



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Economía “Vasco de Quiroga”

División de Estudios de Posgrado

Doctorado en Desarrollo y Sustentabilidad

Tesis

**Evaluación de la sostenibilidad hídrica
agrícola de 4 cultivos clave integrando
concesiones climáticas ajustados y huella
hídrica en la Cuenca de Cuitzeo en el 2023**

Presenta:

M.C. Biol. Gerardo Andrés Reyes Abrego

Para obtener el grado de:

Doctor en Desarrollo y Sustentabilidad

Director de tesis:

Dr. Salvador García Espinosa

Tutores

Dra. Katia Beatriz Villafán Vidales

Dra. Erna Martha López Granados

Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Dr. Mauricio Perea Peña

Morelia, Michoacán, junio del 2026



Dedicatoria

A la memoria de mi padre, cuyo ejemplo de entereza y amor incondicional atraviesa cada página de este trabajo. Sin embargo, su ausencia física no ha hecho más que fortalecer mi convicción de honrarlo desde el esfuerzo y gratitud.

A mi madre, pilar silencioso y guerrero cotidiano, porque sin su ternura y su sacrificio esta meta jamás habría sido posible. Además, por enseñarme que la perseverancia tiene nombre de mujer.

A mi novia, compañera de rutas y de sueños, faro en los días de tormenta estadística y en los mapas de la incertidumbre. Por lo tanto, este logro también es tuyo.

A mis hermanas y hermano, testigos de mis ausencias y celebradores de mis pequeñas victorias. En contraste con los momentos difíciles, ustedes me devolvieron siempre la confianza.

A los profesores del DODESU, por haber sembrado en mí la curiosidad rigurosa y la pasión por el conocimiento de la sustentabilidad y la parte social que complementa la parte cuantitativa con la cualitativa. Por consiguiente, cada modelo conceptual aquí planteado lleva su impronta.

A mi asesor, guía riguroso y paciente. Porque sin sus observaciones críticas esta tesis no tendría rumbo. Además, por enseñarme que la excelencia nace del diálogo honesto. Por lo tanto, su huella permanece en cada conclusión. Gracias, maestro.

A mis sinodales, cuyas observaciones críticas elevaron la calidad de este trabajo. Asimismo, por enseñarme que la ciencia se construye en el diálogo exigente pero respetuoso.

A mis compañeros del Doctorado, por todo su aporte ya que cada uno de ellos tiene un expertise del cual fui aprendiendo mucho y demostrar que podemos apoyarnos sin importar lo difícil que sea.

Finalmente, a todos aquellos que, desde su lugar, creyeron que un investigador también escribe con el corazón.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero reconocimiento a quienes, desde distintas trincheras, hicieron posible la culminación de este trabajo de investigación.

Dr. Salvador García Espinosa. Doctor en Geografía por la UNAM. Profesor-Investigador Titular adscrito a la Facultad de Arquitectura de la UMSNH.

Dra. Dra. Katia Beatriz Villafán Vidales. Doctora en Ciencias en Negocios Internacionales (UMSNH). Profesora-investigadora de la Facultad de Economía de la UMSNH. Miembro del SNI (1) del CONAHCYT.

Dra. Erna Martha López Granados. Profesor Investigador Titular. Miembro del SNI (1) del CONAHCYT. Profesora fundadora del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra.

Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe. Profesor investigador / titular b tiempo completo. Profesor investigador UMSNH. Doctorado en Ingeniería Civil, con mención en Gestión de Recursos Hídricos por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Grado de Doctor con reconocimiento Cum Laude. Miembro del SNI (1) del CONAHCYT

Dr. Mauricio Perea Peña. Profesor e Investigador (Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales), Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales). Miembro del SNI (1) del CONAHCYT.

Agradezco mi conocimiento y expertice al Dr. Juan Manuel ortega Rodríguez de la Facultad de Biología por compartir todo su conocimiento y enseñanzas, las cuales me ayudaron a comprender y amar lo referente a los Sistemas de Información Geográfica. DEPT.

Mi profundo agradecimiento a la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo que a través de la Facultad de Economía que me facilito los medios necesarios para poder cursar el Doctorado en Desarrollo y Sustentabilidad (DODESU).

Por último, agradezco al Concejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada.

RESUMEN

La gestión del recurso hídrico en la cuenca de Cuitzeo enfrenta desafíos estructurales derivados de la interacción entre concesiones de agua, disponibilidad climática y demanda agrícola. Este estudio analiza de manera integral la relación entre los volúmenes concesionados y efectivos registrados en el REPDA, la calidad y ajuste de datos climáticos, y la huella hídrica de los principales cultivos, con el objetivo de evaluar la sostenibilidad del uso del agua en la región. Inicialmente, se detectó que los sistemas para otorgar concesiones hídricas no integran factores hidroclimáticos provocando así una asignación excesiva del agua disponible. Esta situación se agrava en municipios como Morelia y Zinapécuaro, donde la demanda hídrica, tanto urbana como agrícola, es elevada. Asimismo, se observa una transición en el uso del suelo hacia cultivos de alto valor económico y alta demanda hídrica, como el aguacate y la fresa, los cuales desplazan sistemas tradicionales de temporal, intensificando la presión sobre la disponibilidad de agua. En segundo lugar, se abordó la problemática de la disponibilidad de datos climáticos confiables. A través de la comparación entre datos de estaciones de CONAGUA y la base satelital NASA POWER, se evaluaron métodos de ajuste mediante diferencia porcentual y regresión lineal. Los resultados indican que, aunque existen discrepancias significativas (especialmente en precipitación), los modelos de regresión presentan un mejor desempeño en términos de error cuadrático, lo que los posiciona como una alternativa más robusta para completar series incompletas. Finalmente, a partir de la aplicación del CROPWAT 8.0, se calculó la huella hídrica (verde y azul) de cultivos representativos en un total superior a 36,000 unidades productivas. Los resultados evidencian un déficit hídrico estructural de 218.81 hm³ anuales, al comparar la demanda total de los cultivos con el volumen concesionado. El maíz concentra la mayor proporción de la huella hídrica azul, mientras que cultivos como el aguacate presentan un impacto desproporcionado en zonas de recarga. En conjunto, estos hallazgos confirman la existencia de un desbalance entre la asignación, disponibilidad y uso del agua, lo que compromete la sostenibilidad agrícola de la cuenca. Se concluye que es necesario reorientar las políticas hídricas mediante la regulación de concesiones, la mejora en la gestión de datos y la promoción de cultivos más eficientes en el uso del agua.

Palabras Clave: Cuenca de Cuitzeo, Huella Hídrica, Agricultura, Títulos concesionados, Gestión Hídrica

ABSTRACT

Water resource management in the Cuitzeo Basin faces structural challenges arising from the interaction between water concessions, climatic availability, and agricultural demand. This study comprehensively analyzes the relationship between the concessioned and actual water volumes recorded in the Public Registry of Water Rights (REPDA), the quality and adjustment of climatic data, and the water footprint of the main crops, with the aim of evaluating the sustainability of water use in the region. Initially, it was identified that the systems used to grant water concessions do not incorporate hydroclimatic factors, resulting in an excessive allocation of the available water resources. This situation is particularly pronounced in municipalities such as Morelia and Zinapécuaro, where both urban and agricultural water demands are high. Furthermore, a land-use transition toward high-value, water-intensive crops, such as avocado and strawberry, has been observed. These crops are gradually replacing traditional rainfed agricultural systems, thereby increasing pressure on water availability. Secondly, the study addressed the challenge of obtaining reliable climatic data. By comparing data from CONAGUA meteorological stations with the NASA POWER satellite database, adjustment methods based on percentage difference and linear regression were evaluated. The results indicate that, although significant discrepancies exist—particularly in precipitation data—regression models perform better in terms of mean squared error, making them a more robust alternative for completing incomplete climatic records. Finally, through the application of CROPWAT 8.0, the water footprint (green and blue) of representative crops was calculated for more than 36,000 production units. The results reveal a structural water deficit of 218.81 hm³ per year when total crop water demand is compared with the volume of water concessioned. Maize accounts for the largest proportion of the blue water footprint, while crops such as avocado have a disproportionate impact in groundwater recharge areas. Overall, these findings confirm the existence of an imbalance between water allocation, availability, and use, which compromises the agricultural sustainability of the basin. The study concludes that water management policies must be reoriented through stricter regulation of water concessions, improved data management practices, and the promotion of crops that use water more efficiently.

Keywords: Cuitzeo Basin, Water Footprint, Agriculture, Water Concessions, Water Resource Management

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT.....	IV
ÍNDICE GENERAL.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
MARCO TEÓRICO.....	4
SUSTENTABILIDAD	4
RECURSO HÍDRICO	8
ADMINISTRACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO	9
CONAGUA.....	11
Consejos de Cuenca.....	12
DISTRITOS DE RIEGO	13
PROBLEMÁTICA EN SU DISTRIBUCIÓN	14
Gestión de cuencas hidrológicas.....	15
Estrés hídrico en México.....	18
DISTRIBUCIÓN DEL AGUA PARA LA AGRICULTURA.....	19
USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA EN MÉXICO	20
ANTECEDENTES	24
SUSTENTABILIDAD EN LA ACTUALIDAD	24
USOS ACTUALES DE LOS MODELOS PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN DE AGUA EN RIEGO AGRÍCOLA	26
USO DEL CROPWAT	27
JUSTIFICACIÓN	29
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	30
GENERAL.....	30
ESPECÍFICOS	30
HIPÓTESIS	31
GENERAL.....	31
ESPECÍFICOS	31
OBJETIVO	32
GENERAL.....	32
ESPECÍFICOS	32
ÁREA DE ESTUDIO.....	33
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	33
CLIMA	35

HIDROLOGÍA	36
EDAFOLOGÍA	37
USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	39

CAPÍTULO I

ANÁLISIS DE LOS VOLÚMENES EFECTIVOS Y CONCESIONADOS DEL REDPA EN LA CUENCA DE CUITZEO ANTE LA PRESIÓN AGRÍCOLA.....	41
RESUMEN	41
INTRODUCCIÓN.....	43
JUSTIFICACIÓN	45
PREGUNTA	45
HIPÓTESIS	46
OBJETIVO GENERAL	46
OBJETIVOS PARTICULARES	46
METODOLOGÍA	47
ANÁLISIS DEL REGISTRO PÚBLICO DE DERECHOS DE AGUA (REPDA).....	47
RESULTADOS	49
NÚMERO DE TÍTULOS CONCESIONADOS POR AÑO	49
<i>Títulos superficiales.....</i>	<i>49</i>
<i>Títulos Subterráneos</i>	<i>50</i>
AUTORIDADES QUE OTORGAN CONCESIONES	51
NÚMERO DE USUARIOS Y SCIAN SECTORIAL DEL 2023	52
<i>Superficial.....</i>	<i>52</i>
<i>Subterráneo.....</i>	<i>55</i>
USO CONCESIONADO DEL AGUA.....	58
<i>Superficial.....</i>	<i>58</i>
<i>Subterráneo.....</i>	<i>59</i>
GASTO DE AGUA POR MUNICIPIO	60
<i>Superficial.....</i>	<i>60</i>
<i>Subterráneo.....</i>	<i>61</i>
USOS DE AGUA POR MUNICIPIO	63
<i>Superficial.....</i>	<i>63</i>
<i>Subterráneo.....</i>	<i>64</i>
USO AGRÍCOLA MUNICIPAL	65
<i>Superficial.....</i>	<i>65</i>
<i>Subterráneo.....</i>	<i>66</i>
ÁREA Y PRODUCCIÓN DE CULTIVOS DE EN LA CUENCA	67
VALOR DE PRODUCCIÓN DE PRINCIPALES CULTIVOS	68
ÁREAS Y VALOR DE PRODUCCIÓN DE CULTIVOS PRIORITARIOS	69

PORCENTAJE DE HECTÁREAS DE CULTIVOS PRINCIPALES	70
DISCUSIÓN	73
CONCLUSIONES.....	76
RECOMENDACIONES.....	77
CAPITULO II	
AJUSTE PORCENTUAL DE DATOS CLIMÁTICOS SATELITALES PARA COMPLETAR SERIES INCOMPLETAS EN ESTACIONES LOCALES.....	78
RESUMEN	78
INTRODUCCIÓN.....	80
JUSTIFICACIÓN	82
PREGUNTA	82
HIPÓTESIS	83
OBJETIVO GENERAL	83
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	83
METODOLOGÍA	84
RESULTADOS	87
SELECCIÓN DE DATOS PARA ANÁLISIS DE COMPARACIÓN	87
EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN: REGRESIÓN LINEAL VS. DIFERENCIA PORCENTUAL.....	88
COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE VARIABLES CLIMÁTICAS DEL 2020	91
COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE VARIABLES CLIMÁTICAS DEL 2023	93
DISCUSIÓN	96
CONCLUSIONES.....	98
RECOMENDACIONES.....	99
CAPÍTULO III	
EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE CULTIVOS BÁSICOS EN LA CUENCA DE CUITZEO MEDIANTE CROPWAT 8.0 EN EL 2023.....	100
RESUMEN	100
INTRODUCCIÓN.....	102
JUSTIFICACIÓN	105
PREGUNTA	106
HIPÓTESIS	107
OBJETIVOS.....	107
OBJETIVO GENERAL.....	107
OBJETIVOS PARTICULARES	107
METODOLOGÍA	108
RESULTADOS	111
SUPERFICIE AGRÍCOLA Y PROPORCIÓN ENTRE SISTEMAS DE RIEGO Y TEMPORAL	111
COMPOSICIÓN Y PREDOMINIO DE LOS CULTIVOS PRINCIPALES	111
ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN MUNICIPAL	112
RELACIÓN ENTRE CULTIVO Y SUPERFICIE AGRÍCOLA.....	114
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA HUELLA HÍDRICA DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE LOS CULTIVOS DE IMPORTANCIA	116

<i>Huella hídrica verde de riego de Aguacate.....</i>	<i>116</i>
<i>Huella hídrica azul de riego de Aguacate.....</i>	<i>117</i>
<i>Huella hídrica verde de temporal de Aguacate.....</i>	<i>118</i>
<i>Huella hídrica verde de riego de Maíz.....</i>	<i>121</i>
<i>Huella hídrica azul de riego de Maíz.....</i>	<i>122</i>
<i>Huella hídrica verde de temporal de Maíz.....</i>	<i>123</i>
<i>Huella hídrica verde de riego de Sorgo.....</i>	<i>125</i>
<i>Huella hídrica azul de riego de Sorgo.....</i>	<i>126</i>
<i>Huella hídrica verde de temporal de Sorgo.....</i>	<i>127</i>
<i>Huella hídrica verde de riego de Frijol.....</i>	<i>129</i>
<i>Huella hídrica azul de riego de Frijol.....</i>	<i>130</i>
<i>Huella hídrica verde de temporal de Frijol.....</i>	<i>131</i>
ANÁLISIS DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL CON EL AGUA CONCESIONADA	133
DISCUSIÓN	135
CONCLUSIONES.....	140
RECOMENDACIONES.....	141
DISCUSIÓN GENERAL	142
CONCLUSIONES GENERALES	145
RECOMENDACIONES GENERALES	146
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	147

Índice de tablas

Tabla 1.- Cuadro comparativo de las corrientes del desarrollo sostenible	7
Tabla 2.- Tipos de suelo que se encuentran en la Cuenca de Cuitzeo	38
Tabla 3.- Uso de suelo y Vegetación que se encuentran en la Cuenca de Cuitzeo.	39
Tabla 4.- Autoridad que ha emitido los títulos de concesiones en la Cuenca de Cuitzeo en el año 2020, 2021, 2022 y 2023.....	52
Tabla 5.- Cultivos presentes en los municipios de la cuenca de Cuitzeo en el 2023.....	68
Tabla 6.- Tabla de selección de estaciones para análisis.	87
Tabla 7.- Proyección del 2017 y su comparación de la precipitación de diferencia porcentual y regresión.....	89
Tabla 8.- Proyección del 2017 y su comparación de la temperatura de diferencia porcentual y regresión.....	90
Tabla 9.- Proyección del 2020 y su comparación de la temperatura de diferencia porcentual y regresión.....	91
Tabla 10.- Proyección del 2020 y su comparación de la temperatura de diferencia porcentual y regresión.....	92
Tabla 11.- Proyección del 2023 y su comparación de la temperatura de diferencia porcentual y regresión.....	94
Tabla 12.- Proyección del 2023 y su comparación de la temperatura de diferencia porcentual y regresión.....	95

Tabla 13.- superficie agrícola total y por sistema de producción en la Cuenca de Cuitzeo en el 2023.	111
Tabla 14.- Área de cultivos primordiales en la Cuenca de Cuitzeo	113
Tabla 15.- Descripción de la huella hídrica verde (m ³ /año) del Aguacate de riego por intervalos de clasificación.	117
Tabla 16.- Descripción de la huella hídrica azul (m ³ /año) del Aguacate de riego por intervalos de clasificación.	118
Tabla 17.- Descripción de la huella hídrica verde (m ³ /año) del Aguacate de temporal por intervalos de clasificación.	119
Tabla 18.- Descripción de la huella hídrica verde (m ³ /año) del Maíz de riego por intervalos de clasificación.	121
Tabla 19.- Descripción de la huella hídrica azul (m ³ /año) del Maíz de riego por intervalos de clasificación.	122
Tabla 20.- Descripción de la huella hídrica verde (m ³ /año) del Maíz de temporal por intervalos de clasificación.	123
Tabla 21.- Descripción de la huella hídrica verde (m ³ /año) del Sorgo de riego por intervalos de clasificación.	125
Tabla 22.- Descripción de la huella hídrica azul (m ³ /año) del Sorgo de riego por intervalos de clasificación.	126
Tabla 23.- Descripción de la huella hídrica verde (m ³ /año) del Sorgo de temporal por intervalos de clasificación.	127
Tabla 24.- Descripción de la huella hídrica verde (m ³ /año) del Frijol de riego por intervalos de clasificación	129
Tabla 25.- Descripción de la huella hídrica azul (m ³ /año) del Frijol de riego por intervalos de clasificación	130
Tabla 26.- Descripción de la huella hídrica verde (m ³ /año) del Frijol de temporal por intervalos de clasificación	131
Tabla 27.- Títulos y volumen del REDPA	133
Tabla 28.- Huella hídrica azul agrícola por cultivo en la cuenca	134

