de uso de suelo hacia la expansión urbana afecta la disponibilidad de tierras agrícolas. Esto aumenta la demanda de agua para consumo humano, incrementando la escorrentía superficial y erosión del suelo. Para abordar estos desafíos, se requiere tomar medidas preventivas, promover una gestión sostenible del agua y el territorio. Además, establecer políticas que aseguren un equilibrio entre la disponibilidad de agua, la producción de alimentos y el desarrollo urbano.

#### d) Conexiones del Nexo AA con el escenario de adaptación

*Incremento en la infiltración y recarga de agua subterránea:* Los cambios propuestos en el aumento de la cobertura vegetal contribuyen a aumentar la infiltración y la recarga de agua subterránea (Zhu & Zhang, 2022). Esto implica que una mayor cantidad de agua de lluvia pueda penetrar en el suelo, lo que beneficia la disponibilidad de agua en las subcuencas. Estos cambios coinciden con estudios que han demostrado que la conversión de matorrales en zonas agrícolas puede ser beneficioso para la recarga de agua subterránea (Shankar Ram et al., 2022).

*Utilización de aguas residuales industriales:* La propuesta de utilizar aguas residuales industriales para crear pequeños distritos de riego contribuye a aumentar la producción agrícola (S. Mishra, Kumar, & Kumar, 2023). Al utilizar este recurso de agua residual para la agricultura, se reduce la demanda de agua dulce y se aprovecha un recurso que de otra manera podría ser desechado. Esto ayuda a mantener una producción agrícola sostenible y reducir la presión sobre los recursos hídricos.

*Necesidad de prácticas agrícolas sostenibles y eficientes:* Ante los desafíos del cambio climático, es crucial promover prácticas agrícolas más sostenibles y resistentes al clima (Quarshie, Abdulai, & Fraser, 2023). Esto puede incluir la diversificación de cultivos y el uso de sistemas de riego eficientes

*Conservación de ecosistemas naturales:* La conservación y restauración de ecosistemas naturales desempeñan un papel importante en el mantenimiento de la calidad del agua y la regulación del ciclo hidrológico (Jarabo, 2022). La preservación de áreas naturales como

bosques y humedales contribuirá para mantener la infiltración de agua en el suelo y la recarga de las subcuencas en los Llanos de Apan, beneficiando la producción agrícola.

*Impacto negativo de los asentamientos humanos y la industrialización:* Los resultados muestran que los asentamientos humanos y la industrialización han tenido un impacto negativo en la recarga de aguas subterráneas (Jarabo, 2022). Por lo tanto, en el escenario de adaptación se propone no incrementar las zonas industriales existentes y respetar las concesiones industriales para evitar un mayor deterioro en la recarga de agua subterránea. La no inclusión de crecimiento industrial en el escenario de adaptación se basa en la capacidad limitada de las subcuencas para suministrar la demanda de agua de los sectores en el año 2060.

*Importancia de la gestión del agua y la participación de actores relevantes:* El escenario de adaptación resalta la necesidad de involucrar a los actores políticos y a la sociedad en general en la gestión del agua y la implementación de las medidas propuestas. La gestión adecuada del agua y la toma de decisiones participativa son fundamentales para garantizar una utilización sostenible y equilibrada de los recursos hídricos y promover la seguridad alimentaria en la región (Titicayo-Benavidez, 2023).

Con los resultados presentados se destaca la contribución para mantener la disponibilidad de agua para la agricultura y la producción de alimentos a través de las medidas de adaptación propuestas. También se resalta la importancia de limitar el impacto negativo de los asentamientos humanos y la industrialización en la recarga de agua subterránea. La gestión adecuada del agua y la participación de actores relevantes son cruciales para implementar las medidas de adaptación.

#### 5.5.1 El Nexo Agua-Alimentos de los Llanos de Apan y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El Nexo AA es clave para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) debido a los desafíos emergentes de disponibilidad hídrica y alimentaria. Los resultados presentados se alinean directamente con los ODS 2, 3 y 6. Esto coincide con lo reportado por (Corona-López et al., 2021). La Figura 43 muestra como el Nexo AA da cumplimiento a los objetivos de desarrollo sostenible. Además, se evalúa a través de la Huella Hídrica (HH).

La Figura 43 representa la relación de los ODS y la HH con el Nexo AA en los Llanos de Apan. Se resalta la importancia del Nexo Agua-Alimentos en la búsqueda de soluciones sostenibles para enfrentar los desafíos de la seguridad alimentaria y el acceso al agua

limpia y saneamiento. Se puede observar que dentro del primer círculo (línea azul) se encuentran los ODS que tienen una relación directa con el Nexo AA y se incluye la HH. A continuación, se describe como se conecta cada uno de estos objetivos:

*ODS 2 Hambre Cero:* Los resultados presentados muestran cómo el cambio climático y el cambio de uso de suelo afectan la producción agrícola y amenazan la seguridad alimentaria en los Llanos de Apan. La disminución de la producción agrícola debido a la disponibilidad de agua y otros factores relacionados con el cambio climático puede generar escasez de alimentos y aumentar los precios de estos (Wu et al., 2023).. Para abordar este desafío, se proponen medidas de adaptación, como la expansión de zonas agrícolas y el uso de aguas residuales industriales. Esto contribuye a mantener y aumentar la producción de alimentos en la región.



**Figura 43.** El Nexo AA en los Llanos de Apan: Contribuciones a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y análisis de la huella hídrica

*ODS 6 Agua Limpia y Saneamiento:* Los resultados presentados ponen de manifiesto el impacto del cambio climático y el cambio de uso de suelo en la disponibilidad de agua dulce en las subcuencas de los Llanos de Apan. Se muestran las afectaciones en la disponibilidad de agua para la agricultura y consumo humano. Para abordar este desafío, se proponen medidas de adaptación que buscan aumentar la infiltración y recarga de agua subterránea.

*ODS 3 Salud y Bienestar:* La disponibilidad de agua limpia y la seguridad alimentaria son factores clave para la salud y el bienestar de la población (Del Carmen González-Catalán & Rodríguez-Orozco, 2022). La escasez de agua y la disminución de la producción agrícola podrían tener efectos negativos en la salud de las personas, especialmente en comunidades vulnerables. La implementación de medidas para garantizar el acceso a agua y alimentos seguros y suficientes puede mejorar la salud y el bienestar de la población.

Es importante destacar que el enfoque interconectado de los ODS permite que las acciones tomadas en los Llanos de Apan puedan tener efectos positivos en otras áreas, generando sinergias y contribuyendo de manera integral al logro de múltiples objetivos de desarrollo sostenible.

#### 5.5.2 Huella hídrica verde en los Llanos de Apan

La huella hídrica verde se refiere a la cantidad de agua consumida por los cultivos durante su crecimiento, que proviene de la lluvia y la humedad del suelo (Bhatt, Singh, Majumder, & Kaur, 2023). Es importante considerar la huella hídrica verde en los cultivos de temporal porque estos dependen completamente del agua de lluvia para su crecimiento y desarrollo, y la cantidad de agua disponible puede variar significativamente de una temporada a otra.

La huella hídrica verde es importante porque permite evaluar la eficiencia del uso del agua en los cultivos y ayuda a identificar oportunidades para mejorar la gestión del agua en la agricultura de temporal. En la Tabla 11 se presentan los resultados de huella hídrica verde agrícola de la producción de granos y por área en cada subcuenca de los Llanos de Apan.

En el supuesto de que ha disminuido en tanto 7.2% el uso de suelo agrícola, se proyectan los resultados de HH. En la Tabla 11 se muestran los datos correspondientes de: agua para agricultura, área agrícola, producción agrícola, rendimiento agrícola, eficiencia del agua agrícola y los indicadores de HH verde por subcuenca. La eficiencia del agua agrícola es variable en cada subcuenca con valores desde 324 hasta 1253 m<sup>3</sup>/t. Estos resultados son relativamente bajos comparados con la HH verde global de cultivos de cereales y legumbres que son de 1600 y 4000 m<sup>3</sup>/t (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Respecto a la HH verde en el suelo agrícola, en la Tabla 11 se observan valores entre 1091 y 3085 m<sup>3</sup>/ha. Estos valores coinciden con la HH verde en cultivos al norte de Etiopía en los que se reportan valores entre 2127 y 3815 m<sup>3</sup>/ha en el año 2017 (Gebremariam, Habtu, Yazew, & Teklu, 2021).