Índice de figuras

Figura 1.- Modelo esquemático de un socio ecosistema.	5
Figura 2.- Objetivos de Desarrollo Sostenible	6
Figura 3.- Diagrama de problemas ambientales realizado por actividades antropogénicas.	9
Figura 4.- Niveles de organización de las cuencas en México. Fuente: Imagen modificada tomada de Challenger et al. (2018)	10
Figura 5.- Consejos de cuenca	13
Figura 6.- Uso consultivo de los distintos usos del agua agrupado	14
Figura 7.- Organigrama de los distritos de riego en México	15
Figura 8.- Regiones Hidrológicas Administrativas de México	16
Figura 9.- Cuencas Hidrológicas en México	17
Figura 10.- Grafica de porcentaje de presión por RHA	18
Figura 11.- Uso del agua por los distintos sectores económicos	19
Figura 12.- Ubicación geográfica de la Cuenca de Cuitzeo	34
Figura 13.- Distribución de los tipos de climas en la Cuenca de Cuitzeo	36
Figura 14.- Distribución de los tipos de escurrimientos de la Cuenca de Cuitzeo	37

Figura 15.- Distribución de los tipos de suelos en la Cuenca de Cuitzeo	38
Figura 16.- Distribución de los tipos de suelos en la Cuenca de Cuitzeo	40
Figura 17.- Mapa registros concesionados del REPDA en la Cuenca de Cuitzeo.	47
Figura 18.- Títulos Concesionados Superficiales	49
Figura 19.- Títulos Concesionados Subterráneos	50
Figura 20.- Títulos concesionados de uso del agua por el SCIAN superficial.....	53
Figura 21.- Volumen Concesionado de uso del agua por el SCIAN superficial	54
Figura 22.- Títulos concesionados de uso del agua por el SCIAN Subterráneos	56
Figura 23.- Volumen Concesionado de uso del agua por el SCIAN Subterráneo	57
Figura 24.- Usos concesionados del agua superficial.....	59
Figura 25.- Usos concesionados del agua Subterráneo	60
Figura 26.- Gasto hídrico por Municipio Superficial	61
Figura 27.- Gasto hídrico por Municipio Subterráneo	62
Figura 28.- Volumen efectivo y concesionado por municipio Superficial	63
Figura 29.- Volumen efectivo y concesionado por municipio Subterráneo	65
Figura 30.- Uso agrícola municipal Superficial	66
Figura 31.- Uso agrícola Municipal Subterráneo	67
Figura 32.- Valor de producción de principales cultivos en la Cuenca de Cuitzeo	69
Figura 33.- Áreas y valor de producción de principales cultivos por riego.....	70
Figura 34.- Áreas y porcentaje de los principales cultivos por municipio.....	71
Figura 35.- Estaciones presentes dentro de la cuenca de Cuitzeo	84
Figura 36.- Principales cultivos de importancia dentro de la cuenca de Cuitzeo	109
Figura 37.- Relación de área entre los sistemas de riego y temporal de los cultivos agrícolas.....	114
Figura 38.- Áreas de cultivo agrícola en la Cuenca de Cuitzeo 2023 en sistema de temporal.....	115
Figura 39.- Áreas de cultivo agrícola en la Cuenca de Cuitzeo 2023 en sistema de riego.....	116
Figura 40.- Distribución de Huella Hídrica de cultivos de aguacate en la Cuenca de Cuitzeo.	120
Figura 41.- Distribución de Huella Hídrica de cultivos de maíz en la Cuenca de Cuitzeo	124
Figura 42.- Distribución de Huella Hídrica de cultivos de sorgo en la Cuenca de Cuitzeo	128
Figura 43.- Distribución de Huella Hídrica de cultivos de frijol en la Cuenca de Cuitzeo	132

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un problema por el uso indiscriminado del agua, debido principalmente a satisfacer las demandas energéticas y de consumo que se incrementan con el aumento de la población y de los modelos de vida urbanos. Esto tiene repercusiones en las distintas esferas de la sustentabilidad, lo que afecta y pone en riesgo la disponibilidad hídrica a la población actual y futura. El mayor consumo de agua se da en el sector alimenticio, primordialmente la agricultura y esto se puede deber a que la demanda alimenticia aumenta constantemente por el crecimiento poblacional y por lo tanto requiere de mayor cantidad de agua para regar grandes áreas de sus distintos cultivos. Habría que considerar que en muchos casos se hace un uso ineficiente del agua debido a la forma de irrigar los cultivos.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022) dependiendo del nivel de insumos valorados por el impacto y la gestión de recursos disponibles en la zona, distingue cuatro tipos de producción agrícola, las cuales son: baja, mediana (orientado a la subsistencia), mediana (orientado al mercado) y alta. Por su parte, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) divide entre tipos de agricultura tradicional y protegida, con base en el tipo de tecnificación utilizada para obtener sus productos (SADER, 2017a; SIAP, 2018). El consumo hídrico entre los distintos tipos de producción agrícola es desigual sin existir registros del consumo que requiere cada tipo para cada uno dentro de una región.

En América Latina y el Caribe, el riego agrícola tiene rangos de uso de hasta el 86% del total del agua disponible en un área de cultivo indicando que muchos países tienen una eficacia hídrica muy baja (Salazar et al., 2022). Esto se debe principalmente a las técnicas agrícolas utilizadas, donde su uso tradicional depende de saturar las zonas de cultivo hasta un 90% del agua, el cual la gran mayoría es evaporada y otra infiltrada a los mantos acuíferos, y solo un porcentaje pequeño es aprovechado por el cultivo (Nuralievich y Rahmonovich, 2021). Por el contrario, la denominada agricultura protegida es una técnica que trata de controlar factores bióticos y abióticos, pero sobre todo reduce el desperdicio del agua mediante sus diferentes técnicas de riego en aproximadamente un 40% en cuanto a la anterior (Mahmoud y Elnoby, 2022).

En México, el sector agrícola concentra la mayor parte del consumo de agua, con un 76% del total, seguida por el abastecimiento público, que representa el 14% y termoeléctricas y diversos sectores industriales los cuales emplean un 5% del recurso

hídrico (INEGI, 2025b). Las cifras antes mencionadas no discriminan el gasto hídrico entre cada una de las técnicas y sistemas agrícolas, por lo que no existen datos específicos para cada tipo de riego existentes. Aunado a ello, no existen datos puntuales del gasto hídrico o huella hídrica agrícola para cada una de las cuencas hidrológicas, sino en conjunto de Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA), basando los registros en solo el gasto superficial sin tomar en cuenta toda la dinámica hídrica que está involucrada. Es por ello que se sabe que varias cuencas de la República Mexicana están pasando por un déficit hídrico, en las cuales está presente la Cuenca de Cuitzeo de la Region Hidrológica Administrativa (RHA) VIII Lerma-Santiago-Pacífico, como también el acuífero número 1602 Morelia-Queréndaro (SINA, 2021).

Determinar el consumo de agua resulta factible a través del análisis de la huella hídrica, esta permite cuantificar el volumen de recurso de agua disponible, ya sea superficial o subterránea, dentro de una cuenca hidrológica durante el periodo anual. Este cálculo puede ser llevado mediante interpolación de variables meteorológicas vinculadas al ciclo hidrológico, así como de los factores abióticos que inciden en dicho proceso (Aparicio, 1992; Cifuentes et al., 2022).

Existen muchos factores que causan un déficit o estrés hídrico en una región, pero lo más determinante es la dinámica hídrica que existe en una región, que involucra desde la precipitación fluvial de la región, hasta la recarga de los mantos acuíferos y el agua consumida y utilizada para distintos sectores de uso antrópico. Como se mencionó, el sector agrícola es el de mayor consumo, por lo que cuantificar su gasto hídrico mediante la huella hídrica con base en los distintos sistemas de riego utilizados permitirá a que los tomadores de decisiones generen nuevas y mejores políticas públicas para lograr una mayor la eficiencia del recurso hídrico. También, el analizar estas políticas de las diferentes instituciones en sus distintos niveles de organización, permitirá conocer que se ha realizado para afrontar el problema hídrico existente en la región. Por último, comprender a cabalidad el costo-beneficio del producto agrícola y el gasto hídrico, se espera que sea un factor para determinar la técnica de riego más adecuada en cuanto al rendimiento de producción y el valor recaudado del producto cultivado.

Actualmente, hay distintas técnicas de recopilación de datos para conocer la gestión del agua, algunas se consideran costosas, laboriosas, tardadas, etc., y esto dificultan el conocer los resultados en un periodo de tiempo corto. Sin embargo, se puede utilizar herramientas con base en las tecnologías modernas capaz de simplificar grandes

cantidades de información a menor costo, como acontece con los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Esta investigación permitirá el conocimiento de las huellas hídricas entre cada una de las técnicas agrícolas y sus diferentes sistemas de riego para cada cultivo y se considera que puede ayudar a conocer su distribución y sostenibilidad dentro de una cuenca hidrológica con base en el conocimiento científico para definir nuevas políticas y poder afrontar escenarios futuros graves e inciertos en materia hídrica de acuerdo a la crisis ambiental que se vive dentro de la Cuenca de Cuitzeo en el 2023.

Este documento sigue una estructura secuencial que abarca desde la introducción, el marco teórico, los antecedentes, la justificación, la pregunta de investigación, la hipótesis, los objetivos y el área de estudio, hasta llegar a la discusión y las conclusiones. Por lo tanto, su propósito es conducir al lector hacia el problema central: la medición de la huella hídrica. Además, cada capítulo presenta una organización homogénea que incluye resumen, introducción particular, justificación específica, pregunta e hipótesis propias, objetivos particulares, metodología detallada, resultados, discusión y conclusiones, lo cual facilita la comprensión individual de cada apartado y cada capítulo refuerza el tema principal.

En primer lugar, el capítulo 1 realiza un análisis comparativo entre volúmenes efectivos y concesionados, con fuente en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa). Dicho análisis examina títulos de concesión y gastos de agua por municipio y uso registrado, evidenciando que el uso agrícola es uno de los más relevantes en la cuenca de Cuitzeo.

Por otra parte, el capítulo 2 propone una estrategia de ajuste porcentual para datos climáticos satelitales, con el fin de completar series temporales incompletas; en consecuencia, ofrece una alternativa viable ante la ausencia de datos gubernamentales o deficiente infraestructura de estaciones.

Por último, el capítulo 3 calcula la huella hídrica de la cuenca para 2023 mediante el programa CROPWAT 8.0, empleando datos del capítulo 2 y polígonos de cultivos de temporal y riego, estimando así la huella para aguacate, maíz, sorgo y frijol. Finalmente, se exponen recomendaciones para mejorar la distribución del agua y hacer escalable la metodología a otras cuencas.

MARCO TEÓRICO

Sustentabilidad

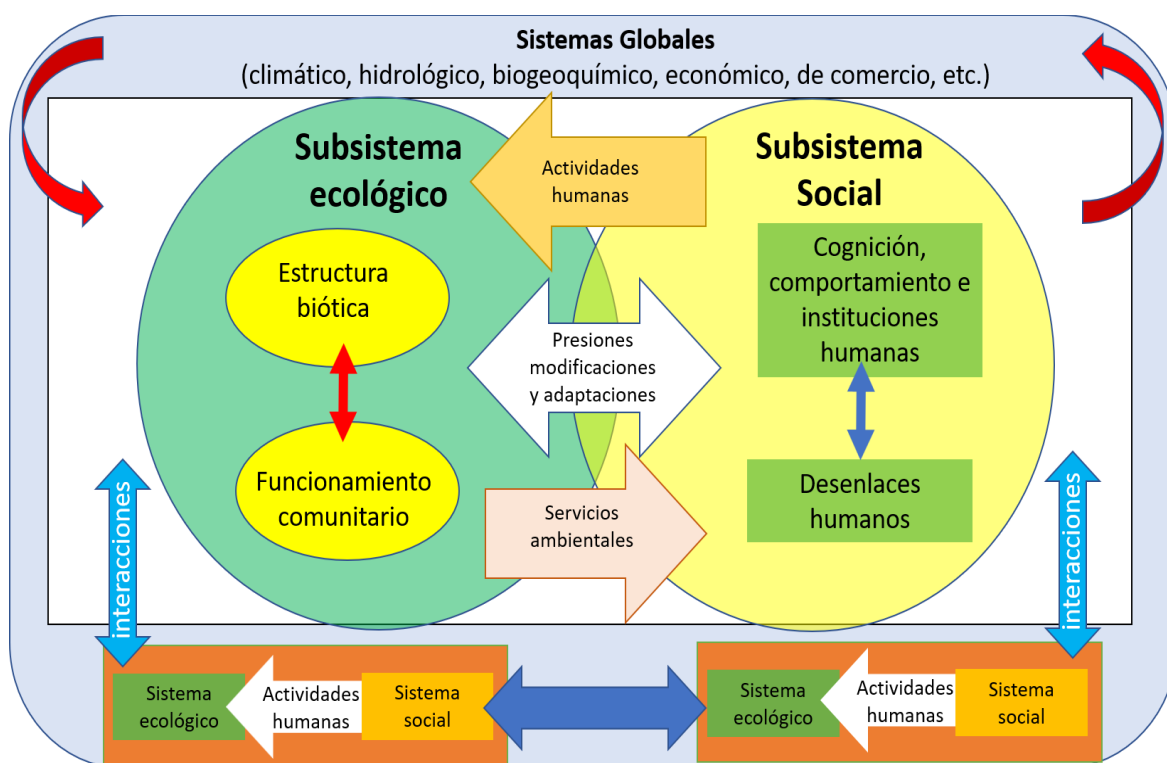
Los humanos han transformado su entorno como estrategia para hacer frente, sobre todo, a las adversidades climáticas y a los depredadores. Con ello, han desarrollado urbes, obras de infraestructura y sistemas de cultivo, todo ello gracias al avance de diversas tecnologías y líneas de investigación. A lo largo del tiempo se han modificado desde una perspectiva antropocéntrica afectando especies y ambiente con un efecto desencadenante (Bertalanffy, 1969). Cuando esta práctica se lleva a cabo de forma reiterada, sin dar tiempo a que los diversos ecosistemas afectados recuperen la capacidad de regeneración, desencadena impactos perjudiciales. Si esto no se remedia a tiempo, a menudo exige cuantiosos recursos económicos y un enorme esfuerzo y en otros casos, el daño puede ser irreversible y la única salida es localizar nuevas áreas de donde extraer los insumos requeridos. Estas acciones afectan en un principio de manera local, pero sus consecuencias pueden llegar hacer acumulativas o globales, perjudicando su ambiente o a otros seres vivos y así mismo, debido al patrón desmedido con el que se aprovechan los recursos naturales (Costanza et al., 1999; García, 2006; Martínez, 1995; Mass, 2019; Pierri y Foladori, 2001). A estas situaciones se les denomina sistema complejo, ya que pueden caracterizarse por la unión de varios procesos en cuyas interacciones constituyen la estructura de un sistema que funciona como una totalidad organizada, que permite ser estudiada mediante la investigación interdisciplinaria (Bertalanffy, 1969; García, 2006; Mass, 2019; Schaubroeck y Rugani, 2017). En muchas ocasiones el aprovechamiento de los insumos naturales de una localidad no se ven beneficiadas las comunidades cercanas en donde se da el mayor impacto, sino un pequeño grupo de personas que se apropian de los medios de producción, poniéndole un valor intrínseco a los recursos naturales (Leff, 1994; Martínez, 1995). Esto obliga a reconocer que su gestión no puede ser realizada únicamente mediante el conocimiento de las políticas públicas basadas en las ciencias biológicas como se venía pretendiendo. Así mismo, resulta imposible administrar el progreso humano si se omiten los fenómenos biológicos fundamentales, tales como la capacidad de soporte de los ecosistemas, los ciclos biogeoquímicos, así como los recursos y procesos que estos involucran (Challenger et al., 2018; Martínez, 1995; Ostrom, 2000; Pierri y Foladori, 2001).

Gracias a estas problemáticas se da el concepto de desarrollo sustentable, que a grandes rasgos es la coevolución de los socio-ecosistemas con el papel consumista de las

distintas actividades humanas para intentar preservar en lo máximo los recursos para generaciones futuras (Fig. 1). Este concepto ha tenido mayor relevancia en las últimas décadas debido a que hace referencia en mantener un equilibrio entre los recursos naturales y las necesidades del hombre sin llegar a agotarlas para que existan en un futuro y puedan llegar a ser utilizadas. Estos se sustentan principalmente en tres pilares o esferas mencionadas en Pierri y Foladori (2001) los cuales son:

- El ambiental: este trata de minimizar los impactos a los distintos ecosistemas tratando de conservar lo mayor posible los recursos, tratando de adoptar nuevas prácticas amigables al medio ambiente evitando su degradación lo más posible.
- El social: se trata del bienestar humano y en la repartición equitativa de los recursos con respecto a sus derechos humanos, justicia social, participación ciudadana y cultural.
- El económico: promueve actividades productivas que sean equitativas y sostenibles los cuales no agoten los recursos naturales pero que pueda ser viable económicamente para contribuir al bienestar social.

Figura 1.- Modelo esquemático de un socio ecosistema.



Fuente: Imagen modificada tomada de Challenger et al. (2018)

Este concepto fue concebido en la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en los ochentas en el informe Nuestro Futuro Común que llamo “Our common future” mejor conocido como informe Brundtland. Después, sería adoptado por 180 jefes de estado en el año de 1992 en Rio de Janeiro, en la conferencia de la ONU sobre el medio ambiente (ONU, 1987), la cual acordaron 27 principios vinculados a la sustentabilidad que tomaría relevancia en el programa mundial llamado Agenda 21. Desde entonces, la Organización de Cooperación de Desarrollo Económico (OCDE) ha trabajado en políticas ambientales y en actividades que han sido adoptadas por otros países miembros. Desde el 2015, miembros de la ONU aprobaron 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como parte de la agenda 2030 (Fig. 2), el cual es un llamado mundial para erradicar la pobreza, proteger al planeta y dar una mejor vida, calidad y perspectiva de todas las personas alrededor del mundo (ONU, 2024).

Figura 2.- Objetivos de Desarrollo Sostenible



Fuente: Imagen tomada de ONU (2024)

Para Pierri y Foladori (2001), existen tres corrientes principales de la sustentabilidad la cual se basa en:

Ambientalismo moderado o sustentabilidad débil. - es antropocéntrico, acepta límites naturales, y promueve desarrollo sustentable equilibrando crecimiento económico y

conservación, fundamentado en la economía ambiental neoclásica con influencia keynesiana y respaldo internacional.

Ecología conservacionista o sustentabilidad fuerte. está basada en el conservacionismo y la ecología profunda, promueve límites económicos y éticos, fundamentándose en la economía ecológica propuesta por Herman Daly y el crecimiento poblacional cero.

Corriente humanista crítica. esta tiene bases con raíces anarquistas y socialistas, promueve desarrollo sustentable mediante cambio social radical, justicia para sectores pobres y uso responsable de recursos, destacando sub-corrientes anarquista y marxista. La corriente anarquista se fundamenta en la ecología social y economía ecológica, sin apoyarse en restricciones físicas absolutas. Asimismo, se le conoce como ecología de los marginados, dado que en ella se reúnen saberes heredados de culturas originarias que conservan un entendimiento profundo del entorno natural. Dentro de la perspectiva marxista, la cuestión ambiental no se interpreta como una falla inherente a la sociedad en su conjunto, sino en consecuencia directa con la velocidad, su manejo y disposición que se explotan los recursos naturales.

Gudynas (2011) plantea una vertiente denominada sustentabilidad que llamo superfuerte, la cual asume la complejidad del entorno natural, promueve la intervención ciudadana, articula distintos tipos de conocimiento y asume una postura biocentrista, al mismo tiempo, descarta el crecimiento indefinido y niega que el mercado por si mismo pueda asegurar la conservación del medio ambiente (Tabla 1).

Tabla 1.- Cuadro comparativo de las corrientes del desarrollo sostenible

Elemento	Sustentabilidad débil	Sustentabilidad fuerte	Sustentabilidad super fuerte
Desarrollo	Crecimiento Material	Crecimiento material y bienestar social	Calidad de vida, calidad ecológica
Naturaleza	Capital natural	Capital natural, capital natural critico	Patrimonio natural
Valoración	Instrumental	Instrumental, ecológica	Múltiples valores humanos; valores intrínsecos
Perspectiva sobre la naturaleza	Antropocentrista	Antropocentrista	Biocentrista
Justicia y ambiente	Compensación económica por daño ambiental	Justicia ambiental	Múltiples valores humanos; valores intrínsecos Perspectiva sobre la naturaleza
Actores	Consumidores	Consumidor, ciudadano	Ciudadano
Escenario	Mercado	Sociedad	Sociedad
Saber científico	Conocimiento privilegiado	Conocimiento privilegiado	Pluralidad de conocimientos
Otros saberes	Ignorados	Minimizados	Respetados, incorporados
Practicas	Gestión técnica	Gestión técnica consultiva	Política ambiental

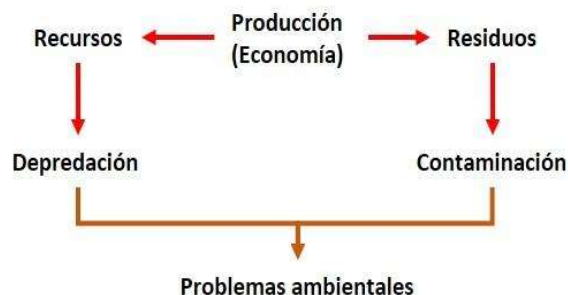
Fuente: Se presenta cuadro de las corrientes del desarrollo sostenible tomado de Gudynas (2011), donde se expresan las distintas corrientes de la sustentabilidad.

Recurso Hídrico

El agua es un recurso natural esencial, tanto para la sostenibilidad de los ecosistemas como para el desarrollo de las actividades humanas. Su disponibilidad y calidad son fundamentales para la vida, la biodiversidad y el bienestar social. Sin embargo, la creciente escasez, contaminación y desigualdad de su distribución de este recurso, han generado preocupación a nivel global. Por ello, el agua ocupa un lugar destacado en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente en el ODS 6, que busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Este enfoque resalta la necesidad urgente de proteger y gestionar eficientemente los recursos hídricos para asegurar un futuro sostenible. En los ODS se hace referencia a mejorar las tecnologías para un uso sostenible del agua, accesibilidad universal especialmente a personas vulnerables, el restablecimiento de los ecosistemas relacionados con el agua, generar programas y actividades para el saneamiento y uso eficaz y reducir su contaminación (ONU, 2024). Esto se debe principalmente a que el agua es un recurso natural renovable que es utilizado en muchas actividades antropogénicas, siendo relevante en todos los sectores económicos desde la agricultura, industria y servicio de abastecimiento público (Espinoza y Murillo, 2020; Kakwani y Kalbar, 2020; Ortiz y Gómez-Tagle, 2011; Pierri y Foladori, 2001). La demanda sobre este bien natural se ha intensificado progresivamente en dichas actividades, provocando una escasez derivada de factores como la industrialización, el crecimiento urbano, el incremento de la población y el aprovechamiento excesivo destinado a sostener patrones de consumo (Fig. 3). Actualmente, más de la mitad de la población vive en centros urbanos y se prevé que este aumente de manera exponencial, debido a esto podría provocar la insostenibilidad del agua a mediano plazo (Costanza et al., 1999; Kakwani y Kalbar, 2020; Pierri y Foladori, 2001; Tiburcio y Perevochtchikova, 2020). Siglos Atrás ya se había predicho que el aumento de la población devastaría los medios de producción y sucumbiría ante el hambre y enfermedades, principalmente por la apropiación de los recursos naturales mediante las guerras (Funtowicz y Ravetz, 2000; Munda, 2004; Ostrom, 2000).

Existen muchos factores que alteran la disponibilidad de los recursos como la contaminación, sobrexplotación y el mal manejo. Esto llega a afectar a varios sectores productivos y al ambiente, disminuyendo su disponibilidad, convirtiéndose en un problema a nivel mundial, en el cual grupos y comunidades compiten por este recurso cada vez más escaso (CONAGUA, 2018; Espinoza y Murillo, 2020; Garduño et al., 2014; Kakwani y Kalbar, 2020; Leff, 1994; Pedraza-Pérez, 2018; Pérez-Villarreal, 2018).

Figura 3.- Diagrama de problemas ambientales realizado por actividades antropogénicas.



Fuente: tomado y modificado de Pierri y Foladori (2001)

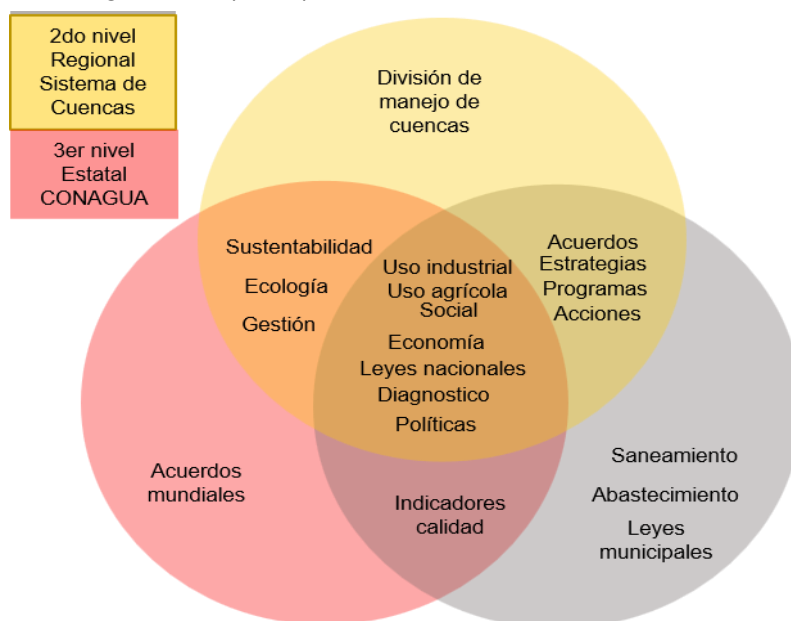
La desigualdad de la repartición del recurso hídrico en los territorios es un problema muy grave, debido a que solo el 77% de la población tiene acceso al 32% de los recursos renovables, el resto lo acaparan las industrias en su mayoría de carácter privado (Fernández et al., 2007; Pérez-Villarreal, 2018; Rolland y Vega, 2010; Salazar et al., 2022). En cuanto al saneamiento y alcantarillado hídrico, se calcula que 24 millones carecen de ella actualmente. Además, hay una gran cantidad de cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos que actualmente están disminuyendo sus niveles originales debido a distintos factores, pero principalmente por contaminación, demanda antrópica, fugas y desvío de causas (CONAGUA, 2018; Garduño et al., 2014; IMCO, 2023; Martínez, 1995; Pedraza-Pérez, 2018). La disminución progresiva de los cuerpos de agua también ha afectado la riqueza, abundancia, diversidad y composición de especies que en su mayoría dependen de este recurso y, por lo tanto, ha afectado la cantidad de sus poblaciones considerablemente. En algunas circunstancias, la capacidad de recuperación y la tolerancia de los ecosistemas pueden verse irregulares, especialmente en o que respecta a aquellas especies capaces de soportar dichas alteraciones, así como a la extinción de las que no logren adaptarse a estas transformaciones (Bracho, 2021; Pierri y Foladori, 2001). Esta crisis hídrica se debe a la relación humano-naturaleza y se ha perdido desde la generalización capitalista y ha sufrido modificaciones tanto en ritmo, nivel, profundidad y grado de conciencia (Leff, 1994; Pedraza-Pérez, 2018; Pierri y Foladori, 2001).

Administración del agua en México

La gestión del agua no consiste en resolver problemas de carácter técnico sino de políticas sociales, donde el conocimiento científico es un factor importante en la toma de decisiones. Por lo tanto, es indispensable contar con información confiable, actualizada y

accesible sobre los recursos hídricos y todo lo relacionado en el (Cifuentes et al., 2022). En el caso de México, la administración del agua tiene necesariamente que considerar el suministro para la totalidad de sus habitantes, que en la actualidad ascienden a 126,014,024 habitantes distribuidas en 2457 municipios. En ella, se distribuyen 3,651 localidades urbanas y 188,596 rurales, los cuales están condicionados geográficamente a una mayor o menor disponibilidad de agua (Camacho y Casados, 2017; IMCO, 2023; INEGI, 2020b). Con el propósito de hacer frente a estas dificultades, México distribuyó las competencias entre sus tres órdenes de gobierno para administrar el agua y los recursos hídricos. A nivel federal se encuentra la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) como órgano encargado a nivel nacional, con la ayuda del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), a nivel regional los organismos de cuenca y municipales y también están los Organismos Locales que aplican las políticas, estrategias, programas, acciones y sanciones pertinentes para su distribución. Tanto los Organismos regionales y municipales operan bajo la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y las normas y protocolos de la CONAGUA (Fig. 4).

Figura 4.- Niveles de organización de las cuencas en México. **Fuente:** Imagen modificada tomada de Challenger et al. (2018)



Fuente: Creacion propia apartir de CONAGUA (2013)

CONAGUA

La CONAGUA es un órgano normativo encargado de la preservación, administración y gestión de las aguas nacionales desde 1989, en el 2000 al separarse de la SEMARNAT, paso hacer el único órgano de gestión de las aguas nacionales. Esta comisión es encargada primordialmente de otorgar permisos de extracción y utilización de aguas, así como lo referente a las aguas residuales. También, elabora normas en materia hídrica, propone modificaciones a la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y administra el servicio meteorológico nacional, además de trabajar en conjunto con asociaciones de usuarios, empresas e instituciones de carácter privado y social. Asimismo, tiene la responsabilidad del alcantarillado, saneamiento y servicios de agua potable de la población donde normalmente son operados por los municipios locales, los cuales cuentan con organismos operadores para realizar estas actividades. Por último, cuenta con un Registro Público de Derechos del Agua (REPDa), el cual en 2018 contaba con 508,803 títulos, y representaba 88,840 millones de metros cúbicos de uso consuntivo y 182,513 de uso no consuntivo (CONAGUA, 2024a, 2024c; IMCO, 2023; Rolland y Vega, 2010).

Las concesiones federales de extracción de agua superficiales y subterráneas para los distintos sectores (agrícola, industrial, pecuario, acuacultura, agro-industrial, generación de energía, doméstico, público urbano y de servicios, etc.), tanto a personas físicas o morales son otorgadas por CONAGUA. Este otorga beneficios a los distintos sectores con tarifas preferenciales o con apoyos federales, los cuales tienen fecha de vencimiento y tienen que ser renovados cada periodo de tiempo. Estas concesiones indican quien autorizó, fecha de registro y vencimiento, volumen de aguas superficiales y subterráneas, tipo de uso y titular (CONAGUA, 2024b). No obstante, los aspectos relativos al volumen, la calidad, los destinos de uso y la preservación del agua se encuentran regulados en diversos ordenamientos legales, entre los que destacan: la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG), Ley de Aguas Nacionales (LAN) y Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección del Medio Ambiente (LGEEPA) (SINA, 2022a). A pesar de ello, la capacidad de gestión hídrica se ve superada por políticas erradas, un desempeño institucional deficiente y restricciones financieras.

Muchas instituciones públicas y privadas no cuentan con capacidades o entornos que puedan realizar sus funciones apropiadamente. Existen varios ejemplos de ello como son los encargados de cuenca, que tienen sus limitaciones para hacer cumplir sus

asignaciones y por lo tanto no pueden convocar a las partes interesadas. Otro caso es el de las instituciones a cargo del desarrollo del sistema de riego, que solo se abocan a sistemas de gran escala requiriendo un uso intensivo del capital, lo cual hacen depender de estrategias del sector público en lugar de dar oportunidades al sector privado de financiamiento. Otro ejemplo es el de algunas organizaciones de agricultores que responden a incentivos altamente distorsionados, que están relacionados con la política de apoyo agrícola y la fijación de precios del agua. Por último, personal no capacitado para cumplir funciones ocasionando varios tipos de errores (BancoMundial, 2023; IMCO, 2023; Tiburcio y Perevochtchikova, 2020).

Consejos de Cuenca

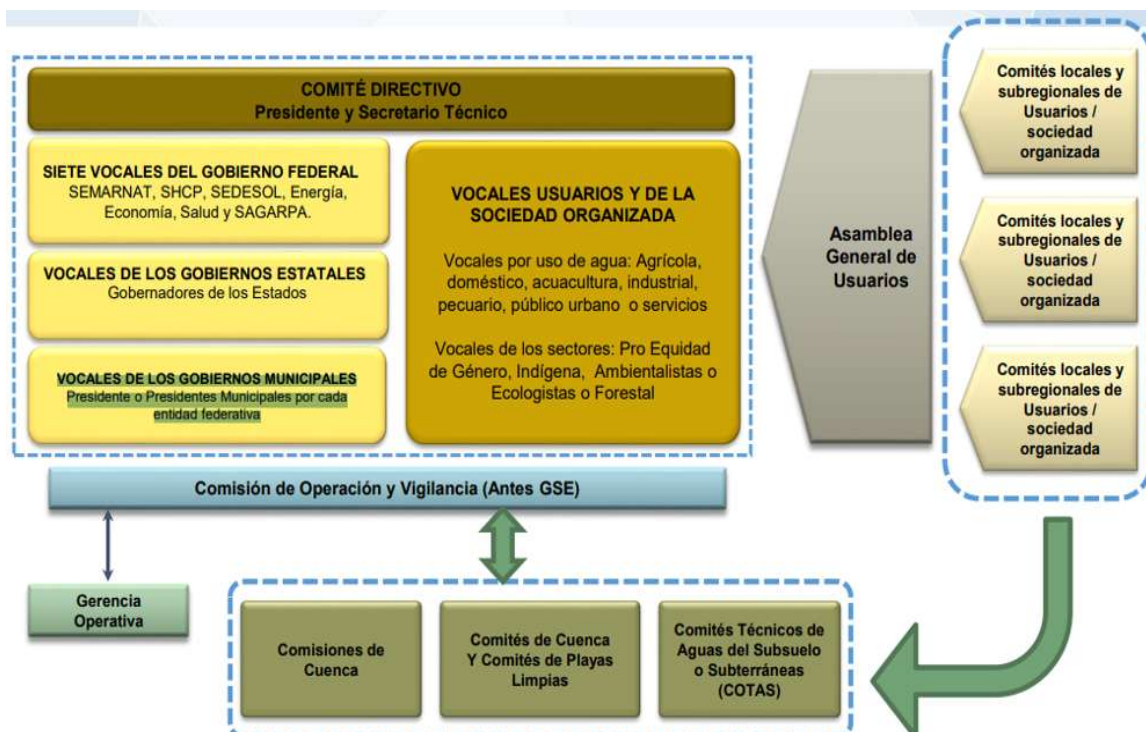
Los Consejos de Cuenca son órganos colegiados de integración mixta que realizan funciones de coordinación, apoyo, asesoría y consulta, sirviendo como medio entre CONAGUA, Instancias federales, estatales y municipales, usuarios y organizaciones de una cuenca o región hidrológica del que se trate. Cuando en 1992 se introdujo dentro de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), el consejo de cuenca como unidad de gestión y en ella se estableció los Consejos de Cuenca. A finales del 2018, se contaba con 26 consejos de cuenca, con 35 comisiones de cuenca para las subcuencas, 52 comités de cuenca para las microcuencas, 89 comités técnicos de aguas subterráneas para acuíferos y 42 comités para playas costeras. En el 2004, se reformó de nuevo la LAN, introduciendo el concepto de Organismos de Cuenca, otorgándole más funciones (CONAGUA, 2014, 2020b, 2024d).

Dentro de la LAN, las cuencas y los acuíferos son declarados como una unidad de gestión integrada para los recursos hídricos. También, deja a los Organismos de Cuenca como índole gubernamental y los Consejos de Cuenca de composición mixta con la participación de los tres órdenes de gobierno, de los usuarios y de las organizaciones de la sociedad para la toma de decisiones de la misma (Fig. 5).

Los Organismos de Cuenca se encargan de los enfoques técnicos, además de administrar el agua por medio de concesiones. Los consejos de cuenca se dividen en: Órganos Colegiados (los que tienen igualdad de voto), Órganos Mixtos (Gobierno, Usuarios y Sociedad) y Órganos de Coordinación y Concertación (mecanismos de apoyo [tres órdenes de gobierno, representantes de usuarios y organizaciones de la sociedad]).

A finales del 2018, se contaba con 26 consejos de cuenca, con 35 comisiones de cuenca para las subcuencas, 52 comités de cuenca para las microcuencas, 89 comités técnicos de aguas subterráneas para acuíferos y 42 comités para playas costeras (CONAGUA, 2014, 2024d).

Figura 5.- Consejos de cuenca



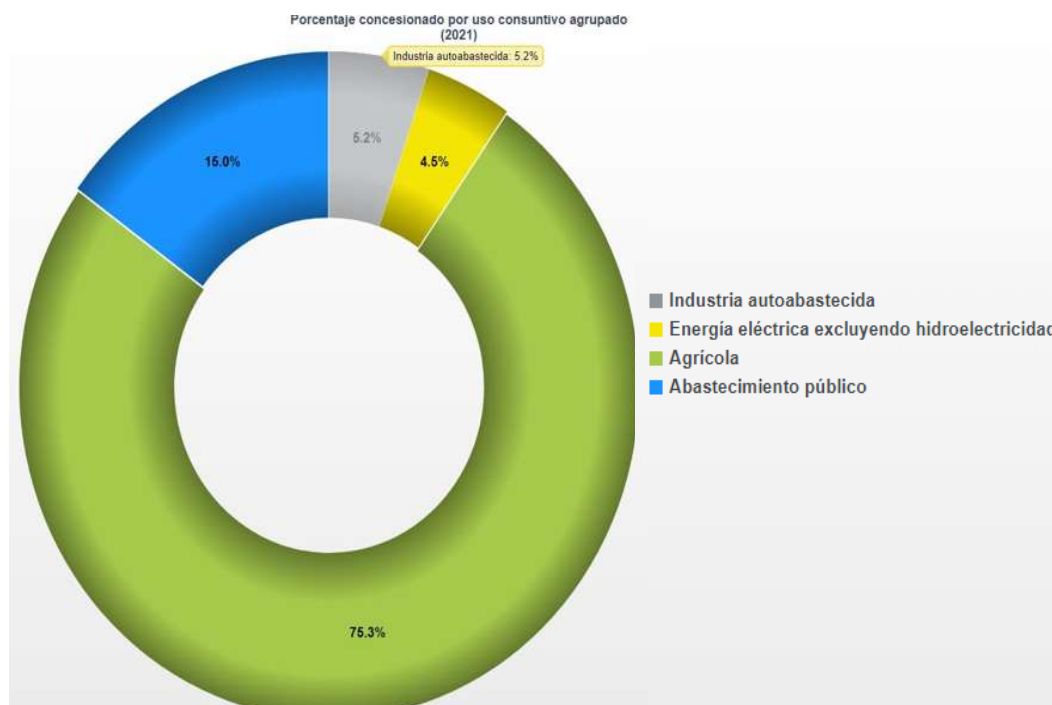
Fuente: tomado de CAMCPA (2026).