**Tabla 11.** Huella hídrica verde del sector agrícola en producción de granos y por área en los Llanos de Apan en 2014

Subcuenca	*Agua (hm <sup>3</sup> )	Área agrícola (ha)	Prod. (t)	Rend. (t/ha)	Efic. del agua (m <sup>3</sup> /t)	Huella Hídrica verde	
						Por Área (m <sup>3</sup> /ha)	Por Prod. (m <sup>3</sup> /kg)
Apan	42.0	26,138	52,603	2.0	799	1,606	0.8
Atocha	28.6	26,236	58,267	2.2	491	1,091	0.5
Tecocomulco	34.8	15,503	53,846	3.5	647	2,247	0.6
Tepozán	66.7	21,609	53,233	2.5	1,253	3,085	1.3
Zapata	3.8	2,838	11,859	4.2	324	1,353	0.3

\*agua para agricultura=agua disponible para la agricultura restando la infiltración y evapotranspiración, Prod.= producción, Rend.= rendimiento, Efic.= eficiencia del uso del agua

También se observan los valores de HH en los Llanos de Apan entre 0.3 y 1.3 m<sup>3</sup>/kg. Estos valores son similares comparados con Brasil que en 2010 se reportaron los valores de HH verde en cultivos de maíz y trigo de 0.7 m<sup>3</sup> (Flach et al., 2020).

A través de los cálculos de HH se determina la eficiencia de cultivos sin riego. Las comparativas de HH con otros países permiten visualizar que la cantidad de agua destinada a los cultivos de temporal podría ser suficiente. Sin embargo, los rendimientos de los cultivos son bajos y esto puede estar influenciado por otros factores: pérdida de fertilidad del suelo, condiciones climáticas, plagas, uso de fertilizantes, prácticas empleadas, entre otros.

#### 5.6 Alternativas de adaptación para lograr un Nexo sustentable Agua-Alimentos

Es importante proponer alternativas que aseguren el desarrollo sustentable de los Llanos de Apan bajo los escenarios futuros de disponibilidad de agua. La Figura 44 muestra las propuestas de adaptación del Nexo AA enfocadas a diferentes sectores.

Ante un escenario de CC influenciado por condiciones insostenibles y el crecimiento inercial de las subcuencas de los Llanos de Apan, es importante tomar acciones que permitan disminuir el impacto negativo en proyecciones al año 2060. Se propone lo siguiente:

- Los cambios en el uso de suelo pueden incidir positivamente en la recarga de las subcuencas, la siembra de árboles y magueyes ayudará a la retención de humedad.
- Hacer uso de las aguas residuales industriales creando áreas con potencial de riego para incrementar la productividad agrícola de los Llanos de Apan

- Crear talleres de mejores prácticas agrícolas y rotación de cultivos para evitar la erosión de suelos. Esto con la finalidad de evitar que el área de estudio se convierta en zona de servicios por la importancia que tiene la agricultura en la región.
- Respetar las concesiones industriales de “No explotar, usar aprovechar o descargar volúmenes mayores a los autorizados en los títulos de concesión”.
- Campañas de ahorro y reutilización de agua.



**Figura 44.** Propuestas de adaptación del Nexo Agua-Alimentos en los Llanos de Apan

La adaptación del Nexo Agua-Alimentos es fundamental para garantizar la seguridad alimentaria y promover la sostenibilidad en un contexto de cambio climático y crecimiento demográfico. Las alternativas sustentables presentadas en este trabajo ofrecen soluciones concretas para abordar este desafío. Sin embargo, es importante destacar que no existe una solución única para todos los contextos. Cada región y comunidad puede enfrentar desafíos y limitaciones específicas que requieren enfoques adaptados a sus circunstancias particulares. La colaboración entre diferentes actores, la inversión en investigación, desarrollo y el fortalecimiento de capacidades son clave para implementar y escalar estas alternativas sustentables.

Al trabajar juntos, es posible construir un futuro resiliente, donde el agua y los alimentos estén interconectados en armonía, asegurando la prosperidad y el bienestar de las generaciones presentes y futuras. Para lograrlo, es fundamental que los gobiernos, las organizaciones internacionales, la sociedad civil y el sector privado se comprometan a tomar medidas concretas y a largo plazo.

La inversión en investigación y desarrollo es crucial para impulsar la innovación en tecnologías y prácticas sostenibles en la agricultura. Además, es necesario destinar recursos financieros adecuados para implementar infraestructuras y sistemas de gestión integrada del agua. Así como para fortalecer la capacidad de los agricultores y otros actores involucrados en la cadena alimentaria.

La educación y la sensibilización desempeñan un papel fundamental. Es esencial promover la conciencia sobre la importancia del Nexo AA y cómo nuestras elecciones y acciones individuales pueden tener un impacto significativo. Desde consumir alimentos de manera responsable hasta apoyar políticas y prácticas sostenibles, todos podemos contribuir a la adaptación y resiliencia del Nexo AA.

Enfrentar los desafíos del Nexo AA requiere enfoques integrados y soluciones sustentables. Al adoptar prácticas agrícolas sostenibles, implementar tecnologías de tratamiento y reciclaje del agua, y promover la gestión integrada de los recursos hídricos, podemos construir un futuro donde la seguridad alimentaria y la sustentabilidad vayan de la mano.

El desarrollo y la implementación de este paquete tecnológico requerirá la colaboración y el intercambio de conocimientos entre científicos, investigadores, agricultores, empresarios y responsables de la toma de decisiones. Al aprovechar los avances tecnológicos, las soluciones innovadoras y las mejores prácticas existentes, podremos impulsar la eficiencia en el uso del agua, reducir el desperdicio y optimizar los sistemas de producción alimentaria.

Además, es fundamental considerar el impacto ambiental de estas alternativas sustentables, asegurando que sean compatibles con la conservación de los ecosistemas. La sostenibilidad a largo plazo debe ser un principio rector en la implementación de estas soluciones.

## VI. CONCLUSIONES

- La superficie agrícola de los Llanos de Apan disminuyó un 7.2% debido al aumento de la mancha urbana en el período 2005-2018. Este cálculo se obtuvo mediante el análisis geoespacial.
- Las subcuencas de Atocha, Apan y Tecocomulco resultaron ser las principales productoras de cebada en grano en los Llanos de Apan, representando más del 65% de la producción total de este cultivo en la zona. Sin embargo, el rendimiento de la producción de maíz grano en los Llanos de Apan aumentó de 0.85 a 2.5 t/ha.
- Las zonas de bajas precipitaciones en los mapas de isoyetas coinciden con las de baja productividad agrícola, debido a que el 98% de la producción agrícola es de temporal, y sólo el 2% es agricultura de riego.
- Las subcuencas Atocha, Tepozán y Apan representan el 25.3, 23.1 y 22.9% respectivamente de la producción agrícola, siendo la cebada grano y maíz grano los cultivos más representativos de la región con valores de 45.17 y 12.1%.
- Los Llanos de Apan aportan el 12.3% de la producción ovina estatal, mayormente concentrada en la subcuenca de Apan.
- Se reporta el balance hídrico de los Llanos de Apan y por subcuencas para el año base 2014 y de varios escenarios hasta el 2060 mediante los modelos conceptual y matemático considerando las aguas superficiales y subterráneas, desagregando los sectores agropecuarios, poblacional e industrial y las condiciones climáticas.
- El modelo matemático diseñado es reproducible para la zona de estudio, ya que su calibración resultó altamente significativa con un coeficiente R de 0.98, por lo tanto, los resultados de la simulación de las interacciones hidrológicas de los escenarios predicen resultados fiables.
- El balance de aguas subterráneas determinó una recarga neta de 147.2 hm<sup>3</sup> anuales para el año base 2014, siendo la precipitación la única fuente de suministro de agua y la evapotranspiración el flujo de salida más importante. La subcuenca de Apan presentó el mayor estrés hídrico debido a su alta demanda de agua subterránea.
- El escenario inercial predice un aumento en las extracciones de agua subterránea del 154.9% al 2060 debido a las tasas de crecimiento poblacional e industrial, siendo este último el de mayor demanda, con 57.5%.
- El escenario que evalúa los efectos por el cambio climático prevé una disminución de la precipitación, lo que ocasionará una disminución del 12.6% de agua disponible

para la agricultura y la recarga de agua subterránea se reducirá en 59.4% para el año 2060. Esto representa un desafío significativo para el desarrollo de la zona