Distritos de Riego

Los usos que se le dan al agua dentro de las diferentes cuencas en los principales sectores son el uso agrícola, industrial autoabastecida, energía eléctrica y abastecimiento público. El sector que más consume agua es la agricultura (Fig. 6). Esto se debe principalmente a que el uso agrícola se encuentra agrupado con otros usos como acuicultura, pecuario, usos múltiples y otros.

Para la gestión agrícola se requieren grandes cantidades de agua, de las cuales, en los noventa, el gobierno federal inició el proceso de transferir la operación, conservación y administración de la infraestructura hidro agroecológica de los distritos de riego (Fig. 6). Estos comprenden 3.2 millones de hectáreas donde son consideradas zonas agrícolas

Figura 6.- *Uso consultivo de los distintos usos del agua agrupado*



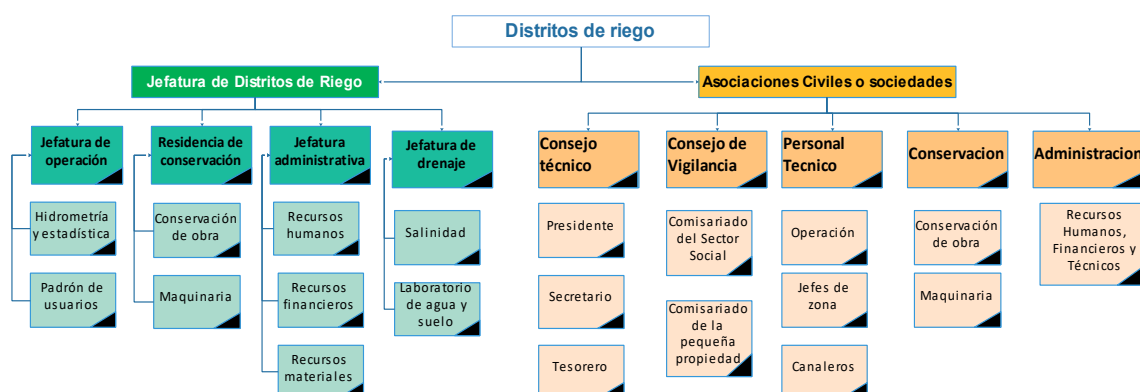
Fuente: tomado de SINA (2022b)

estratégicas para la producción de alimentos y fibras. Estos se pueden abastecer de bombeo por corrientes, bombeo de pozos, gravedad de derivación y gravedad de presas. Existe también las unidades de riego las cuales son operadas por ejidatarios y pequeños propietarios, que en muchos casos se encuentran organizados en las distintas unidades (SINA, 2022a). Los distritos de riego se encuentran organizadas en su mayoría por tres jefaturas y una residencia de conservación. Mientras que las asociaciones civiles o sociedades se organizan mediante un consejo directivo, consejo de vigilancia y un gerente técnico (Fig. 7).

Problemática en su distribución

La capacidad para mejorar la gestión hídrica en la agricultura se ve limitada principalmente por políticas erradas, desempeño institucional deficiente y restricciones financieras. Muchos encargados del agua se de los distintos niveles de organización gubernamental, usuarios del agua, organización de agricultores no tienen entornos y capacidades normativas para realizar sus funciones con eficacia. Esto lleva a tener muchos problemas donde los encargados de cuencas tienen una capacidad limitada para ejercer

Figura 7.- Organigrama de los distritos de riego en México



Fuente: tomado y modificado de CONAGUA (2013)

sus funciones y de convocar las partes interesadas. También los encargados de los distritos de riego piensan en sistemas de riego a gran escala a lo que refleja un gasto mayor y donde su único recurso es el sector público en lugar de financiarse de instituciones privadas. Otro problema es que las organizaciones de agricultores trabajan con marcos normativos que están desarticulados con las políticas de apoyo agrícola y fijación de precios agrícola (BancoMundial, 2023; Tiburcio y Perevochtchikova, 2020).

Muchos de los gobiernos y usuarios del agua, actualmente no invierten en el mantenimiento de los sistemas de riego y drenaje. La falta de mantenimiento obliga solo a reparar fallas, lo que llegan a loop llamado: “construir-descuidar-recuperar-descuidar”. Es por lo tanto necesario invertir en tecnología para tener mejores explotaciones agrícolas, donde el cuidado del suelo y agua sea una prioridad. Actualmente, existen muchas alternativas que ayudan al agricultor y al mantenimiento de los recursos con tecnología satelitales que aumentan la eficiencia y productividad del agua para uso agrícola (BancoMundial, 2023).

Gestión de cuencas hidrológicas

Trabajos realizados por la CONAGUA, INEGI y el INECC, se han clasificado 1,471 cuencas hidrográficas en México, las cuales se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas, en las cuales presentan características morfológicas, orográficas e hidrológicas muy similares y estas a su vez están agrupadas en 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) (Fig. 8). Estas RHA fueron publicadas en el DOF el 12 de diciembre del 2007, con el fin de facilitar la administración del agua, debido a la necesidad de

coordinación de acción gubernamental, tratando que los límites naturales se ajustaran a los límites municipales lo más cercano posible (INEGI, 2025b).

Dentro de las funciones que desempeñan las RHA es: 1.- Promover el uso eficiente del agua creando nuevas tecnologías para su uso más eficiente; 2.- realizar estudios de disponibilidad en los distintos niveles de cuenca para su mejor disponibilidad, así como generar nuevas alternativas para su uso; 3.- sancionar a personas físicas o morales que no cuenten con un permiso de explotación; 4.- aprobar cuotas de autosuficiencia, prevenir y atender emergencias derivadas de fenómenos hidrometeorológicos extremos; 5.- dirigir el Sistema Regional de Información Hidro climática y el banco de datos a tiempo real o histórico que sirva como base del Sistema Nacional de Información de cantidad, usos y conservación del agua superficial.

Figura 8.- Regiones Hidrológicas Administrativas de México

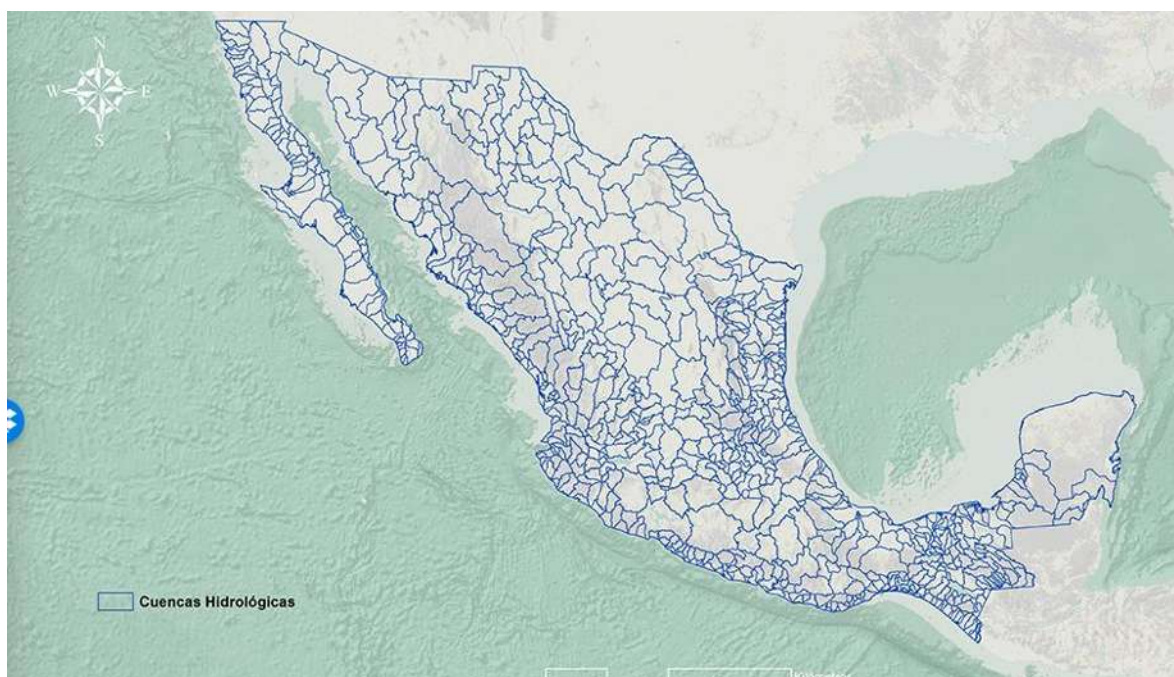


Mapa representa las 13 Cuencas Hidrológicas Administrativas divididas por CONAGUA en México. **Fuente:** mapa tomado de SEMARNAT (2015b)

Dentro de las RHA se encuentran a las Regiones Hidrológicas (RH) estas se dividen en 37 y están caracterizadas por su morfología, orografía e hidrología como una unidad para la gestión de los recursos. Normalmente estas regiones están integradas por una o varias cuencas, por lo que sus límites no obedecen límites políticos.

Para los propósitos de una mejor administración de las aguas nacionales superficiales CONAGUA definió 731 cuencas hidrológicas. Estas son cavidades que acumulan agua de lluvia desde las partes más altas y que en las partes bajas circula como una corriente principal donde llega a un punto de salida o un punto en común generando

Figura 9.- Cuencas Hidrológicas en México



Fuente: Cuencas hidrológicas tomado de SEMARNAT (2015a)

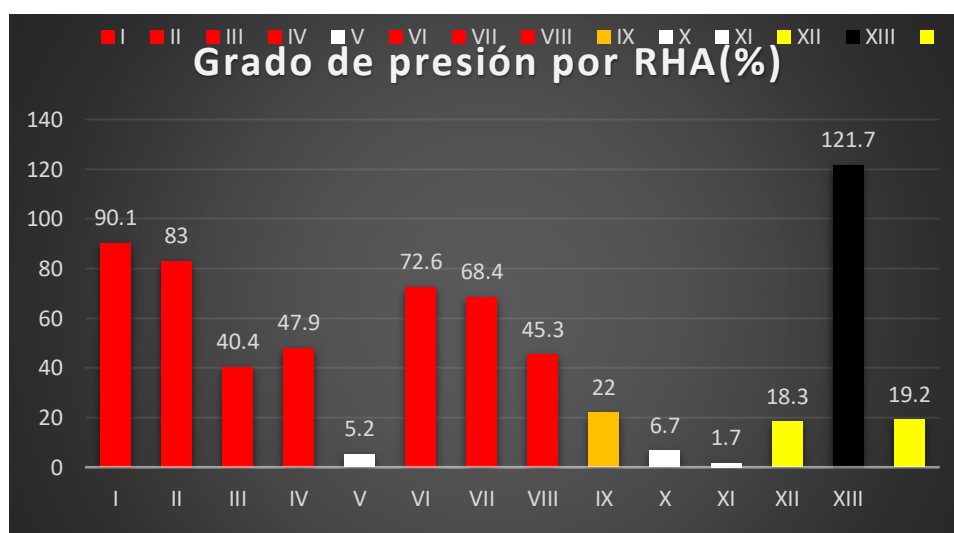
lagos, lagunas, estanques, etc. De las cuencas más grandes se conoce la de Yucatán y Sonora y la más chica es la Grijalba-Usumacinta (Fig. 9).

La denominación de acuífero fue publicada en el DOF el 5 de diciembre del 2001, donde en ellas fueron agregadas dentro de las 37 RHA. Por otro lado, las aguas subterráneas en el país están divididas en 653 acuíferos, de los cuales 157 se encuentran sobreexplotados (INEGI, 2024a). Un acuífero está sobreexplotado cuando el volumen de extracción se realiza en un ritmo mayor que el de su recarga natural. Se dice que en los últimos 5 años se ha perdido hasta cerca de 90,000 hectómetros cúbicos, generando efectos perjudiciales desde, agotamiento de manantiales, desaparición de lagos y humedales hasta pérdida nativa de flora y fauna y de distintos ecosistemas, etc. (CONAGUA, 2020a, 2024a). Existe una clasificación para las cuencas donde las exorreicas terminan en el mar, las endorreicas, no escurren hacia el mar y forman aguas superficiales y los arreicos donde se evaporan o infiltran y no llegan al mar formando grandes acuíferos.

Estrés hídrico en México

En México, la presión hídrica ha ido en aumento considerablemente, tomando en cuenta desde el 2010 de varias RHA (Fig. 10). Este incremento tiene una relación positiva con el crecimiento poblacional e incremento de los distintos sectores productivos, tanto industriales como agroalimentarios. En la figura 10, observamos que 7 de las 13 RHA presentan un alto valor en cuanto a la presión que se ejerce sobre este recurso y solo la cuenca del valle de México excede estos valores. El grado de presión es medido de acuerdo al porcentaje en cuanto a sus usos respecto a la disponibilidad, este considera que valores mayores de 40% son valores muy altos debido a la fuerte presión sobre el recurso (SINA, 2021).

Figura 10.- Grafica de porcentaje de presión por RHA



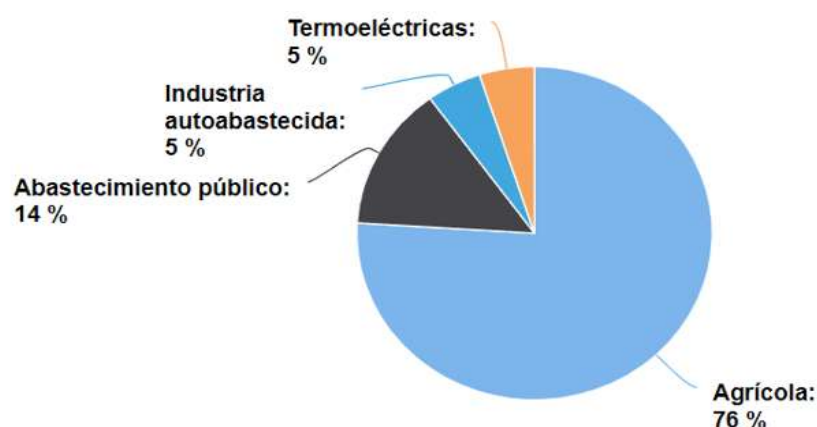
Nota. Las barras representan el grado de estrés hídrico que presenta varias regiones de los distintos continentes en el mundo comparados a nivel global en 2018. Se representa con colores el grado de presión donde el negro es muy alto, el rojo es alto, naranja es medio, bajo amarillo, sin estrés blanco. **Fuente:** Adaptado Grado de presión (regional), tomado de CONAGUA (2024e),

Estas cifras pueden ser en su mayoría causadas por el sector agrícola como se vio anteriormente, donde la agricultura de riego es el sector que mayor extracción de uso consuntivo hay a nivel mundial. En los últimos años, el uso consuntivo agrícola es un problema debido a la gran cantidad de agroquímicos, los cuales contaminan suelos y acuíferos principalmente, afectando la salud y los distintos ecosistemas. Aunque, en varias partes del mundo se cuantifica la extracción para riego, su cálculo es difícil debido a lo complejo que es su evaluación. Sin embargo, su estimación es necesaria para valorar el

agua efectiva que es extraída tanto superficial como subterránea (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2023).

Aunque existen otros sectores que utilizan el recurso hídrico como el sector industrial, la mayor parte es usada en la generación de energía, mientras que otra parte es usada en plantas petroleras, industrias metálicas, papeleras, madera, procesamiento de alimentos y manufacturera. En México, datos de INEGI (2025b) menciona que el 76% es usada por el riego agrícola (superando la demanda mundial), 14% es utilizada para el abastecimiento público y 5% en termoeléctricas y 5% en la industria (Fig. 11).

Figura 11.- *Uso del agua por los distintos sectores económicos*



Fuente: tomado de Usos del agua por INEGI (2024b)

Distribución del agua para la Agricultura

Los recursos hídricos no se distribuyen de manera equitativa en América Latina y esta tiene un suministro hídrico del 31% a nivel mundial, que en su mayoría son utilizadas para el sector agrícola, está en aumento de 86 millones a 175 millones de hectáreas desde el periodo de 1961 al 2014 (Bracho, 2021; Salazar et al., 2022). El sector agrícola ocupa el 70% del agua que puede estar disponible en las regiones y su gasto hídrico dependerá de la infraestructura y tecnología de cada país, del cual ronda entre el 60 y 70% del total disponible en América Latina (CONAGUA, 2018; IMCO, 2023; INEGI, 2025b; Salazar et al., 2022). La importancia del sector agrícola es muy conocido que tiene como objetivo satisfacer las necesidades actuales y futuras en cuanto a la alimentación de la población. Existe una relación positiva entre el incremento de la población y el incremento de la producción, pero una relación negativa con la disponibilidad de los recursos, ya que van

agotándose cada vez más porque los sobreexplotamos más de lo que su resiliencia puede regenerarlo naturalmente. Este aumento se puede deber a los programas para el desarrollo mal planificados que producen deterioros en el ambiente, y por lo tanto pérdida de muchos ecosistemas que afectan indirectamente varios sistemas, entre ellos los hídricos (Bracho, 2021; Costanza et al., 1999; Salazar et al., 2022; Sanchez et al., 2006). Por lo tanto, el exceso del uso del agua para el uso de riego da como resultado una disminución en la base productiva de las tierras de regadío y la disponibilidad del agua para otros usos. En consecuencia, para que las cadenas de producción sean permanentes se debe de establecer un límite ecológico, en el que pueda producir sin afectar los ecosistemas (Costanza et al., 1999; Gudynas, 2011; Pierri y Foladori, 2001; Sanchez et al., 2006). hay una gran preocupación del impacto que actualmente tiene el cambio climático sobre los recursos hídricos, ya que tendrán un impacto directo sobre la producción agrícola, que se deberá principalmente a la escasez y calidad la cual será cada vez peor. Por ende, se requiere mejorar las políticas públicas en cuanto a lo referido en la gestión pública, con el fin de mejorar la equidad de los sistemas de riego y sus suministros (Bracho, 2021; Costanza et al., 1999; Duque-Sarango et al., 2019; Fernández et al., 2007; Pierri y Foladori, 2001; Salazar et al., 2022).

Uso del Agua en la Agricultura en México

En México, el uso del agua en el sector agrícola representa el 76% y esta lo obtiene del 61% de las aguas superficiales y el resto de las aguas subterráneas (INEGI, 2025b). Sin embargo, el agua subterránea se alimenta de ríos, manantiales, lagos, arroyos, etc., y pueden ser extraídos de varias maneras, siendo más difícil y caras que las superficiales (CONAGUA, 2024d). Uno de los principales retos para proteger las aguas subterráneas es controlar su uso, ya que son propensos a contaminarse (por vertederos, tanques sépticos, tanques de gas, fertilizantes, pesticidas, etc.), sobreexplotarse (por el uso consultivo principalmente) (Pedraza-Pérez, 2018; Pérez-Villarreal, 2018). En México, existen 653 cuerpos de agua subterránea de los cuales 157 están sobre explotados principalmente por el 76% en uso agrícola, 14% abastecimiento público, 5% en la industria y 5% en otros (INEGI, 2024a, 2025b). Michoacán cuenta con 22 Acuíferos de gran importancia de los cuales su manejo, medición y distribución esta realizado por CONAGUA (2020a). Cuando existe un déficit hídrico algunos propietarios importan agua de regiones vecinas, cuando las

necesidades superan a la disponibilidad o puede ser por conveniencia (Sanchez et al., 2006).

En México la técnica tradicional más utilizada para riego agrícola es por inundación, siendo de las menos eficientes, debido a que solo cubre más del 90% de las zonas de riego, mientras otros países solo utilizan el 50%. Este tipo de técnica desperdicia el 25% del volumen de agua debido a la infiltración y evaporación, teniendo una eficiencia de 35 al 85% (Salazar et al., 2022; SIAP, 2018). Para esto, la FAO (2014), menciona que existen tres tipos de producción categorizándolos debido a su nivel de insumos, que los sobrepasa con el impacto que tiene y la gestión de la zona y estos son bajo medio y alto. Por su parte, el SIAP (2018) y SADER (2017b) hace una clara definición entre los tipos de cultivo tradicional y protegida, la cual hace la principal diferencia en el tipo de tecnología empleada de donde esta obtiene sus principales productos. En las técnicas tradicionales existe una diversificación de vegetación con recuperación de inversión a corto plazo, al carecer de tecnologías su costo de producción es más bajo, siendo contrariamente a las tecnologías protegidas o también llamadas intensivas. El tipo de tecnificación agrícola está ligado directamente con la capacidad económica que se posee para proteger su producto y disminuir algunos costos de insumos como el gasto hídrico. Por otro lado, existe las técnicas tradicionales las cuales están más expuestas al ambiente, patógenos, otros elementos del sistema de producción y a la luz directa la cual hace evaporar más rápidamente el agua de riego, perdiéndose una enorme cantidad al ser expuesta directamente (Pratt, 2019).

En el 2015, se reportó para México, 23,251 hectáreas de agricultura protegida, del cual el 80% es producto de exportación, principalmente Estados Unidos. Los productos principales de la Agricultura protegida son: tomate rojo, chile, Berenjena, en donde seis estados concentran 71% de la superficie sembrada mediante esta actividad (SADER, 2017b). algunas empresas y el Gobierno de México han promovido este tipo de agricultura ya que aumenta la producción de productos agrícolas de exportación con un alto valor adquisitivo, además de generar más y mejores empleos. Esto ha ayudado a dar seguimiento al Programa Especial de Cambio Climático, donde se pretende tecnificar a las zonas de producción agropecuarias para ser más sostenibles para reducir sus emisiones, mediante la tecnificación agrícola del riego, para aumentar la seguridad alimentaria y así garantizar la disponibilidad del agua destinada a la agricultura (Pratt, 2019).

Por lo tanto, se tiene que cuantificar el gasto hídrico para que su distribución sea más equitativa, la cual es realizada por el Departamento de Hidráulica en la red pública de

riego. Existen distintas formas de medir el aforo, que es el procedimiento por el cual mide un caudal de riego (cantidad de agua por tiempo) en un lugar. De los cuales los más comunes son Aforo con flotador, compuerta y con perforaciones, teniendo un cálculo diferente entre cada uno de ellos, midiendo la cantidad de volumen por unidad de tiempo que pasa por el lugar (Carrión, 2015). También están las mediciones realizadas mediante la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, este trata de la conservación del recurso hídrico que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales (DOF, 2015), entre otras técnicas. Tener el conocimiento del volumen de agua extraída, permitirá no sobreexplotar los acuíferos por parte de los distritos de riego, garantizando así la seguridad hídrica en los productos alimentarios.

Las técnicas agrícolas como son protegida y tradicional, proporcionan cierto grado de beneficios y efectos sobre la ecología y ambiente de un lugar donde estas se encuentren situadas. La agricultura protegida puede reducir la erosión del suelo lo que ayuda al mantenimiento de caminos, embalses y centrales hidroeléctricas, etc., retiene mayor humedad por lo que su consumo hídrico será menor, ocupan menos cantidad de agua lo que hace que no requieran grandes volúmenes de agua, puede reciclar el agua a través de varias técnicas, se maximiza su producción reduciendo el área de cultivo obteniendo mayor peso y volumen del producto deseado, se puede optimizar la cantidad de agua, temperatura y nutrientes con la agricultura 4.0 por medio de dispositivos inteligentes y estas se realizan en áreas protegidas o hasta cerradas, entre muchos otros beneficios (Fernández, 2020). Esto ayuda enormemente a la conservación de muchas especies de los alrededores como polinizadores, fauna nativa y flora, además de impactar menos el ambiente y cumplen con unas metas del ODS número 6 que es agua limpia y saneamiento (ONU, 2025).

Sin embargo, pasa lo contrario en la agricultura convencional donde esta llega a modificar el paisaje afectando enormemente la flora y la fauna nativa, convirtiéndose en un enemigo para la región en muchas ocasiones, disminuyendo su población o extinguiéndose del lugar. El uso de pesticidas ha hecho que exista menos cantidad de polinizadores, los cuales afectan la variedad de especies que depende directamente de ellos. La disposición de un solo cultivo en un área considerablemente grande, ha favorecido a la pérdida de variabilidad genética, existiendo en si una sola variedad de especie donde debería existir mayor cantidad de especies florales. Esta técnica depende mucho de factores ambientales

como de la estacionalidad, cambios de temperatura, vientos, tormentas, granizo, etc. (BancoMundial, 2023; Salazar et al., 2022).

Como se ha visto, los beneficios ambientales son mayores en áreas donde existe la tecnología agrícola que en la tradicional o de cielo abierto. Sin embargo, en México han promovido la agricultura protegida ya que se obtiene una productividad más elevada, una mayor eficiencia en los insumos que se requieren para el producto, pueden cultivar en las diferentes estaciones del año, controlan las condiciones sanitarias e inocuidad de sus productos, reducción de vulnerabilidad ambiental o meteorológica, capacidad de responder a los requisitos de los consumidores nacionales e internacionales (Pratt, 2019). Además, el consumo de agua es menor en estas tecnologías debido a que están mejor controladas y su pérdida por evaporación es menor debido a que la incidencia solar no es tan grande como la de cielo abierto.

Estos son algunos factores que ayudan a mantener un producto final de calidad y de mayor cantidad con un recurso hídrico menor. Aunque en un principio su costo es elevado, este se recupera en un par de años donde aumentan sus rendimientos de producto. Sin embargo, la rentabilidad de los productos dependerá del sitio, debido a los diferentes climas existentes que la agricultura protegida podría necesitar mayor gasto energético en un clima frío (AMHPAC, 2022). Pero es muy poca la diferencia de costos que se tiene entre los distintos sitios donde existe esta tecnología agrícola. García-Sánchez et al. (2018), realiza un estudio comparativo entre tres estados donde se encuentra la agricultura protegida. En ella, llega a la conclusión de que es rentable en comparación con los sistemas agrícolas tradicionales y los rendimientos del producto final son homogéneos. Las diferentes técnicas deben ser usadas dependiendo del lugar y el clima para favorecer al cultivo y la demanda del mercado. El costo-beneficio de la producción es mayor en la tecnología protegida en comparación con la tradicional. Se menciona que las condiciones de mercado deberían mejorar para este tipo de agricultura debido a que se requiere para el mantenimiento para sostener las necesidades y expectativas de los agricultores, de lo contrario tendrán que realizar a las actividades complementarias o abandonar esta actividad (García-Sánchez et al., 2018).

ANTECEDENTES

Sustentabilidad en la actualidad

El hombre siempre ha utilizado la naturaleza para cubrir sus necesidades y a medida que la población incrementa la presión sobre la naturaleza también, generando un desequilibrio ecológico y una degradación ambiental. Dicho fenómeno se evidencio mediante modelos computacionales, en los cuales la expansión geométrica dentro de un ámbito limitado puede provocar el derrumbe y la degradación de múltiples sistemas. En 1971, el Club de Roma que fue creado para abordar las crisis que tiene la humanidad y el planeta, liderado por científicos, economistas, políticos, líderes empresariales, encargaron un informe al Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), sobre estas simulaciones. Este fue publicado en 1972 titulado los límites de crecimiento creado por Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers y Williams, W. Behrens III (Common y Stagl, 2008; Meadows et al., 1972).

En 2009, se amplió esta perspectiva donde se identifican 9 procesos que le dan estabilidad al planeta conocidos como límites planetarios y estos son: la destrucción de la capa de ozono, cambio climático, destrucción de la biosfera, contaminación química, la acidificación de los océanos, ciclos del fósforo y el nitrógeno, consumo de agua dulce, cambios en el uso de suelo y aerosoles atmosféricos. Estos definen los límites donde las actividades humanas permitan la resiliencia de los sistemas ecológicos sin causar daños ecológicos y garantizar la estabilidad del planeta, de los cuales 5 ya han sido superados (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015)

En 1987, se publicó el informe Brundtland titulado “Nuestro Futuro Común” el cual introdujo el concepto de “desarrollo sustentable” tratando de darle comprensión a la dualidad de la relación entre el desarrollo humano y los límites ambientales. En el informe se destacaba el crear una nueva clase de crecimiento económico, donde el impacto al medio ambiente fuera menor y contribuyera a su regeneración sin amenazar las economías, existiendo equidad social satisfaciendo las necesidades humanas, ya que siguiendo el modelo antropocentrista colapsaría los sistemas ecológicos y por lo tanto los recursos que sostienen la vida (Common y Stagl, 2008; Costanza et al., 1999; ONU, 1987).

Estas investigaciones de transformación han tomado mayor relevancia en las ciencias de la sostenibilidad. Tal como lo menciona Leventon et al. (2021), donde realiza una recopilación documental y realiza nueve preguntas cuestionando la ciencia y la práctica de la sostenibilidad. Algunas de sus conclusiones son que su medición debería de ser a

una escala menor debido a que a mayor escala es el conjunto de intervenciones de cada uno. Adicionalmente, demanda un ejercicio de pensamiento crítico que ha de ser multidisciplinario, tomando en cuenta los vínculos existentes entre los diferentes componentes, para la creación de algo nuevo. Por último, el autor menciona la importancia de los marcos normativos que rigen al sistema.

Arora (2018), hace mención que el aumento de la temperatura global es debido a que distintas actividades están causando todo lo contrario a lo que llamaríamos bienestar, existiendo hambrunas, déficit hídrico, contaminación del aire, problemas de salud, debido a la degradación de la tierra y al no dejar ser resiliente a la naturaleza. Aunque, existen actualmente tecnologías que se utilizan aún no se logra la sostenibilidad de los recursos. Esto se debe de hacer de manera conjunta con académicos, gobiernos y organizaciones que estén involucrados en buscar una solución.

Es importante señalar que las implicaciones de la no sustentabilidad son múltiples y muy diversas, incluso se considera que el aumento de temperatura se cree que fue el detonante del COVID-19 que causo una pandemia a nivel mundial. Además, Jia y Duić (2021) menciona que la pandemia a afectado el comportamiento de las personas en distintos niveles las cuales están correlacionados con la demanda de energía y agua, el sistema de movilidad, así como el medio ambiente en las ciudades, que han podido afectar los distintos círculos de la sostenibilidad después de la pandemia. Es por esto, que muchos países del mundo ante tal preocupación han tratado de generar más tecnologías limpias y cambiar las políticas ambientales.

Para Arora y Mishra (2020), la pandemia tiene relación con la sustentabilidad debido a que estamos terminando con los recursos, los cuales genera calentamiento global aumentando la temperatura incrementando los vectores que causan enfermedades, en hábitat nuevos debido al cambio de uso de suelo. Estos han creado enfermedades nuevas que han incrementado debido al calentamiento global y se prevé que el número de nuevas enfermedades aumente debido a esta correlación. También hace una crítica a realizar medidas más severas en cuanto a la Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), para proteger los distintos hábitats y al comercio de vida silvestre. Durante el aislamiento, se comprobó que la reducción de contaminantes atmosféricos ocurrió porque únicamente adquiríamos lo indispensable y realizábamos deslizamientos esporádicos, lo cual evidencio que vivamos inmersos en un esquema de consumo excesivo perjudicial para la naturaleza.

Lo expuesto encuentra una postura opuesta en Bahn et al. (2019), quienes han estimado la huella hídrica azul, el gasto energético y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a carnes rojas, vegetales, semillas y frutas. De ello se desprende que, al intentar orientar la producción de alimento elegido hacia criterios sostenibles, la modificación del uso del suelo desencadena una serie de consecuencias que obstaculizan el logro de dicha sustentabilidad. Un ejemplo de lo anterior, es que si bien es cierto que el dejar de consumir carne generaría ahorros en las cuatro huellas (agua total (azul, verde y gris), agua azul, uso de energía y GEIE). También, se observa que esta disminución produciría un aumento en las frutas, semillas y frutos para abastecer sus necesidades nutricionales.

Usos actuales de los modelos para el cálculo del volumen de agua en riego agrícola

Villani et al. (2018) llevan a cabo una valoración de un modelo hídrico y de crecimiento vegetal a través de una herramienta digital que facilita el seguimiento de sistemas agrícolas y de varios tipos de riego, con la finalidad de conocer los requerimientos hídricos óptimos de los cultivos. Con ello, planifican y distribuyen el volumen de agua necesario para cada planta. Con el programa CRITERIA calcula el riego real junto con una comparación del estrés hídrico de los cultivos; como el programa solo da la cantidad de agua necesaria por cultivo ya que cada uno de ellos tiene un requerimiento variado. Esto hace que no exista perdidas con lo cual se puede llegar a tener mayor producción optimizando el recurso hídrico.

Por otro lado, Olivera-Guerra et al. (2020) mediante sensores remotos implementan riegos para una mejor gestión del recurso hídrico. Lo implementa mediante cuatro pasos donde divide la temperatura, estiman la humedad del suelo por medio del cálculo de evapotranspiración, ponderan el riego en la imagen satelital y agregan estimaciones de riego de cada pixel. Esto lo realizan mediante las diferentes técnicas de riego (goteo, inundación y temporal); con el objetivo de determinar el caudal aprovechable mediante una administración mas eficiente que evite el derroche excesivo, la única diferencia radicara en los distintos métodos de irrigación empleados.

Zubelzu et al. (2020), presentan un método para determinar los sistemas de drenaje urbano sostenible en una ciudad. Se propone un análisis hídrico volumétrico que modela los pasos hidrológicos dentro de las cuencas urbanas mediante un enfoque multicriterio

para conocer los costos-beneficios de recargas de acuíferos y los tributarios para conocer la combinación óptima.

Yu y Cui (2022) señalan las limitaciones de un modelo destinado a la estimación del recurso hídrico, el cual recrea desarrollo del cultivo de arroz bajo distintas pautas de irrigación con el propósito de perfeccionar su rendimiento. Mejoraron el modelo añadiendo más variables informativas para que los modelos del balance hídrico sean más precisos y llegar a planear zonas que con una cantidad limitada de agua y otro tipo de cultivos podrían aprovecharse en una región sin propiciar un déficit hídrico por riego.

Uso del CROPWAT

El uso del modelo de CROPWAT es un programa para el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo, a partir de información climática, cultivos y suelos, ha sido tan efectivo que lo han implementado ampliamente en todo el mundo para resolver distintos problemas como la determinación de la evapotranspiración de cultivos, la administración del recurso hídrico, modelo de sistemas de cultivo, hidrología y programación de riego (FAO, 2024).

Reddy et al. (2020) calcularon los datos ETo a partir de datos meteorológicos mensuales de los años 2013 y 2014. Concluyeron que el modelo era efectivo al comparar cada parámetro con los resultados obtenidos llegando a la conclusión del uso del modelo como un método estándar de validez global como referencia estandarizada para la evapotranspiración de referencia.

Yetik y Sen (2022) realizaron un estudio sobre el crecimiento del maíz con referencia en los años 1961-1990 y bajo condiciones de cambio climático del 2070-2099 (Modelo Climático Regional del CIFT v.3 (RegCM3) en referencia a las necesidades del agua en el mediterráneo. Los resultados muestran que en un futuro bajo el modelo de cambio climático requerirán 7.37% más agua que la evapotranspiración aumentará de 480.1 a 513.4 mm.

El-Shafei y Mattar (2022) evaluaron los modelos del CROPWAT en conjunto con SaltMed para conocer que era más eficiente si el sistema de riego por goteo o el de superficie en cultivos de trigo durante 2 años. Se evidenció que el método de riego por inundación requería un alto volumen hídrico, mientras que los niveles de producción obtenidos resultaron prácticamente idénticos. Los modelos con el SaltMed simulaban eficientemente el contenido de agua del suelo y el rendimiento, con alta precisión según

métricas estadísticas. Ambos modelos demostraron su utilidad en la gestión hídrica agrícola.

Muratoglu et al. (2023) estudiaron modelos de estimación de lluvia efectiva (Peff) en un campo experimental de maíz en Turquía. Usando el CROPWAT y otros modelos para comparar su efectividad y calcularon los parámetros de huella hídrica verde y azul y compararon con el resultado del balance hídrico del suelo. Se demostró que el CROPWAT tuvo mayor precisión, con error menor en Peff del 5% y menor al 1% en la huella hídrica azul, demostrando que fue más efectivo que otros modelos.

Kulariya et al. (2024) querían ver el uso sostenible del agua, estimando las necesidades hídricas del cultivo de mostaza y la variabilidad climática de las zonas agroclimáticas de Uttar Pradesh, en la india, en el período de 1992-2022. Su estudio demostró que existió una temperatura media de 32,13 °C, mínima de 18,96 °C y precipitación de 638,45 mm. Mayo tuvo las temperaturas más altas y enero las más bajas. La lluvia fue máxima en julio y agosto, y mínima en noviembre y diciembre, revelando variabilidad estacional significativa.