- Las subcuencas que se afectarán en mayor medida debido al cambio climático son las de Apan y Atocha por el mayor porcentaje de áreas agrícolas de temporal y las actividades industriales que se desarrollan en ambas. Por ello, deberán ser las primeras en realizar las medidas de adaptación dedicadas a las tecnologías agrícolas de riego sostenible.
- El escenario de cambio de uso de suelo predice que para el año 2060, disminuirán el área agrícola en 18.1 % debido a la expansión urbana afectando la producción de alimentos en 20.5% y la disminuyendo la infiltración hacia los acuíferos en 7.9% debido al aumento de la mancha urbana, siendo necesaria la adecuación del plan de desarrollo de los Llanos hacia tecnologías agrícolas sustentables y urbanizaciones sostenibles para evitar la erosión del suelo por el aumento de las escorrentías.
- El Nexo Agua-Alimentos en los Llanos de Apan cumple actualmente con la disponibilidad hídrica y alimentaria y, por tanto, con 3 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Sin embargo, para el año 2060 el panorama empeora debido a la menor disponibilidad de agua de lluvia debido al cambio climático y se proponen alternativas sustentables de adaptación. El escenario de adaptación predice un aumento de 18.2% en la infiltración de agua subterránea.
- La evolución en el tiempo del Nexo Agua Alimentos en los Llanos de Apan se refleja mediante los valores de la huella hídrica verde del sector agrícola (temporal) por subcuenca, siendo las más eficientes en el uso del agua Tepozán y Apan con valores de 1.3 y 0.8 m<sup>3</sup>/kg respectivamente.

## **VII. RECOMENDACIONES**

Este trabajo puede proporcionar la base de estudios futuros para evaluar la disponibilidad de agua en diferentes escenarios a escala regional y por subcuenca, teniendo en cuenta los efectos del crecimiento de la población, el cambio climático y los nuevos sitios de demanda con la finalidad de generar propuestas en la gestión sostenible del Nexo AA.

Es deseable realizar una planificación que asegure los recursos hídricos ante una proyección de explotación hídrica en los próximos años. Se ha demostrado que, limitando el crecimiento industrial aunado a las medidas de adaptación propuestas, es posible incrementar el porcentaje de recarga de agua subterráneas y satisfacer las necesidades de la población.

Es importante desarrollar estrategias de adaptación de las áreas agrícolas de temporal ante los incrementos de temperatura y disminución en la disponibilidad de agua para la agricultura. Las tecnologías de riego actuales y futuras deberán adaptarse ante las futuras condiciones de escasez.

Este trabajo se limita al análisis del sector agrícola y no a las posibles medidas de adaptación para aplicar en las zonas urbanas. Esto es debido a que la zona de estudio es rural en su mayoría.

## VIII. ANEXO TABLAS

**Tabla A 1.** Datos integrados de Uso de Suelo, Clima, Recursos y suministros: valores calculados y supuestos.

Dato	Formato /Valor	Formula	Descripción	Cita	Nota/supuesto
<b>USO DE SUELO</b>					
DEM (Modelo Digital de elevación)	GIS	ArcGIS: Crear DEM, Crear TIN	Se descargó CEM Hidalgo a 15m	(INEGI, 2013)	Se realizó el DEM para los dos acuíferos
División por subcuencas	GIS		De acuerdo con las elevaciones y flujos de agua		
Cobertura de vegetación	GIS	Recorte de capas vectoriales	INEGI, (12/12/2013)	(CONABIO, 2013)	Se obtuvo USV por subcuenca
Tipo de suelo	GIS	Tipo de suelo	Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II	(INEGI, 2016)	Tipo de suelo por subcuenca
Áreas de agricultura irrigada	Gis	Manipulación de bases de datos en Excel	Porcentaje de área de irrigación	(CONABIO, 2013)	La información fue extraída para cada subcuenca
Coefficiente de cultivo		Elaboración de bases de datos mensuales de Kc	Establecimiento de fechas de siembra y cosecha, valores de Kc para cada cultivo	(Fernández et al., 2014)	
Máximo rendimiento potencial de los cultivos		Cálculo de valores anuales para cada cultivo en Kg/ha	Rendimiento máximo potencial de, maíz, frijol, forrajes, cebada, trigo, hortalizas y pasto	(Alarcón Zúñiga & Cervantes Martínez, 2012)	
<b>CLIMA</b>					
Precipitación	Excel	Interpolaciones por "Spline"	serie de datos histórico y promedios mensuales	(SMN, 2010)	
Temperatura	Excel	Interpolaciones por "Spline"	serie de datos histórico y promedios mensuales	(SMN, 2010)	
Evapotranspiración	Excel	método de Penman-Monteith		(Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006)	

Sitios de demanda	Excel	Población, industria y agropecuario	uso de agua superficial y subterránea	(CONAGUA, 2019)	
Número de usuarios	Excel	Promedio ponderado	población por subcuenca	(COESPO, 2021)	
Consumo per cápita	Excel		141 L/hab	(GE, 2011)	se asume que de 2014 a 2015 el consumo de agua es el mismo
Pérdidas del sistema	Excel		43% agricultura, 40% población y 57% ganadería		
Índice de infiltración		Coeficiente de infiltración (Ci): $Ci = (1 - 0.12) / (Kp + Kv + Kfc)$	Pendiente de las subcuencas Textura del suelo Cubierta vegetal	(Chamizo-Checa et al., 2020)	
Índice de escorrentía		Coeficiente de escorrentía (Ce): $Ce = 1 - Ci$	Índice de infiltración	(Chamizo-Checa et al., 2020)	
porcentaje de retorno	Excel	suma de retornos de aguas residuales		(CONAGUA, 2019)	se asume que las descargas de aguas residuales son retornos de agua
<b>DATOS DE ENTRADA (RECURSOS Y SUMINISTRO)</b>					
Reservorios/presas	GIS	Área de cada reservorio	3 reservorios principales	(SIATL, 2019)	
Consumo de agua per cápita en $m^3/hab-año^{-1}$		Consumo per cápita = (Volumen de agua concesionado / # de habitantes)	Población, Volumen de agua concesionado para el sector doméstico	(REPDA, 2020)	Manejo de información de tablas de atributos de población
Tasa anual de uso de agua para la industria en $hm^3/km^2$		Volumen de agua concesionado para la actividad industrial	No se cuenta con información del consumo de agua para cada tipo de industria	(CONAGUA, 2013)	Debido a que no se tiene información, se declara una unidad de producción
Tasa anual de uso de agua para riego en $Mm^3/km^2$ .		Volumen de agua concesionado para riego/ área de irrigación en $km^2$	Volumen de agua concesionado para riego agrícola y área en $km^2$ de las zonas y distritos de riego	(REPDA, 2020)	Se utilizaron datos de la estación 26347
Tasa anual de uso de agua para el sector servicios			Volumen de agua concesionado para el sector servicios		Se declaró una unidad de producción