JUSTIFICACIÓN

En la cuenca de Cuitzeo, la administración del agua enfrenta una dificultad creciente, resultado de la conjunción entre los criterios burocráticos para distribuir el líquido, los patrones meteorológicos locales y los procesos productivos propios de la región. En este contexto, resulta fundamental analizar la correspondencia entre los volúmenes concesionados registrados en el REPDA y el gasto hídrico efectivo a escala municipal y por tipo de uso, con el fin de generar un diagnóstico cuantitativo que permita identificar patrones de presión hídrica y apoyar una Gestión Integral del Recurso Hídrico basada en evidencia. El uso de bases de datos oficiales como REPDA, SIAP e INEGI garantiza la trazabilidad, reproducibilidad y pertinencia de los resultados para el año 2023.

Sin embargo, el análisis de los recursos hídricos y el desempeño agrícola se ve restringido por la existencia de los registros meteorológicos parciales en las estaciones de monitoreo atmosférico dependientes de la CONAGUA. Ante ello, el uso complementario de bases de datos satelitales como NASA POWER, mediante metodologías de corrección porcentual y regresión lineal, representa una alternativa técnicamente viable y replicable para estimar variables climáticas faltantes, fortaleciendo la precisión de los balances hídricos y los análisis de productividad agrícola en regiones con cobertura limitada de observaciones in situ.

Asimismo, la cuantificación de las huellas hídricas verde y azul y de la eficiencia en el uso del agua de los principales cultivos mediante herramientas de acceso libre como CROPWAT 8.0, Sistemas de Información Geográfica y teledetección, permite integrar clima, manejo hídrico y producción agrícola en un marco metodológico espacialmente explícito. Este enfoque contribuye a llenar un vacío de información específico para la cuenca de Cuitzeo y genera insumos técnicos útiles para organismos gestores del agua, instituciones del sector agrícola y productores, orientando decisiones que busquen conciliar seguridad alimentaria, desarrollo rural y sostenibilidad ambiental, en un contexto de variabilidad climática y creciente demanda del recurso.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

General

¿En qué medida la agricultura, identificada a partir del análisis de las concesiones de agua otorgadas en 2023 en la Cuenca de Cuitzeo, contribuyó a la presión sobre el recurso hídrico y al déficit hídrico observado, y cómo mediante la estimación de variables climáticas y su aplicación en CROPWAT, se cuantifican las huellas hídricas verde y azul y su eficiencia productiva en los principales cultivos agrícolas?

Específicos

1. ¿El elevado volumen y concentración espacial de las concesiones en algunas localidades donde se acumulan mayormente otorgadas en 2023 en la cuenca de Cuitzeo, han inducido un déficit hídrico al exceder la extracción efectiva sin tomar en cuenta la recarga del acuífero, siendo esta severidad máxima en los municipios con agricultura intensiva?
2. ¿Es posible estimar los datos climáticos faltantes del año 2023 en las estaciones climáticas de CONAGUA, utilizando las diferencias porcentuales o por regresión lineal observadas en el 2017 entre los registros de NASA POWER y las estaciones meteorológicas de CONAGUA?
3. ¿Cuál es la magnitud, el consumo hídrico de las Huellas hídricas azul y verde y la eficiencia productiva de la huella hídrica de los cultivos del maíz, sorgo, frijol y aguacate en la Cuenca de Cuitzeo durante el año del 2023 y como se distribuye espacialmente la presión sobre los recursos hídricos?

HIPÓTESIS GENERAL

General

La agricultura es el principal factor de presión hídrica en la cuenca de Cuitzeo durante 2023, ya que la concentración y volumen de concesiones de agua favorecieron extracciones superiores a la recarga natural del acuífero, generando déficit hídrico; este impacto puede evaluarse mediante la estimación confiable de variables climáticas y el análisis de las huellas hídricas verde y azul de cultivos extensivos y de alto valor económico.

Específicos

1. El elevado volumen y concentración espacial de las concesiones de agua otorgadas en 2023 en la cuenca de Cuitzeo han inducido a un déficit hídrico. Este desbalance resulta de una extracción efectiva que, al amparo de derechos concesionados resulta superior a la disponibilidad natural, excede la recarga del acuífero. La severidad del déficit se incrementa en los municipios con predominio de agricultura intensiva, dada su alta demanda hídrica.
2. La diferencia porcentual registrada entre los datos climáticos de NASA POWER y las estaciones meteorológicas de CONAGUA se mantienen relativamente constantes en el tiempo, por lo que puede utilizarse para ajustar los valores de NASA POWER en la temporalidad del 2020 y 2023, o podrían ser completadas por medio de regresión lineal y estimar de manera confiable los datos faltantes de CONAGUA en ese año.
3. Los cultivos de mayor importancia económica como el aguacate y aquellos extensivos y por lo tanto demandantes de grandes cantidades de agua como el maíz, presentaran huellas hídricas azules mayores debido a la intensificación del riego y su concentración territorial, lo cual pueden mostrar un alto consumo hídrico al ser comparado con las concesiones del REPDA.

OBJETIVO GENERALES

General

Analizar el uso del agua en la cuenca de Cuitzeo durante 2023 mediante la relación entre la concentración de concesiones y el gasto hídrico por municipio, la estimación de variables climáticas con datos de NASA POWER y CONAGUA, y la evaluación de las huellas hídricas verde y azul y la eficiencia del uso del agua en los principales cultivos, para identificar patrones de presión hídrica y apoyar una gestión sustentable del recurso.

Específicos

1. Cuantificar la relación entre el volumen y la concentración de títulos de concesión inscritos en el REPDA en el 2023 con respecto al gasto hídrico efectivo por municipio en la cuenca de Cuitzeo, desagregando por uso del agua y por actividad económica, con el fin de determinar si las concesiones explican variaciones significativas en el uso real del recurso hídrico.
2. Evidenciar que los datos climáticos faltantes del año 2020 y 2023 en estaciones de CONAGUA se pueden obtener y complementar mediante la corrección de los valores de NASA POWER, utilizando como base la diferencia porcentual y regresión lineal observada en el año 2017.
3. Analizar comparativamente las huellas hídricas (Verde y Azul) y la eficiencia en el uso del agua de los cultivos de maíz, sorgo, frijol y aguacate en la Cuenca de Cuitzeo para el año 2023, con el fin de identificar los puntos de mayor presión hídrica para proponer estrategias para una mejor gestión sustentable.

ÁREA DE ESTUDIO

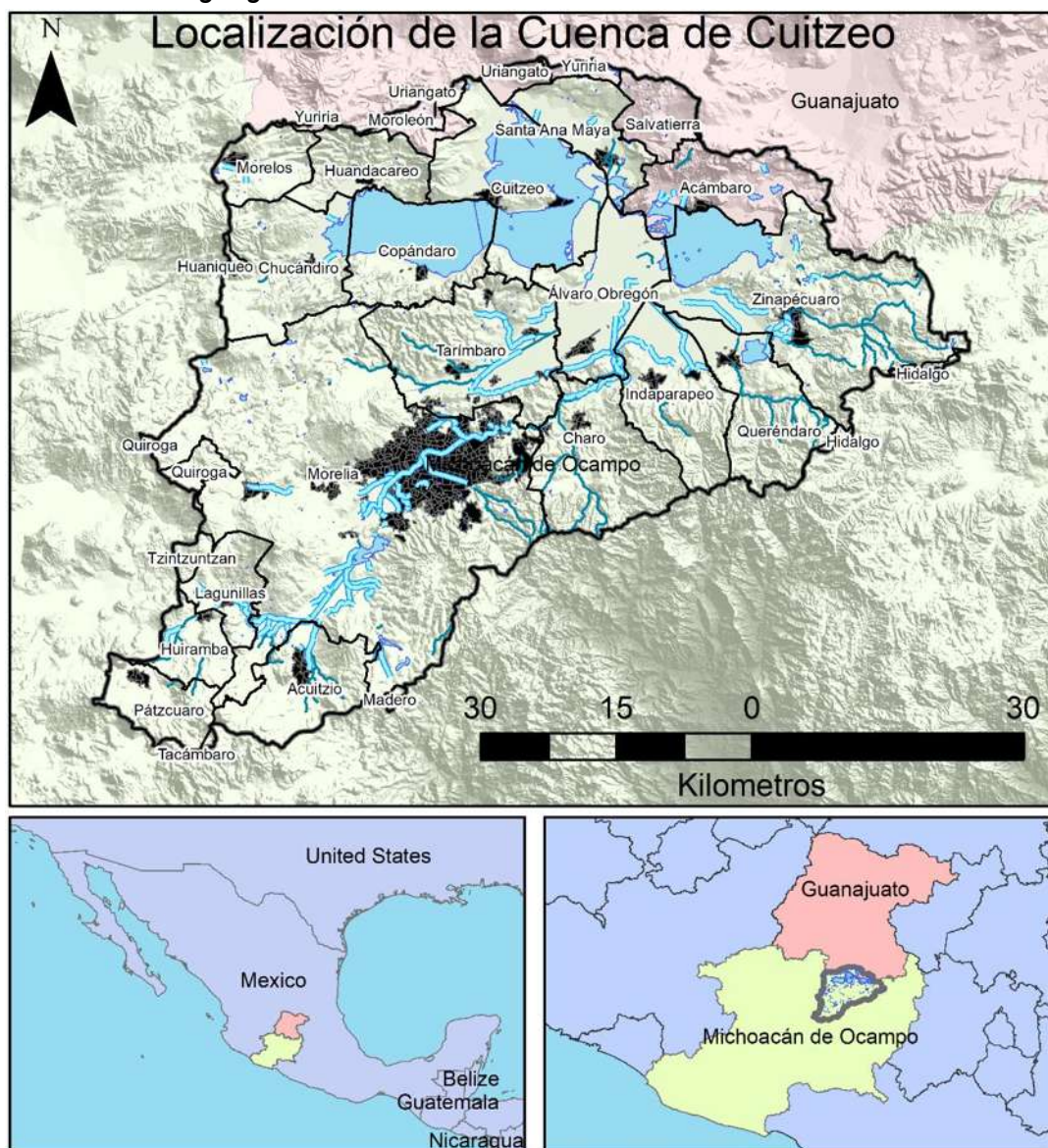
Localización geográfica del área de estudio

El área de estudio es la Cuenca de Cuitzeo, ubicado en la región centro-occidente de México, presente en el norte de Michoacán y una parte pequeña al sur de Guanajuato. Esta cuenca es endorreica (cerrada) dentro del sistema volcánico transversal. Presenta 27 municipios de los cuales 22 de Michoacán (756 localidades) estando presenta el municipio de Morelia siendo la capital del estado y 5 municipios de Guanajuato (43 localidades) (IPLAEM, 2019; Pimienta-Ramírez, 2024). Geográficamente está ubicado entre los 19°30' y 20°05' latitud norte y 100°35' y 101°30' longitud oeste (Amador et al., 2011; Pimienta-Ramírez, 2024) y esta presenta una área de 4023.61 km² según la plataforma geoespacial del INEGI llamado SIATL (2026).

La Cuenca de Cuitzeo se encuentra ubicada dentro de la Region Hidrográfica Administrativa (RHA) número doce llamada Lerma-Santiago, dentro de la Cuenca RH12G en la Subcuenca RH12Gb (IPLAEM, 2019). La Cuenca está conformada principalmente por colinas, lomeríos, altos y planicies desarrollada en su mayoría por materiales volcánicos. Los tipos de vegetación presentes dentro de la cuenca son varios que van desde bosques templados, matorrales, selva baja caducifolia y vegetación acuática y subacuática. Asimismo, habita una fauna de gran relevancia en la zona, compuesta por reptiles, anfibios, aves y mamíferos, que en numerosas ocasiones resultan ser especies exclusivas de esa localidad (Mendoza et al., 2002).

Dentro de la Cuenca presenta un lago natural, siendo la segunda más grande del país, recibiendo agua de tres ríos principales como el Río Grande, Queréndaro y Zinapécuaro. También recibe aportaciones de varios arroyos de temporal y cuerpos termales localizados en mayor medida en la parte baja de la cuenca (Fig. 12). Las zonas donde presenta mayor infiltración y recarga son localizados principalmente en Capula, Cuto de la Esperanza, Irapeo y Mil Cumbres (Pimienta-Ramírez et al., 2025). Estas recargas e infiltraciones han sufrido un impacto muy fuerte debido a diversas actividades principalmente de origen antrópico como es la urbanización, la contaminación debido a la industria, la agricultura y efectos del clima regional y global que hacen que sea más difícil su obtención (López, 2006; Pimienta-Ramírez, 2024; Pimienta-Ramírez et al., 2025).

Figura 12.- Ubicación geográfica de la Cuenca de Cuitzeo



Leyenda



Cuenca de Cuitzeo (RH12G_SIATL)

Estados

Red Hidrológica

Condición

— EN OPERACION

— PERENNE

— Cuerpos de Agua

Guanajuato

Michoacán de Ocampo

Municipios de la Cuenca de Cuitzeo

Area Urbana

Fuente: elaboración propia realizado a partir de datos de SIATL (2026) e INEGI (2026).

Clima

La Cuenca de Cuitzeo presenta en su alrededor con 46 estaciones climatológicas que son operativas. Sin embargo, en estas estaciones existe en muchas de ellas una deficiente cantidad de datos meteorológicos o errores que van desde datos incompletos, falta de datos por años, error de digitalización, tomas de datos incompletos o la nula toma de datos. Sin embargo, aun ante esta falta de datos el INEGI en 1980 categorizó el clima en México con una versión modificada del sistema de Köppen (1936) y la adapto con la de Enriqueta García (1964), tomando en cuenta la temperatura de una región, la precipitación y la vegetación del lugar en México (INEGI, 2020a).

La clasificación se expresa mediante un sistema de símbolos. La primera letra mayúscula define el tipo general de clima (por ejemplo, A: cálido, B: seco, C: templado). Posteriormente, se incorporan letras minúsculas que indican el régimen de lluvias, como precipitaciones en verano (w), en invierno (s) o durante todo el año (f). Finalmente, se añaden subíndices que detallan el grado de humedad, aridez y condiciones térmicas (García, 1964).

Para interpretar esta clasificación, es necesario leerla de izquierda a derecha: primero se identifica el grupo climático, luego el patrón de lluvias y, por último, las características específicas de humedad y temperatura. en esta perspectiva posibilita una comprensión global del comportamiento climático, lo cual favorece su vinculación con fenómenos hidrológicos y actividades agrícolas, especialmente en investigaciones centradas en la oferta y el aprovechamiento del recurso hídrico (García, 1964; INEGI, 2020a).

Dentro de la cuenca se definen bien dos climas como son el (A)C(w0), caracterizado por ser el más cálido dentro de los semicálidos y, al mismo tiempo, el más seco entre los templados subhúmedos con lluvias en verano; este se localiza principalmente en las áreas de menor altitud, hacia la porción centro-norte de la cuenca. Conforme se avanza hacia el sur, se observa una transición climática hacia condiciones correspondientes al tipo C(w1), lo que refleja una variación espacial asociada a factores topográficos y altitudinales (Vidal, 2010). También, Vidal (2010) destaca dos estaciones bien definidos como son el seco (noviembre a abril) y el lluvioso (mayo a octubre) (Fig. 13).

Figura 13 .- Distribución de los tipos de climas en la Cuenca de Cuitzeo

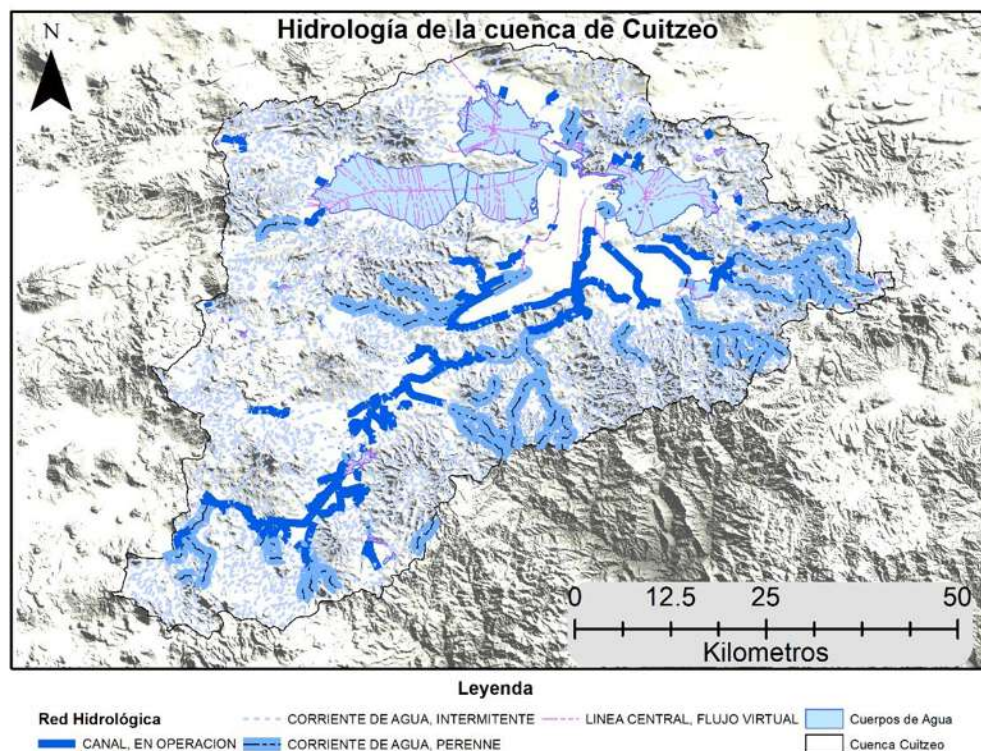


Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2020a).

Hidrología

Los principales escurrimientos que presenta la Cuenca de Cuitzeo son las corrientes intermitentes que se encuentran por toda la cuenca y abarca más de 5,080.78 km de longitud. En segundo lugar, tenemos la línea central del flujo virtual ubicada donde se encuentra el Lago de Cuitzeo principalmente teniendo una longitud de 490.21 km. En tercer lugar, tenemos la corriente de agua perenne encontrándose en Huiramba, Acuitzio, Morelia, Charo, Tarímbaro, Chucándiro, Indaparapeo, Queréndaro, Zinapécuaro Acámbaro y Santa Ana Maya con una longitud de 326.52 km (Fig. 14). Por último, tenemos el canal en operación encontrándose en los municipios similares al de la corriente perenne ocupando una longitud de 299.02 km. En total de escurrimiento que transita por la cuenca es de 6,196.53 km de longitud a lo largo de toda la cuenca según datos del SIATL (2026).

Figura 14.- Distribución de los tipos de escurrimientos de la Cuenca de Cuitzeo



Fuente: elaboración propia a partir de datos del SIATL (2026).

Edafología

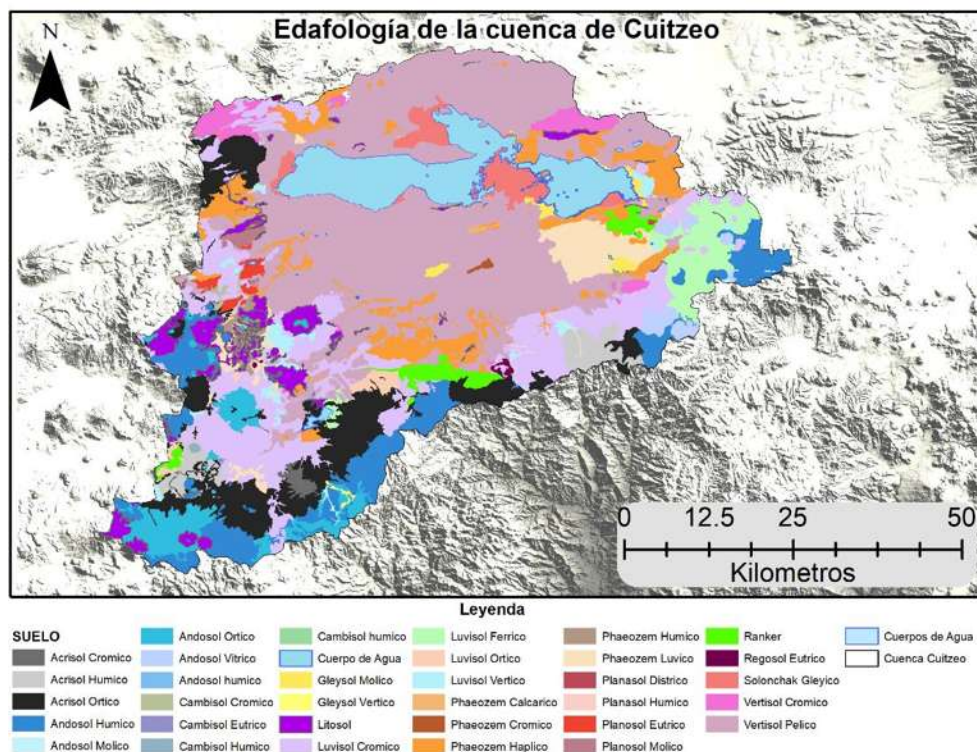
Existen 32 tipos de suelos en la Cuenca de Cuitzeo donde el Vertisol Pelico y Luvisol Crómico representan el 44.96% de todos los suelos. Los Vertisoles Pelico se encuentran en las partes bajas de la cuenca casi rodeando en su totalidad al Lago de Cuitzeo (Fig. 15). Los Luvisoles Crómicos los podemos encontrar en su mayoría en la parte este de la cuenca sobre las laderas y partes altas. Por otro lado, tenemos suelos como es el Acrisol Ortico con un porcentaje de 8.23% Andosol Húmico (6.64%), Phaeozem Háplico (6.64%), Litosol (3.82%), Andosol Ortico (3.32%), Phaeozem Luvico (2.87%), Luvisol Férrico (2.86%), Solonchak Gleyico (2.15%), Vertisol Crómico (1.79%), Acrisol Húmico (1.77%), Ranker (1.44%) y Luvisol Vertico (1.16%) (INEGI, 2025a). Los demás suelos presentan un porcentaje menor a 1 llegando a ser de 0.02% en el caso del Planasol Distríco dando un total de 4,025.01 km² (Tabla 2).

Tabla 2.- Tipos de suelo que se encuentran en la Cuenca de Cuitzeo

No.	Suelo	Area KM ²	No.	Suelo	Area KM ²	No.	Suelo	Area KM ²
1	Vertisol Pelico	1,302.73	12	Vertisol Cromico	72.18	23	Cambisol Cromico	5.63
2	Luvisol Cromico	506.85	13	Acrisol Humico	71.10	24	Regosol Eutrico	5.49
3	Acrisol Ortico	331.31	14	Ranker	58.12	25	Phaeozem Cromico	2.95
4	Cuerpo de Agua	318.87	15	Luvisol Vertico	46.64	26	Gleysol Vertico	2.60
5	Andosol Humico	275.31	16	Andosol Vitrico	36.28	27	Phaeozem Calcarico	2.52
6	Phaeozem Hapico	267.23	17	Luvisol Ortico	23.54	28	Cambisol humico	2.01
7	Litosol	153.87	18	Gleysol Molico	22.40	29	Cambisol Eutrico	1.46
8	Andosol Ortico	133.60	19	Planosol Eutrico	19.58	30	Planasol Humico	1.31
9	Phaeozem Luvico	115.51	20	Phaeozem Humico	17.61	31	Andosol Molico	0.72
10	Luvisol Ferrico	115.01	21	Acrisol Cromico	13.95	32	Planasol Distrito	0.68
11	Solonchak Gleyico	86.41	22	Planosol Molico	11.54		Total general	4,025.01

Fuentes: elaboración propia a partir de datos del INEGI (2025a)

Figura 15.- Distribución de los tipos de suelos en la Cuenca de Cuitzeo



Fuente: elaboración propia a partir de datos del INEGI (2025a)

Uso de suelo y vegetación

La Cuenca de Cuitzeo se aprecia una gran predominancia de actividades de origen antrópico, particularmente del sector agrícola teniendo una superficie de 1,653.10 km² equivalente a 34.56%, evidenciando una fuerte vocación productiva y una relación con el aprovechamiento del recurso hídrico. En segundo término, tenemos la cobertura de la vegetación secundaria (18.68%) y pastizales (17.63%), los cuales en conjunto superan el 36% del total de la superficie. Esto sugiere la presencia de procesos de transformación del paisaje natural, posiblemente asociados a actividades agropecuarias, abandono de tierras o cambios en el uso del suelo. Por su parte, los bosques aún mantienen una proporción relevante (13.72%), lo que indica la persistencia de áreas con cobertura vegetal relativamente conservada (Pimienta-Ramírez, 2024; Pimienta-Ramírez et al., 2025).

Los cuerpos de agua abarcan el 6.87% (328.68 km²), los cuales tienen que satisfacer las necesidades antrópicas y ecológicas superficiales indicando que para satisfacer la demanda de agua que requieren los cultivos y otras actividades tendrían que ser de origen subterráneo o colocando ollas de agua para su recolección. Por otro lado, los asentamientos humanos representan el 5.91%, reflejando una ocupación moderada del territorio. Otras coberturas, como el tular (2.49%), el suelo desnudo (0.11%) y el mezquital xerófilo (0.03%), tienen una presencia marginal (Tabla 3).

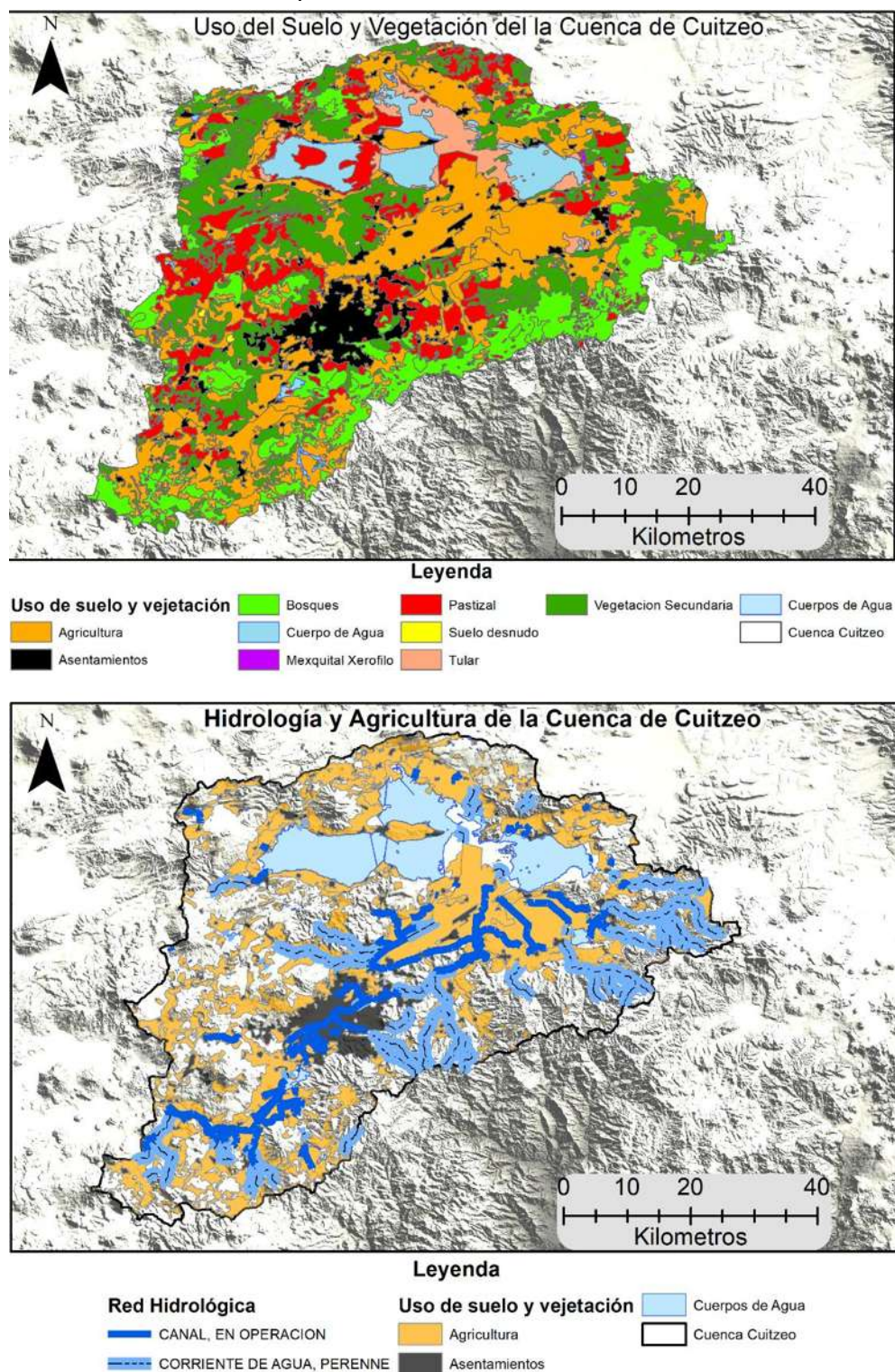
En conjunto, estos datos evidencian un territorio altamente intervenido, donde predominan los usos agrícolas sobre las coberturas naturales, lo cual tiene implicaciones directas en la dinámica hidrológica, la infiltración y la disponibilidad de agua en la cuenca (Fig. 16).

Tabla 3.- *Uso de suelo y Vegetación que se encuentran en la Cuenca de Cuitzeo.*

Uso	Suma de área KM ²	Porcentaje
Agricultura	1,653.10	34.56
Vegetación Secundaria	893.51	18.68
Pastizal	843.13	17.63
Bosques	656.23	13.72
Cuerpo de Agua	328.68	6.87
Asentamientos	282.79	5.91
Tular	119.32	2.49
Suelo desnudo	5.05	0.11
Mezquital Xerófilo	1.49	0.03
Total general	4,783.29	100.00

Fuente: elaboración propia a partir de datos del INEGI (2018)

Figura 16.- Distribución de los tipos de suelos en la Cuenca de Cuitzeo



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INEGI (2018) y el SIATL (2026)

CAPÍTULO I

Análisis de los volúmenes efectivos y concesionados del REDPA en la cuenca de Cuitzeo ante la presión agrícola

Resumen

La gestión integral del recurso hídrico es fundamental entre los diversos usos antrópicos, como las actividades económicas, el saneamiento y el mantenimiento de servicios, además de la preservación de los ecosistemas, de los cuales se obtiene los recursos necesarios para la sociedad. Dado que se trata de un recurso limitado, la distribución de cantidades inapropiadas a través de permisos de usos del agua puede desencadenar tensiones en los ámbitos económicos, social, ecológico e incluso político. La investigación plantea como hipótesis que los caudales otorgados mediante concesiones pudieron generar un déficit hídrico dentro de la cuenca, dado que se asignaron volúmenes superiores a la capacidad natural de recarga. El análisis de la cuenca de Cuitzeo evidenció la expansión de cultivos de alto valor comercial y elevado consumo hídrico, sustituyendo cultivos de temporal. Se evaluaron volúmenes concesionados y efectivos del REDPA por localidad. Los resultados muestran que existen mecanismos que otorgan concesiones de agua pero que no incorporan variables hidroclimáticas, resultando en una sobreasignación del recurso favoreciendo la sobreexplotación. La ciudad de Morelia requiere una gran cantidad de agua principalmente de uso público urbano para abastecer sus necesidades, ocupando grandes volúmenes de agua, superando por el volumen concesionado. La principal actividad económica en todos los municipios dentro de la cuenca es la agricultura, siendo Zinapécuaro y Morelia los que tienen grandes volúmenes de agua. Asimismo, se detecta un cambio en el aprovechamiento del territorio hacia productos agrícolas de gran rentabilidad y elevado requerimiento hídrico, tales como el aguacate y la fresa, los cuales están reemplazando a esquemas tradicionales de cultivo con menor consumo de agua, como el maíz de secano. Este fenómeno intensifica la presión sobre los recursos disponibles. En consecuencia, se hace imperativo reorientar las políticas hídricas y agrícolas hacia un marco de gestión sustentable. Ello implica modernizar los sistemas de riego, revisar y ajustar las concesiones vigentes, e implementar mecanismos rigurosos de monitoreo.

Palabras clave: REDPA, Volumen efectivo, Volumen concesionado, Cuenca de Cuitzeo, Cultivos de alto valor

CHAPTER I

Analysis of the effective and concessioned volumes of the REDPA in the Cuitzeo Basin in the face of agricultural pressure

Abstract

Integrated water resource management is crucial for balancing the multiple human demands placed on water resources, including economic production, urban supply, sanitation, and public services, while safeguarding the ecosystems that sustain environmental and social well-being. Because water is a finite resource, inadequate allocation through water-use concessions can generate economic, social, ecological, and political conflicts. This study examines whether water volumes granted through concessions have contributed to a water deficit in the Cuitzeo Basin by exceeding the natural recharge capacity of available water resources. To evaluate this hypothesis, concessioned and effective water volumes registered in the Public Registry of Water Rights (REPDA) were analyzed at the locality level. The assessment revealed significant changes in land use and agricultural production patterns across the basin. In particular, high-value commercial crops with substantial water requirements have expanded, replacing traditional rainfed agriculture that depended primarily on seasonal precipitation. The findings indicate that current water concession mechanisms do not sufficiently incorporate hydroclimatic variables into allocation decisions. As a result, water resources may be overallocated, increasing the risk of overexploitation. Morelia stands out as the municipality with the highest demand for water, mainly for urban public use, requiring large concessioned volumes to satisfy population needs. Agriculture remains the dominant economic activity throughout the basin, with municipalities such as Zinapécuaro and Morelia concentrating significant water use. Additionally, the expansion of water-intensive crops, particularly avocado and strawberry production, has intensified pressure on available water resources. These crops are increasingly replacing lower-consumption systems such as rainfed maize cultivation. Therefore, sustainable water governance requires revising concession policies, incorporating hydroclimatic criteria into allocation processes, modernizing irrigation infrastructure, and strengthening monitoring systems to ensure the long-term availability and equitable management of water resources in the Cuitzeo Basin.

Keywords: REPDA, Effective Volume, Conceded Volume, Cuitzeo Basin, High-Value Crops

Introducción

En México, la gestión hídrica es regida por la Ley de Aguas Nacionales (LAN), la cual está implícita en la normativa reglamentaria dentro del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CONAGUA, 2024d; DOF, 1992). Esta ley tiene como objetivo principal regular la explotación, uso o aprovechamiento de los recursos naturales, así como la distribución y control, preservación, asegurando el desarrollo integral dentro de todo el territorio nacional.

Bajo este contexto legal el recurso hídrico se encuentra regulado mediante concesiones, otorgadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) o por el organismo de Cuenca correspondiente a la región que se requiera. Las concesiones hídricas tienen la facultad de explotar, darle un uso o aprovechamiento de las aguas nacionales y sus bienes inherentes (CONAGUA, 2024d). La LAN declara la utilidad pública y es considerada de asunto de seguridad nacional y una prioridad, por lo que su gestión se da a partir de su inicio en las cuencas hidrológicas y su desplazamiento, integridad, cantidad y calidad tanto en su nivel superficial y subterráneo. Adicionalmente, se busca garantizar que el recurso hídrico sea equitativo, de acceso universal y sustentable, así como salvaguardar y recuperar los diversos ecosistemas vinculados al agua, mejorando su aprovechamiento en todos los ámbitos de uso. Ello responde a lo planteado en el sexto objetivo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, acuerdo que ha sido suscrito por México. (FAO, 2025a).

La gestión de las concesiones fue creado en 1994 por medio del Registro Público de Derechos del Agua (REDPA), asegurando la transparencia y el acceso a la información, controlar y gestionar el agua, planificar, proporcionar seguridad jurídica y aplicar un manejo efectivo de los recursos hídricos, llevando un registro detallado y actualizado de las asignaciones, permiso y aprovechamiento de aguas nacionales (CONAGUA, 2024b, 2024c).

Sin embargo, a pesar de las leyes y normas rigurosas para la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) en México, existe una discrepancia entre lo que está escrito en la LAN y su aplicación efectiva, debido a que no se ha evitado la sobreexplotación de este recurso hídrico, como se demuestra en los datos del Diario Oficial de la Federación sobre los 653 acuíferos y 757 cuencas hidrológicas (DOF, 2020a, 2020b, 2023a, 2023b). Esto podría ocasionar que la crisis hídrica en México, puede deberse a factores que no son físicos, sino de gobernanza y gestión. Las medidas que el gobierno ha realizado han sido

insuficientes en lo que respecta a la supervisión, sanción y descentralización de la gestión (CEIICH, 2025; González et al., 2022; OCDE, 2013).

Actualmente existe un problema por el uso indiscriminado del agua, debido principalmente a satisfacer las demandas poblacionales, energéticas y de consumo. Esto tiene repercusiones en las distintas esferas de la sustentabilidad, los cuales afecta directamente la disponibilidad hídrica a la población actual y futura de este recurso natural. El mayor consumo de agua se da en el sector alimenticio, primordialmente la agricultura es la que mayor gasto hídrico presenta (BancoMundial, 2023; INEGI, 2025b).

Esto obedece a que se requiere grandes cantidades para satisfacer la demanda alimenticia que existe en el mundo y, por lo tanto, se demanda una mayor cantidad de agua para regar grandes áreas de sus distintos cultivos. Además, hay que señalar que en muchos casos se hace un uso ineficiente del agua debido a la forma de irrigar las áreas de cultivo, el crecimiento de zonas agrícolas, la demanda de ciertos productos alimenticios, es uno de los principales factores que están afectando su disponibilidad hídrica.