**Tabla A 2.** Análisis de parámetros hidrológicos para la subcuenca Atocha (periodo 1951-2010).

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>P</b>	9.3	12.2	17.3	36.1	56.6	100.8	107.3	102.5	94.1	50.0	16.0	5.5
<b>T. Máx</b>	21.8	22.8	24.8	25.9	26.3	25.1	24.2	24.5	23.2	22.9	22.6	21.8
<b>T. Med</b>	10.4	11.6	13.2	14.9	15.7	15.7	14.9	14.8	14.5	13.2	11.7	10.8
<b>Temp Mín</b>	-2.2	-1.4	0.3	3.0	5.4	6.7	5.9	5.9	6.3	4.3	0.7	-1.8
<b>ETP</b>	50.3	48.6	59.1	59.7	62.1	55.7	54.9	53.6	47.6	48.8	48.4	50.6
<b>P-ETP</b>	-41.0	-36.4	-41.8	-23.6	-5.4	45.1	52.4	48.9	46.5	1.2	-32.4	-45.1
<b>Reserva</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.1	85.0	85.0	85.0	85.0	52.6	7.5
<b>VR</b>	-7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	45.1	39.9	0.0	0.0	0.0	-32.4	-45.1
<b>Excedente</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5	48.9	46.5	1.2	0.0	0.0
<b>Déficit</b>	-33.5	-36.4	-41.8	-23.6	-5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>ETR</b>	16.8	12.2	17.3	36.1	56.6	55.7	54.9	53.6	47.6	48.8	48.4	50.6
<b>Esc</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	26.5	25.2	0.6	0.0	0.0
<b>I</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7	22.4	21.3	0.6	0.0	0.0
<b>ETR+Esc+I</b>	9.3	12.2	17.3	36.1	56.6	100.8	107.3	102.5	94.1	50.0	16.0	5.5

**Tabla A 3.** Análisis de parámetros hidrológicos en subcuenca Tecocomulco (periodo 1951-2010).

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>P</b>	10.7	13.5	18.4	42.1	63.5	103.4	115.2	100.6	107.2	62.9	18.1	7.7
<b>T. Máx</b>	20.2	21.2	23.7	24.8	24.9	23.3	22.0	21.8	20.9	20.1	20.2	20.2
<b>T. Med</b>	9.2	10.6	12.6	14.0	14.4	14.3	13.4	13.4	13.2	11.9	10.4	9.5
<b>Temp Mín</b>	-3.4	-1.7	0.8	3.7	5.0	5.2	4.4	4.3	4.6	4.3	-0.3	-2.4
<b>ETP</b>	47.1	46.0	56.5	55.8	56.6	48.9	46.2	45.1	40.9	42.5	43.7	46.1
<b>P-ETP</b>	-36.4	-32.5	-38.0	-13.7	6.9	54.5	69.0	55.5	66.3	20.5	-25.6	-38.4
<b>Reserva</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9	61.4	100.0	100.0	100.0	100.0	74.4	36.0
<b>VR</b>	-36.0	0.0	0.0	0.0	6.9	54.5	38.6	0.0	0.0	0.0	-25.6	-38.4
<b>Excedente</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.3	55.5	66.3	20.5	0.0	0.0
<b>Déficit</b>	-0.4	-32.5	-38.0	-13.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>ETR</b>	46.7	13.5	18.4	42.1	56.6	48.9	46.2	45.1	40.9	42.5	43.7	46.1
<b>Esc</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.7	43.3	51.7	16.0	0.0	0.0
<b>I</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	12.2	14.6	4.5	0.0	0.0
<b>ETR+Esc+I</b>	10.7	13.5	18.4	42.1	63.5	103.4	115.2	100.6	107.2	62.9	18.1	7.7

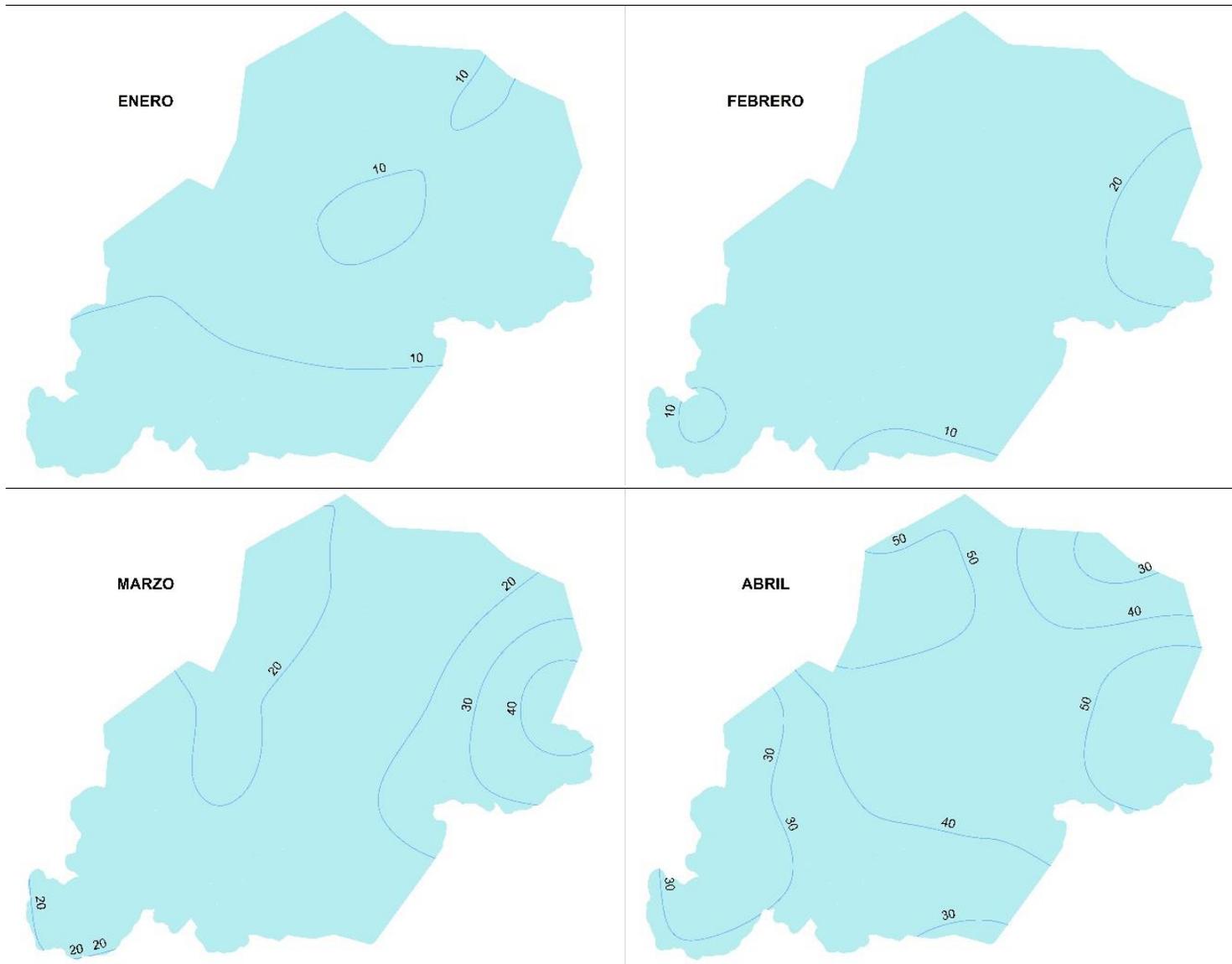
**Tabla A 4.** Análisis de parámetros hidrológicos para la subcuenca Tepozán (periodo 1951-2010).

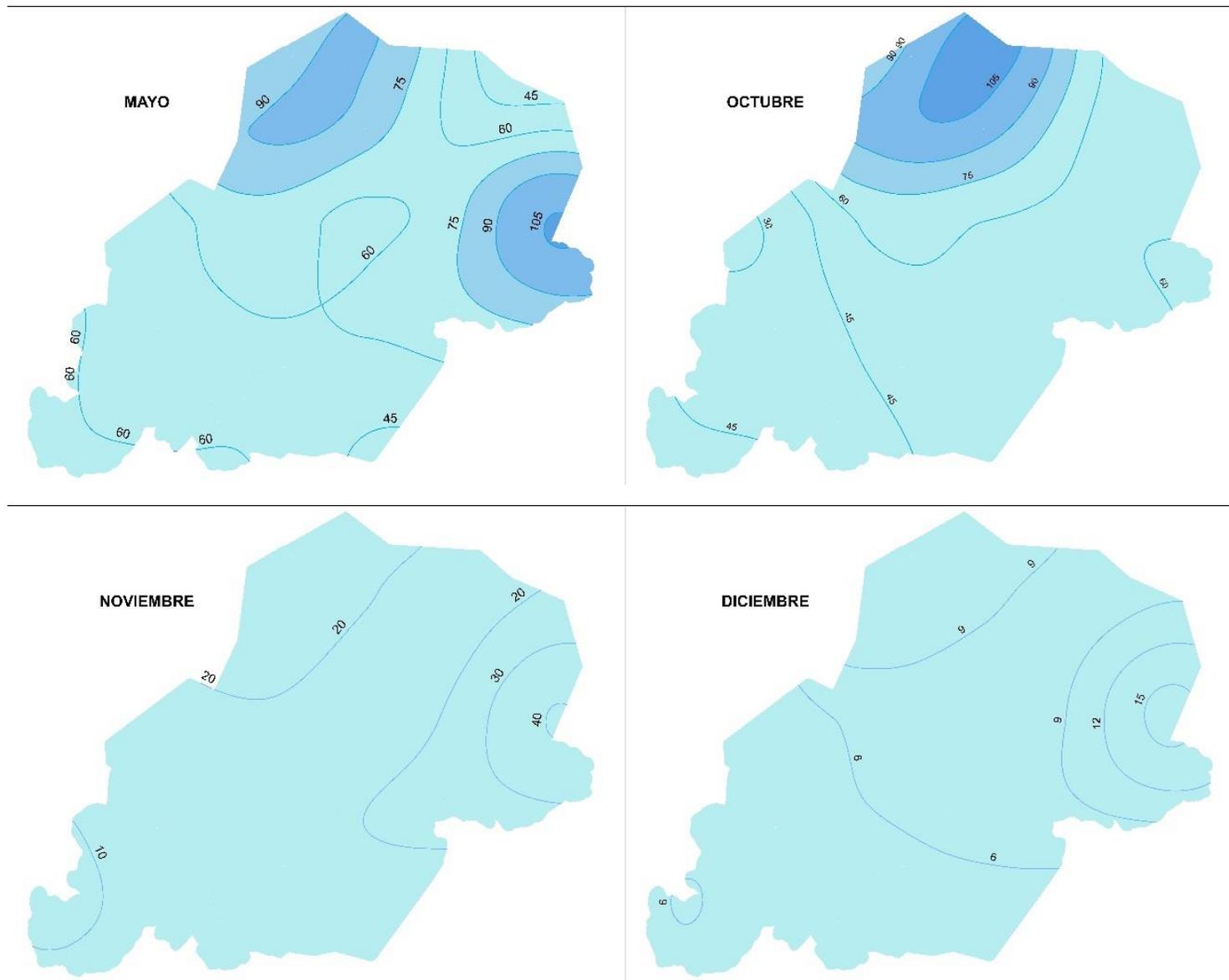
Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>P</b>	13.7	17.5	23.9	44.1	75.7	130.8	142.9	109.0	125.3	71.2	24.1	10.6
<b>T. Máx</b>	19.8	21.2	23.5	25.2	24.7	22.7	20.9	20.9	20.3	20.0	19.8	19.8
<b>T. Med</b>	9.9	11.0	12.6	13.8	13.9	13.6	12.7	12.6	12.5	11.7	10.8	10.2
<b>Temp Mín</b>	-3.2	-1.5	0.8	3.8	5.0	4.8	3.9	3.8	4.1	4.3	-0.1	-2.3
<b>ETP</b>	42.4	41.2	50.3	51.4	51.9	46.6	44.7	43.9	39.6	40.7	39.9	41.6
<b>P-ETP</b>	-28.7	-23.7	-26.4	-7.3	23.9	84.1	98.2	65.0	85.7	30.5	-15.8	-31.1
<b>Reserva</b>	24.4	0.7	0.0	0.0	23.9	84.1	100.0	100.0	100.0	100.0	84.2	53.1
<b>VR</b>	-28.7	-23.7	-0.7	0.0	23.9	60.3	15.9	0.0	0.0	0.0	-15.8	-31.1
<b>Excedente</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	82.4	65.0	85.7	30.5	0.0	0.0
<b>Déficit</b>	0.0	0.0	-25.7	-7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>ETR</b>	42.4	41.2	24.6	44.1	51.9	46.6	44.7	43.9	39.6	40.7	39.9	41.6
<b>Esc</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.2	50.7	66.8	23.8	0.0	0.0
<b>I</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.2	14.3	18.9	6.7	0.0	0.0
<b>ETR+Esc+I</b>	13.7	17.5	23.9	44.1	75.7	106.9	142.9	109.0	125.3	71.2	24.1	10.6

**Tabla A 5.** Análisis de parámetros hidrológicos para la subcuenca Zapata (periodo 1951-2010).

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>P</b>	9.1	10.7	15.4	27.0	61.6	91.2	95.3	96.8	92.2	46.2	10.4	5.7
<b>T. Máx</b>	21.7	22.8	24.9	25.9	26.0	24.5	23.6	23.9	22.8	22.7	22.3	21.7
<b>T. Med</b>	9.5	10.6	12.7	14.4	15.2	14.9	14.1	14.1	13.8	12.9	10.8	9.7
<b>Temp Mín</b>	-2.7	-2.0	-0.2	2.7	5.2	6.8	6.7	6.8	6.4	4.9	0.2	-2.6
<b>ETP</b>	50.5	50.1	61.4	60.5	60.6	51.1	49.6	48.7	43.3	46.5	47.0	50.4
<b>P-ETP</b>	-41.4	-39.4	-46.0	-33.5	1.0	40.1	45.8	48.1	48.9	-0.3	-36.6	-44.7
<b>Reserva</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	40.1	85.0	85.0	85.0	84.7	48.1	3.4
<b>VR</b>	-3.4	0.0	0.0	0.0	1.0	39.1	44.9	0.0	0.0	-0.3	-36.6	-44.7
<b>Excedente</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	48.1	48.9	0.0	0.0	0.0
<b>Déficit</b>	-38.1	-39.4	-46.0	-33.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>ETR</b>	12.5	10.7	15.4	27.0	60.6	51.1	49.6	48.7	43.3	46.5	47.0	50.4
<b>Esc</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	28.2	28.6	0.0	0.0	0.0
<b>I</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	19.9	20.3	0.0	0.0	0.0
<b>ETR+Esc+I</b>	9.1	10.7	15.4	27.0	61.6	90.2	95.3	96.8	92.2	46.2	10.4	5.7

**IX. ANEXO FIGURAS**





**Figura A 1.** Resultados de interpolación de precipitación mensual en los Llanos de Apan (periodo 1951-2010)

## X. REFERENCIAS

- Abdelkader, A., Elshorbagy, A., Tuninetti, M., Laio, F., Ridolfi, L., Fahmy, H., & Hoekstra, A. Y. (2018). National water, food, and trade modeling framework: The case of Egypt. *Sci Total Environ*, 639, 485-496. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.197
- Abraham, T., Muluneh, A., Girma, R., Hartmann, A., & Tekleab, S. (2022a). Quantifying sensitivity of groundwater recharge to land use and land cover changes by improving model performance on the wetland dominated Tikur Wuha Watershed, Ethiopia. *Water Cycle*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.08.002>
- Abraham, T., Muluneh, A., Girma, R., Hartmann, A., & Tekleab, S. (2022b). Quantifying sensitivity of groundwater recharge to land use and land cover changes by improving model performance on the wetland dominated Tikur Wuha Watershed, Ethiopia. *Water Cycle*, 3, 112-125. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.08.002>
- Ahmadzadeh, H., Morid, S., Delavar, M., & Srinivasan, R. (2016). Using the SWAT model to assess the impacts of changing irrigation from surface to pressurized systems on water productivity and water saving in the Zarrineh Rud catchment. *Agricultural Water Management*, 175, 15-28. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.026>
- Alarcón Zúñiga, B., & Cervantes Martínez, T. (2012). Producción de Semilla de Alfalfa en el Valle del Mezquital, Hidalgo. In: Texcoco, Estado de México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. In FAO (Ed.), *Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje* (Vol. 56, pp. 322). Retrieved from <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Amorim, W. S., Valduga, I. B., Ribeiro, J. M. P., Williamson, V. G., Krauser, G. E., Magtoto, M. K., & de Andrade Guerra, J. B. S. O. (2018). The nexus between water, energy, and food in the context of the global risks: An analysis of the interactions between food, water, and energy security. *Environmental Impact Assessment Review*, 72, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.05.002>
- Balanay, R., & Halog, A. (2019). 3 - Tools for circular economy: Review and some potential applications for the Philippine textile industry. In S. S. Muthu (Ed.), *Circular Economy in Textiles and Apparel* (pp. 49-75): Woodhead Publishing.
- Bhatt, R., Singh, P., Majumder, D., & Kaur, G. (2023). Climate-smart technologies for reducing water footprints in different cropland ecosystems: a meso analysis. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 1-22.
- Blanco, M., Doorslaer, B., & Britz, W. (2012). *Assessing agriculture-water relationships: a Pan-European multidimensional modelling approach*. Paper presented at the New challenges for EU agricultural sector and rural areas. Which role for public policy, Italy. [https://www.researchgate.net/publication/236272122\\_Assessing\\_agriculture-water\\_relationships\\_a\\_Pan-European\\_multidimensional\\_modelling\\_approach](https://www.researchgate.net/publication/236272122_Assessing_agriculture-water_relationships_a_Pan-European_multidimensional_modelling_approach)
- Blanco, M., Doorslaer, B., Britz, W., & H.P, W. (2012). *Exploring the feasibility of integrating water issues into the CAPRI model*.
- BUREAU. (2017). Water Facts: Worldwide Water Supply. Retrieved from <https://www.usbr.gov/mp/arwec/water-facts-ww-water-sup.html>
- Cavelan, A., Golfier, F., Colombano, S., Davarzani, H., Deparis, J., & Faure, P. (2022). A critical review of the influence of groundwater level fluctuations and temperature on LNAPL contaminations in the context of climate change. *Science of The Total Environment*, 806, 150412.
- Caycho Torres, L. R. (2020). *Modelación geoespacial con SIG en la identificación de las zonas vulnerables y cuantificación de la erosión hídrica, Cuenca del Río Huarmey*. (Licenciatura).

- Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Retrieved from <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4669>
- CEDRSSA. (2015). *La agricultura y la gestión sustentable del agua en México*. Retrieved from [www.cedrssa.gob.mx](http://www.cedrssa.gob.mx): [http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/100Reporte\\_FINALLa\\_agricultura\\_y\\_la\\_gestion\\_sustentable\\_del\\_agua\\_19-01-2015\\_PDF.pdf](http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/100Reporte_FINALLa_agricultura_y_la_gestion_sustentable_del_agua_19-01-2015_PDF.pdf)
- CEPAL. (2016). La Economía del Cambio Climático en Honduras: Mensajes Clave 2016. In (Vol. LC/MEX/L.1221). Ciudad de México: Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas - Honduras.
- Chamizo-Checa, S., Otazo-Sánchez, E., Gordillo-Martínez, A., Suárez-Sánchez, J., González-Ramírez, C., & Muñoz-Nava, H. (2020). Megacity Wastewater Poured into A Nearby Basin: Looking for Sustainable Scenarios in A Case Study. *Water*, 12(3), 824. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/824>
- Chamizo, S., Otazo, E. M., & Gordillo, A. J. (2018). *Escenarios de balance hídrico y emisiones de metano en el Valle del Mezquital*. (Doctorado ). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo [uaeh.edu.mx](http://uaeh.edu.mx). Retrieved from <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/2065> (ICBI-D/617/2018)
- COESPO. (2021). *Hidalgo. Población Total por municipio y Tasa de Crecimiento Total 2010-2015 y 2015-2020*. Hidalgo [hidalgo.gob.mx](http://hidalgo.gob.mx) Retrieved from [http://poblacion.hidalgo.gob.mx/pdf/tasa%20crecim\\_2015\\_2020.pdf](http://poblacion.hidalgo.gob.mx/pdf/tasa%20crecim_2015_2020.pdf)
- CONABIO. (2006). Llanos de Apan. Retrieved from [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp\\_069.html](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_069.html)
- CONABIO. (2013). Uso de suelo y vegetación. Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (2003). *Disponibilidad de agua por acuífero* Retrieved from: [datos.gob.mx/busca/dataset/disponibilidad-de-agua-subterranea-de-conagua](http://datos.gob.mx/busca/dataset/disponibilidad-de-agua-subterranea-de-conagua)
- CONAGUA. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- CONAGUA. (2011). Agua en el mundo In *Estadísticas de agua en Mexico* [conagua.gob.mx](http://conagua.gob.mx).
- CONAGUA. (2013). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Apan (1320), Estado de Hidalgo* Mexico, D.F.: Diario oficial de la federación Retrieved from [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/hidalgo/DR\\_1320.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/hidalgo/DR_1320.pdf)
- CONAGUA. (2019). Localizador de Aguas Nacionales, Zonas Federales, Descargas Residuales y Extracción de Materiales. Retrieved from <https://sigagis.conagua.gob.mx/locprepda20/>
- CONAGUA. (2021). Información de estaciones climatológicas Retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Corona-López, E., Román-Gutiérrez, A. D., Acevedo-Sandoval, O. A., & Otazo-Sánchez, E. M. (2023). Evolución socioeconómica de los Llanos de Apan (1960-2022) Hidalgo, México *Nova Scientia*.
- Corona-López, E., Román-Gutiérrez, A. D., Otazo-Sánchez, E. M., Guzmán-Ortiz, F. A., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2021). Water–Food Nexus Assessment in Agriculture: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4983. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/9/4983>
- Del Carmen González-Catalán, M., & Rodríguez-Orozco, A. R. (2022). Seguridad alimentaria: Pilares y formas de medición. *IBN SINA*, 13(2), 12.
- Del Rincón, D., A. (2017). *El valor del agua en México y su aprovechamiento en el campo. Descripción de las asociaciones público privadas como vía para maximizar el uso del recurso hídrico en*

- el sector agrícola*. (Maestría en Derecho Constitucional Contemporáneo). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente Tlaquepaque, Jalisco: ITESO., Repositorio Universitario Retrieved from <http://hdl.handle.net/11117/4227>
- Delavar, M., Morid, S., Morid, R., Farokhnia, A., Babaeian, F., Srinivasan, R., & Karimi, P. (2020). Basin-wide water accounting based on modified SWAT model and WA+ framework for better policy making. *Journal of Hydrology*, 585, 124762. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124762>
- Deo, A., Karmakar, S., & Arora, A. (2022). Rainwater harvesting and water balance simulation-optimization scheme to plan sustainable second crop in small rain-fed systems. *Journal of Environmental Management*, 323, 116135. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116135>
- Du, S., Liu, G., Li, H., Zhang, W., & Santagata, R. (2022). System dynamic analysis of urban household food-energy-water nexus in Melbourne (Australia). *Journal of Cleaner Production*, 379, 134675. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134675>
- Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K., & Prasanna, B. (2022). Global maize production, consumption and trade: Trends and R&D implications. *Food Security*, 14(5), 1295-1319.
- Fan, Y., Wu, Y., Wang, Y., Jiang, S., Yu, S., & Shang, H. (2022). An Analysis of Surface Water&ndash;Groundwater Interactions Based on Isotopic Data from the Kaidu River Basin, South Tianshan Mountain. *Water*, 14(14), 2259. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/14/2259>
- FAO. (2016). Uso del agua *Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua en la agricultura*. Retrieved from <https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use>
- Fernández, P., Velarde, S., Hernández, M., & Murguía, V. (2014). Dinámica demográfica 1990-2010 y proyecciones de población 2010-2030. *Consejo Nacional de Población (CONAPO)*.
- Flach, R., Skalský, R., Folberth, C., Balkovič, J., Jantke, K., & Schneider, U. A. (2020). Water productivity and footprint of major Brazilian rainfed crops – A spatially explicit analysis of crop management scenarios. *Agricultural Water Management*, 233, 105996. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105996>
- Galindo, L. M., Escalante, R., & Asuad, N. (2004). El proceso de urbanización y el crecimiento económico en México. *Estudios demográficos y Urbanos*, 289-312.
- Gassman, P., Reyes, M., Green, C., & Arnold, J. (2007). Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions, The. *Transactions of the ASABE*, 50. doi:10.13031/2013.23637
- GE, H. (2011). *Plan estatal de desarrollo 2011-2016*. Gobernador Constitucional del Estado de Hidalgo Retrieved from <http://planestataldedesarrollo.hidalgo.gob.mx/docs/Eje5.pdf>
- Gebremariam, F. T., Habtu, S., Yazew, E., & Teklu, B. (2021). The water footprint of irrigation-supplemented cotton and mung-bean crops in Northern Ethiopia. *Heliyon*, 7(4), e06822. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06822>
- Getachew, B., & Manjunatha, B. R. (2022). Impacts of Land-Use Change on the Hydrology of Lake Tana Basin, Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Global Challenges*, 6(8), 2200041. doi:<https://doi.org/10.1002/gch2.202200041>
- Giordano, M., Barron, J., & Ünver, O. (2019). Chapter 5 - Water Scarcity and Challenges for Smallholder Agriculture. In C. Campanhola & S. Pandey (Eds.), *Sustainable Food and Agriculture* (pp. 75-94): Academic Press.
- Gómez Martín, E., Máñez Costa, M., Egerer, S., & Schneider, U. A. (2021). Assessing the long-term effectiveness of Nature-Based Solutions under different climate change scenarios. *Science of The Total Environment*, 794, 148515. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148515>

- Grafton, R. Q., Williams, J., & Jiang, Q. (2015). Food and water gaps to 2050: preliminary results from the global food and water system (GFWS) platform. *Food Security*, 7(2), 209-220. doi:10.1007/s12571-015-0439-8
- Hunt, R. G., Franklin, W. E., & Hunt, R. G. (1996). LCA — How it came about. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(1), 4-7. doi:10.1007/BF02978624
- IMTA. (2009). Extractor Rápido de Información Climatológica v. 3.0 (ERIC III). Retrieved from <https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode:estclimgw>
- INEGI. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2016, 2020). Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional). 14-12-2017. Retrieved from <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s6gw.html>
- Iturbide, M., Fernández, J., Gutiérrez, JM, Bedia, J., Cimadevilla, E., Díez-Sierra, J., Manzanos, R., Casanueva, A., Baño-Medina, J., Milovac, J., Herrera, S., Cofiño, AS, San Martín, D., García-Díez, M., Hauser, M., Huard, D., Yelekci, Ö. (2021). Repositorio que respalda la implementación de los principios FAIR en el Atlas. doi:10.5281/zenodo.3691645.
- IWA. (2018). *The reuse opportunity*. Retrieved from London SW1H 0QS, UK: <https://www.iwa-network.org/wp-content/uploads/2018/02/OFID-Wastewater-report-2018.pdf>
- Jarabo, P. (2022). Aspectos generales sobre servicios ecosistémicos e instrumentos como el pago de servicios hidrológicos y fondos de agua para asegurar la calidad y seguridad hídrica. *Momba'etéva*, 2(2), 68-83.
- Jin, T., Zhang, X., Xie, J., Liang, J., & Wang, T. (2023). Study on hydrological response of runoff to land use change in the Jing River Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*. doi:10.1007/s11356-023-29526-1
- Kaddoura, S., & El Khatib, S. (2017). Review of water-energy-food Nexus tools to improve the Nexus modelling approach for integrated policy making. *Environmental Science & Policy*, 77, 114-121. doi:10.1016/j.envsci.2017.07.007
- Kroes, J., & van Dam, J. (2020). Soil Water Atmosphere Plant. Retrieved from <https://www.swap.alterra.nl/>
- Li, C., Wu, Y., Gao, B., Zheng, K., Wu, Y., & Li, C. (2021). Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China. *Ecological Indicators*, 132, 108328. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108328>
- Li, S., Congmou, Z., Li, Y., Dong, B., Tan, K., & Deng, X. (2023). Agricultural space function transitions in rapidly urbanizing areas and their impacts on habitat quality: An urban–Rural gradient study. *Environmental Impact Assessment Review*, 99, 107019. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107019>
- Lin, L., Chen, Y. D., Hua, D., Liu, Y., & Yan, M. (2019). Provincial virtual energy-water use and its flows within China: A multiregional input-output approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104486. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104486>
- Liu, X., Liu, W., Tang, Q., Liu, B., Wada, Y., & Yang, H. (2022). Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change. *Earth's Future*, 10(4), e2021EF002567.
- Lu, C., Ji, W., Hou, M., Ma, T., & Mao, J. (2022). Evaluation of efficiency and resilience of agricultural water resources system in the Yellow River Basin, China. *Agricultural Water Management*, 266, 107605.
- Luan, X., Wu, P., Sun, S., Wang, Y., & Gao, X. (2018). Quantitative study of the crop production water footprint using the SWAT model. *Ecological Indicators*, 89, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.046>

- Lubis, R. F., Delinom, R., Martosuparno, S., & Bakti, H. (2018). Water-Food Nexus in Citarum Watershed, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118, 012023. doi:10.1088/1755-1315/118/1/012023
- Majid, A., Cardenes, I., Zorn, C., Russell, T., Colquhoun, K., Bañares-Alcantara, R., & Hall, J. W. (2020). An analysis of electricity consumption patterns in the water and wastewater sectors in South East England, UK. *Water (Switzerland)*, 12(1). doi:10.3390/w12010225
- Majidi, M., Alizadeh, A., Vazifedoust, M., Farid, A., & Ahmadi, T. (2015). Analysis of the Effect of Missing Weather Data on Estimating Daily Reference Evapotranspiration Under Different Climatic Conditions. *Water Resources Management*, 29(7), 2107-2124. doi:10.1007/s11269-014-0782-0
- Maldonado Mejía, W.-S. (2023). *Crecimiento poblacional y su relación con la demanda de agua en los últimos 20 años en el municipio de Temixco, Morelos*. (Licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de Morelos Morelos. Retrieved from <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/3565>
- Mannan, M., Al-Ansari, T., Mackey, H. R., & Al-Ghamdi, S. G. (2018). Quantifying the energy, water and food nexus: A review of the latest developments based on life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 193, 300-314.
- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Abreu, N. J., Urrutia, R., Echeverría, C., Lagos, O., . . . Barra, R. O. (2022). Influence of Climate and Land Cover/Use Change on Water Balance: An Approach to Individual and Combined Effects. *Water*, 14(15). doi:10.3390/w14152304
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600.
- Mishra, R. K. (2023). Fresh water availability and its global challenge. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 4(3), 1-78.
- Mishra, S., Kumar, R., & Kumar, M. (2023). Use of treated sewage or wastewater as an irrigation water for agricultural purposes- Environmental, health, and economic impacts. *Total Environment Research Themes*, 6, 100051. doi:<https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100051>
- Mortada, S., Abou Najm, M., Yassine, A., El Fadel, M., & Alamiddine, I. (2018). Towards sustainable water-food nexus: An optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, 178, 408-418. doi:10.1016/j.jclepro.2018.01.020
- Mundial, B. (2017). Extracción anual de agua dulce. Retrieved from [https://datos.bancomundial.org/indicador/ER.H2O.FWIN.ZS?end=2017&most\\_recent\\_year\\_desc=true&start=2017](https://datos.bancomundial.org/indicador/ER.H2O.FWIN.ZS?end=2017&most_recent_year_desc=true&start=2017)
- Nations, U. (2015). *World Population Prospects Working paper* Department of Economic and Social Affairs. United Nations New York United Nations. Retrieved from <https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/Key Findings WPP 2015.pdf>
- Ortiz, R. (2012). *El cambio climático y la producción agrícola*. Retrieved from <https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Equidad-Desarrollo-Social/109.pdf>
- Oti, J. O., Kabo-bah, A. T., & Ofosu, E. (2020). Hydrologic response to climate change in the Densu River Basin in Ghana. *Heliyon*, 6(8), e04722. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04722>
- Perez Soriano, K. M., & Reyes Mondragon, C. T. (2022). Modelamiento del índice Biological Monitoring Working Party en cinco cuencas hidrográficas del Perú aplicando el programa ArcGIS 10.6.
- Peter, C., Specka, X., Aurbacher, J., Kornatz, P., Herrmann, C., Heiermann, M., . . . Nendel, C. (2017). The MiLA tool: Modeling greenhouse gas emissions and cumulative energy demand of

- energy crop cultivation in rotation. *Agricultural Systems*, 152, 67-79. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.12.008>
- Quarshie, P. T., Abdulai, S., & Fraser, E. D. G. (2023). (Re)assessing Climate-Smart Agriculture practices for sustainable food systems outcomes in sub-Saharan Africa: The case of Bono East Region, Ghana. *Geography and Sustainability*, 4(2), 112-126. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.02.002>
- Quentin, G., & Claudia, R. (2014). Global Food and Water System model. Retrieved from <https://www.fe2wnetwork.org/sites/default/files/The%20FE2W%20Network%20Prospectus.pdf>
- Rasul, G. (2016). Managing the food, water, and energy nexus for achieving the Sustainable Development Goals in South Asia. *Environmental Development*, 18, 14-25. doi:10.1016/j.envdev.2015.12.001
- Ren, D., Yang, Y., Yang, Y., Richards, K., & Zhou, X. (2018). Land-Water-Food Nexus and indications of crop adjustment for water shortage solution. *Sci Total Environ*, 626, 11-21. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.071
- REPPA. (2020). Usos de agua Retrieved from <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>
- Revollo-Fernández, D. A., Rodríguez-Tapia, L., & Morales-Novelo, J. A. (2019). Economic value of water in the manufacturing industry located in the Valley of Mexico Basin, Mexico. *Water Resources and Economics*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wre.2019.01.004>
- Romo Cruz, J. (2019). Hidalgo: El corazon logístico de México zonas y corredores industriales Retrieved from [https://amf.org.mx/wp-content/uploads/2019/05/SEDECO\\_-Desayuno-AMF\\_07062019.pdf](https://amf.org.mx/wp-content/uploads/2019/05/SEDECO_-Desayuno-AMF_07062019.pdf)
- SAGARPA, & SIAP. (2018). *Atlas Agroalimentario 2012-2018*. Mexico Retrieved from [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018)
- Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & López-Cruz, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(2), 177-183. Retrieved from [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222014000200012](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000200012)
- Sánchez-Cohen, I., Bueno-Hurtado, P., Esquivel-Arriaga, G., & Velásquez-Valle, M. A. (2015). Impact of crop sensitivity to water stress in rain feed areas of Mexico. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 14(1), 61-74. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/4555/455544907007.pdf>
- Sánchez, R., & Mata Vásquez, H. (2006). *Cálculo de volúmenes de agua para riego por goteo en el cultivo de jitomate en la planicie huasteca* (A-373). Retrieved from <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/121.pdf>
- Sathre, R., Antharam, S. M., & Catena, M. (2022). Water security in South Asian cities: a review of challenges and opportunities. *CivilEng*, 3(4), 873-894.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34-35, 13-30. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/454/45437342002.pdf>
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23, 44-55. Retrieved from <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i23.8579>
- SEI. (2023). Publicaciones WEAP. Retrieved from <https://www.weap21.org/index.asp?action=216>
- Shankar Ram, N., Sharma, V. K., Mirza, K., Goyal, A., Chowdary, V., & Jha, C. (2022). Multi-criteria based land and water resource development planning using geospatial technologies. *Geospatial Technologies for Land and Water Resources Management*, 103-123.
- SIAP. (2018). Anuario estadístico de la producción agrícola Retrieved from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

- SIAP. (2019). Cierre de la producción agrícola *anual*. Retrieved from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SIATL. (2019). Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrograficas Retrieved from [https://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/](https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/)
- Siddik, M. S., Tulip, S. S., Rahman, A., Islam, M. N., Haghghi, A. T., & Mustafa, S. M. T. (2022). The impact of land use and land cover change on groundwater recharge in northwestern Bangladesh. *Journal of Environmental Management*, 315, 115130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115130>
- Sieber, J. (2018). WEAP: History and Credits. Retrieved from <https://www.weap21.org/index.asp?action=219&NewLang=EN>
- Smajgl, A., Ward, J., & Pluschke, L. (2016). The water–food–energy Nexus – Realising a new paradigm. *Journal of Hydrology*, 533, 533-540. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.12.033
- SMN. (2010). Normales climatológicas por Estado *Información climatológica por estado* Retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=hgo>
- SMN. (2018). Normales Clomatológicas por Estado. Retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>
- Soliman, M. M., Hesselberg, T., Mohamed, A. A., & Renault, D. (2022). Trophic transfer of heavy metals along a pollution gradient in a terrestrial agro-industrial food web. *Geoderma*, 413, 115748. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115748>
- Titicayo-Benavidez, O. (2023). Factores de sostenibilidad y resiliencia territorial ante el cambio climático en municipio de Villa Poopo del departamento de Oruro. *UMSS*. Retrieved from <http://ddigital.umss.edu.bo:8080/jspui/bitstream/123456789/36612/1/TITICAYO%20BENAVIDEZ%20OSMAR%20MARTIN.pdf>
- Uhlenbrook, S., Yu, W., Schmitter, P., & Smith, D. M. (2022). Optimising the water we eat—rethinking policy to enhance productive and sustainable use of water in agri-food systems across scales. *The Lancet Planetary Health*, 6(1), e59-e65.
- UNESCO. (2019). Garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos: implementación de políticas públicas en América Latina y el Caribe, 240. Retrieved from [https://unesdoc.unesco.org/notice?id=p::usmarcdef\\_0000370289](https://unesdoc.unesco.org/notice?id=p::usmarcdef_0000370289)
- WEAP. (2023). Water Evaluation and Planning (Version 2023.0). Stockholm Environment Institute Retrieved from <https://www.weap21.org/index.asp?action=213>
- Wu, Z., Tian, G., Xia, Q., Hu, H., & Li, J. (2023). Connotation, calculation and influencing factors of the water-use rights benchmark price: A case study of agricultural water use in the Ningxia Yellow River irrigation area. *Agricultural Water Management*, 283, 108300. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108300>
- Wubneh, M. A., Worku, T. A., & Chekol, B. Z. (2023). Climate change impact on water resources availability in the kiltie watershed, Lake Tana sub-basin, Ethiopia. *Heliyon*, 9(3), e13941. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13941>
- Yillia, P. T. (2016). Water-Energy-Food nexus: framing the opportunities, challenges and synergies for implementing the SDGs. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 68(3), 86-98. doi:10.1007/s00506-016-0297-4
- Zavala Cabanillas, J. L. (2013). *Estrategia integral para el aprovechamiento y uso eficiente del agua para riego en Sinaloa* (Master). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6564/tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Zhang, C.-Y., & Oki, T. (2023). Water pricing reform for sustainable water resources management in China's agricultural sector. *Agricultural Water Management*, 275, 108045.
- Zhang, C., Chen, X., Li, Y., Ding, W., & Fu, G. (2018). Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies. *Journal of Cleaner Production*, 195, 625-639. doi:10.1016/j.jclepro.2018.05.194
- Zhang, Z., Qi, H., Chen, H., Zhang, X., Tan, C., Bai, X., . . . Li, H. (2023). The control efficiency and mechanism of heavy metals by permeable pavement system in runoff based on enhanced infiltration materials. *Journal of Environmental Management*, 329, 117042. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117042>
- Zhu, Q., & Zhang, H. (2022). Groundwater drought characteristics and its influencing factors with corresponding quantitative contribution over the two largest catchments in China. *Journal of Hydrology*, 609, 127759.