El mayor gasto del recurso hídrico es el usado en el sector agrícola con 76%, seguido por el abastecimiento público con 14%, 5% en termoeléctricas y 5% en las distintas industrias (BancoMundial, 2023; INEGI, 2025b). Las cifras antes mencionadas no especifican el gasto hídrico entre cada una de las técnicas agrícolas, por lo que no existen datos de cada tipo de riego existentes.

Existen muchos factores que causan un déficit o estrés hídrico en una región, pero principalmente se puede deber a la dinámica hídrica que existe en una región. Esta involucra desde cuánta agua de precipitación fluvial cae en la región, hasta la recarga de los mantos acuíferos y cuánta agua es consumida o utilizada para distintos sectores de uso antrópico.

Justificación

En la cuenca de Cuitzeo, la actividad agrícola es primordialmente el cultivo del maíz el cultivo. El uso agrícola es la principal actividad en la región y esta puede consumir grandes cantidades de agua y por lo tanto, ejerce una gran presión hídrica (INEGI, 2025b). Por lo tanto, medir la correspondencia entre los hectómetros cúbicos otorgado por concesiones y el gasto efectivo, es necesario para tener una buena Gestión Integral del Recurso Hídrico. El realizar un diagnóstico municipal y por tipo de uso permitirá identificar sobreasignaciones relativas y riesgos de incidencia. También, conocer las áreas que tienen un mayor gasto y conocer su demanda hídrica por cada uso. Por último, permitirá orientar a los tomadores de decisiones en cuanto a un ajuste de títulos e identificar deficiencias en las políticas de títulos concesionados (CONAGUA, 2025c; DOF, 1992).

La literatura reciente confirma la relevancia agrícola y los cambios de uso de suelo en Cuitzeo. Estos ofrecen marcos comparativos para interpretar tendencias de presión hídrica y de productividad; a la vez, las plataformas oficiales (REPDA, SIAP) permiten un análisis reproducible y verificable con datos 2023 (CONAGUA, 2024c; SIAP, 2023, 2024a, 2024b).

Pregunta

¿El elevado volumen y concentración espacial de las concesiones en algunas localidades donde se acumulan mayormente otorgadas en 2023, en la cuenca de Cuitzeo, han inducido un déficit hídrico al exceder la extracción efectiva sin tomar en cuenta la recarga del acuífero, siendo esta severidad máxima en los municipios con agricultura intensiva?

Hipótesis

El elevado volumen y concentración espacial de las concesiones de agua otorgadas en 2023 en la cuenca de Cuitzeo han inducido a un déficit hídrico. Este desbalance resulta de una extracción efectiva que, al amparo de derechos concesionados resulta superior a la disponibilidad natural, excede la recarga del acuífero. La severidad del déficit se incrementa en los municipios con predominio de agricultura intensiva, dada su alta demanda hídrica.

Objetivo General

Cuantificar la relación entre el volumen y la concentración de títulos de concesión inscritos en el REPDA (2023) con respecto al gasto hídrico efectivo por municipio en la cuenca de Cuitzeo, desagregando por uso del agua y por actividad económica, con el fin de determinar si las concesiones explican variaciones significativas en el uso real del recurso hídrico.

Objetivos particulares

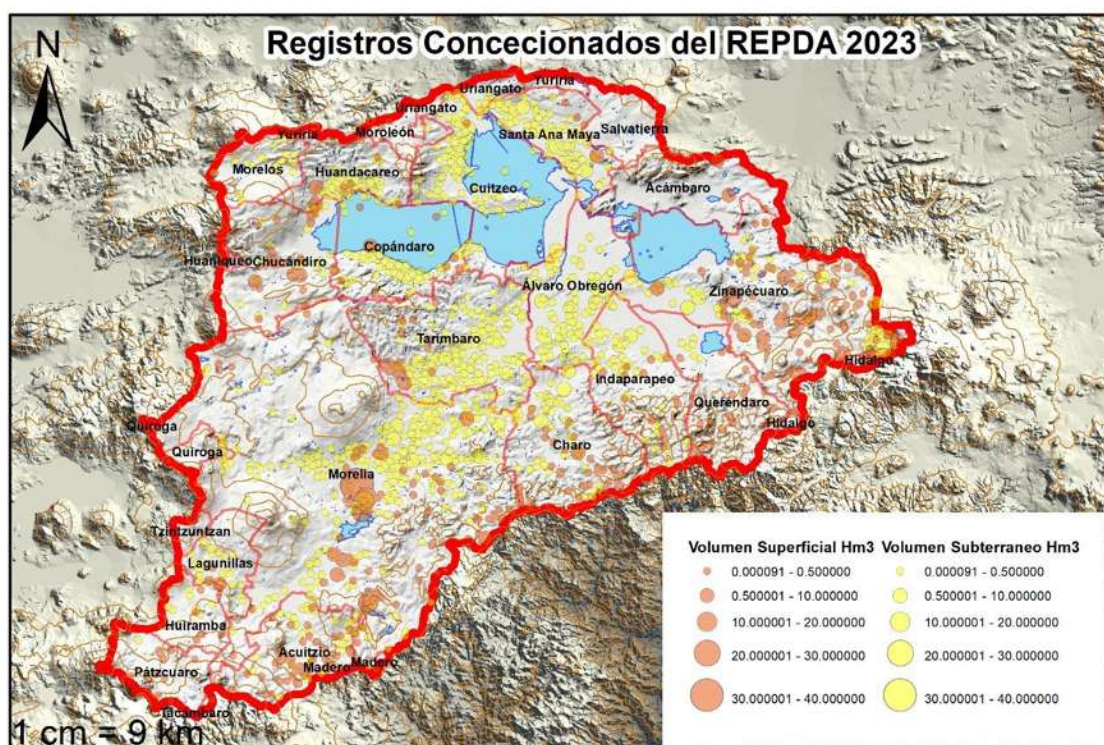
1. Compilar y validar la base de datos REPDA 2023 para todos los títulos (superficiales y subterráneos) localizados dentro de los límites de la cuenca de Cuitzeo, incluyendo volumen inscrito, beneficiario, uso declarado y coordenadas.
2. Estimar el gasto hídrico efectivo 2023 por municipio y por uso (agrícola, público-urbano, industrial, otros) usando registros de medición obtenido de la base de datos del REDPA.
3. Relacionar la estructura productiva municipal (SCIAN 2023) con los volúmenes usados y concesionados: identificar los subsectores que consumen más agua y su contribución al volumen municipal.
4. Determinar los cultivos predominantes en 2023 por municipio (por área cosechada y por volumen de agua estimado por cultivo) y calcular su contribución al gasto hídrico total de la cuenca.
5. Formular recomendaciones de política pública y gestión (ej.: priorizar control de títulos, ajustes de volúmenes en REPDA, estrategias de riego eficiente) con base en los hallazgos.

Metodología

Análisis del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).

Para el análisis del Registro Público de Derechos de Agua, fue tomada de (CONAGUA, 2024e), se integran puntos geolocalizados de los distintos usos y aprovechamientos superficiales y subterráneos del agua en una región en particular (Fig.17). Los puntos correspondientes contienen datos como municipios, estados, cuenca, acuífero, región hidrológica administrativa, número de título, titular, autoridad que emite, fecha de emisión, tipo de uso, grupo de uso, volumen utilizado al año, gasto máximo, SCIAN, fecha de corte y coordenadas. Unos de los errores que presentan los puntos geolocalizados es que existen puntos que salen fuera de la República Mexicana, por lo cual se revisa el estado, municipio y localidad para saber si son puntos que corresponden a la cuenca. Al no tener el número de volumen concesionado desde el día de la emisión, fue necesario ingresar a la página del CONAGUA (2024b) donde se encuentra el REPDA. Una vez solucionado algunos errores de la base de datos de CONAGUA, son analizados y cortados aquellos puntos que queden dentro de la Cuenca de Cuitzeo. El contorno de la

Figura 17.- Mapa registros concesionados del REPDA en la Cuenca de Cuitzeo.



Se observa el porcentaje del total del volumen concesionado. Elaboración propia a partir de datos del REPDA. **Fuente:** elaborado a partir de CONAGUA (2024e)

cuenca fue tomado mediante el SIATL (2026), el cual es un simulador de flujos de cuencas hidrográficas del INEGI.

Con estos insumos se realizó el análisis correspondiente al volumen efectivo que es el volumen suministrado realmente y la comparación con el volumen concesionado que es la cantidad de volumen para ser aprovechada. Fue manejado en un principio por bloques de años siendo el 2020, 2021, 2022 y 2023. Después de analizar cada uno de los bloques de años se decidió analizar únicamente el bloque del año 2023, ya que son datos que corresponden con los datos que se pretenden analizar, siendo los más recientes disponibles a la fecha.

Después de analizar los datos de los bloques de años 2020, 2021, 2022 y 2023 se analizó los tipos de cultivos, área de cosecha, siembra, el tipo de riego y la remuneración económica por municipio presentes en la Cuenca de Cuitzeo de la página del SIAP (2024b). A través de este procedimiento, se pretende determinar cuáles son los cultivos de mayor relevancia y cuál es la jurisdicción municipal que concentra la mayor rentabilidad económica al interior de la cuenca.

Resultados

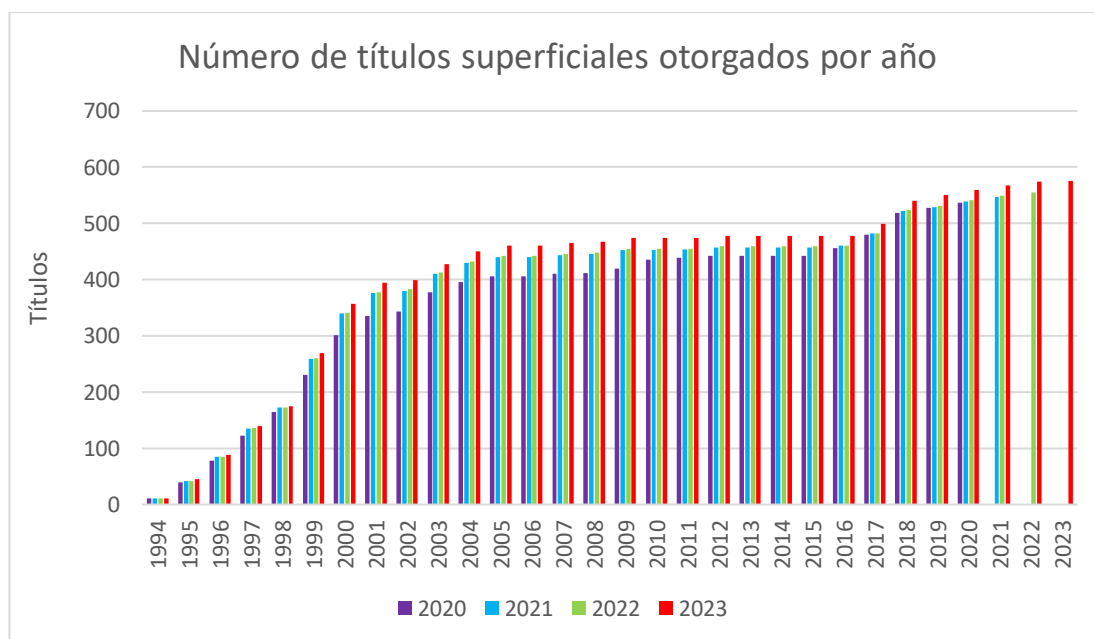
Número de títulos concesionados por año

Títulos superficiales

Los de títulos obtenidos cada año representa la suma de títulos concesionados que fueron separados en cuatro bloques de acuerdo con el año en que se obtuvieron (2020, 2021, 2022 y 2023) (Fig. 18). En cuanto a los títulos de agua superficial en el bloque del año 2023 es notable la diferencia en comparación con otros bloques.

Se observa un primer incremento exponencial desde 1994 hasta 2001, alcanzando 335 títulos en el bloque 2020, 376 en el bloque 2021, 378 en el bloque 2022 y 394 en el bloque 2023. Entre 2002 y 2016, el aumento en la cantidad de títulos fue menos acelerado, destacando una notable diferencia en el bloque 2021 y 2023 en comparación con los otros dos bloques. En 2016, el bloque 2021 acumuló 456 títulos, mientras que los bloques 2020 y 2022 alcanzaron 460 títulos cada uno, mostrando una notable similitud entre ambos bloques y a partir de esa fecha, el bloque 2023 obtuvo 478 títulos. Desde el 2017 se incrementó el número de concesiones otorgadas, terminando el bloque 2020 en 537, el 2021 en 547, el 2022 en 555 y el 2023 en 576 títulos concesionados.

Figura 18.- Títulos Concesionados Superficiales



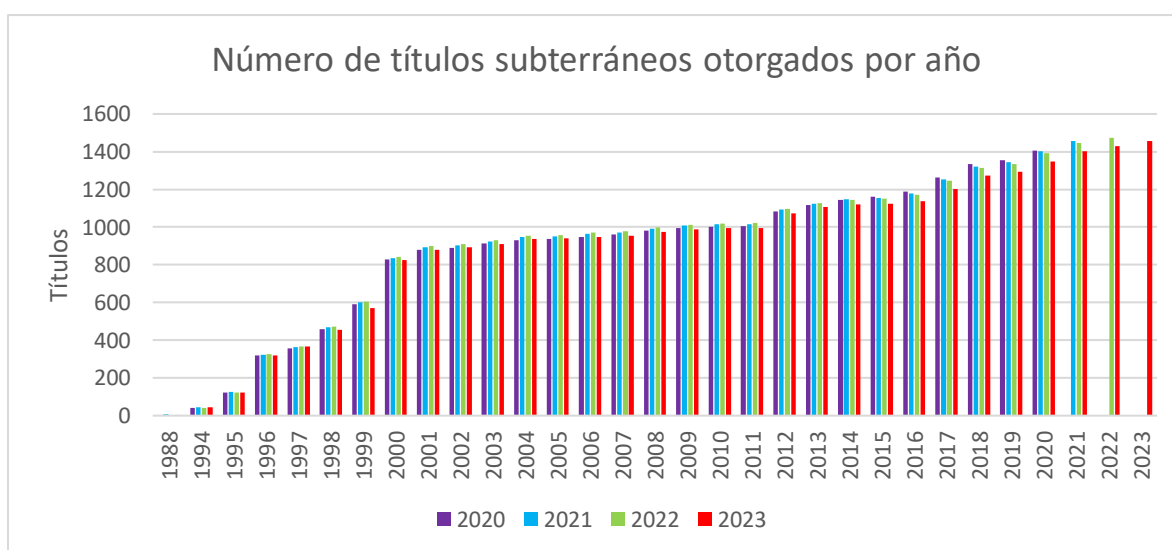
Nota: Número de títulos agrupados y otorgados a nivel superficial en los años 2020, 2021, 2022 y 2023 en la Cuenca de Cuitzeo. **Fuente:** elaborado a partir de CONAGUA (2024e)

Títulos Subterráneos

El número de títulos subterráneos es casi tres veces mayor en comparación con los títulos superficiales (Fig. 19). El aprovechamiento subterráneo comenzó en 1988, pero su crecimiento fue muy acelerado hasta el 2001 en los tres bloques, alcanzando 879 títulos en el bloque 2020, 893 en el bloque 2021, 899 títulos en el 2022 y 881 en el bloque 2023. A partir de ahí, el crecimiento se estabilizó un poco hasta el 2011, donde el bloque 2020 alcanzó 1,006 títulos, el bloque 2021 tuvo 1,016, el bloque 2022 llegó a 1,021 y por último, el bloque 2023 llegó a 996 títulos concesionados. títulos, el bloque 2021 tuvo 1,016 y el bloque 2022 llegó a 1,021 títulos concesionados. En 2012, el número de títulos volvió a incrementarse hasta el 2017. Desde el 2016, el bloque 2021 obtuvo un mayor número de títulos que los otros bloques en los años siguientes. A partir del año 2017, los tres bloques crecieron exponencialmente hasta el final de cada bloque. En 2020 se acumularon 1,407 títulos, en 2021 se acumularon 1,456, en 2022 se obtuvieron 1,474 títulos y el 2023 alcanzo 1,456 concesionados de agua.

En cuanto a los títulos concesionados subterráneos se observa que el número de concesiones es menor en el bloque 2023 en comparación con los otros. En este aprovechamiento a diferencia del superficial siempre fue constante su incremento en todos los años teniendo como mínimo hasta 5 concesiones otorgadas al año.

Figura 19.- Títulos Concesionados Subterráneos



Nota: Número de títulos agrupados y otorgados a nivel subterráneo en los años 2020, 2021, 2022 y 2023 en la Cuenca de Cuitzeo. **Fuente:** elaborado a partir de CONAGUA (2024e)

Autoridades que otorgan concesiones

Existen seis autoridades que emiten títulos concesionados para el uso del agua para la región de la cuenca de Cuitzeo, de aprovechamiento superficial y subterráneo, correspondientes a los bloques 2020, 2021, 2022 y 2023 (Tabla 4). Sin embargo, existen concesiones las cuales no tienen registro, debido a que al momento de realizar un corte anual no fueron aún capturadas correctamente, pero si anexadas a un lugar dentro de la cuenca. El total de los registros indican que ha existido un incremento de títulos cada año en ambos aprovechamientos. La tendencia del número concesiones de ambos aprovechamientos fue incrementándose. En el 2020, se obtuvo 1,946 concesiones, en el 2021 fueron 2006, en el 2022 alcanzó 2031 y el 2023 se obtuvo 2034.

Entre los aprovechamientos se observó un mayor número de concesiones en subterráneo que en el superficial, donde en el 2020 representa el 72.40%, el 2021 es el 72.73%, el 2022 tiene un 72.67% y el 2023 cuenta con el 71.68%. Esto representa $3 \frac{1}{4}$ partes del total de concesiones otorgadas para toda la cuenca.

La autoridad que más concesiones emite es la Dirección Local de Michoacán, posiblemente derivado a que es el estado que más municipios tiene. En segundo lugar, podemos ver que son las concesiones sin registro de alguna autoridad, son las que mayormente prevalecen en cada año. Por el contrario, con la anterior van en descenso con posibilidad de que vayan esclareciéndose cada año. Como tercer lugar se tiene a la Dirección Local de Guanajuato en donde su incremento estaba presente en cada año y tuvo una disminución brusca en el 2023. En cuarto lugar, está la Gerencia de Servicios a Usuarios manteniéndose en todos los años excepto 2023, incrementándose solamente seis concesiones. En quinto lugar, la Dirección General del Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico, de la cual se ha mantuvo con el mismo número de concesiones excepto en el 2023, donde probablemente dos concesiones se terminó su contrato en el aprovechamiento subterráneo. En sexto lugar, se tiene a la Subdirección General de Administración del Agua (Morelia) disminuyendo aumentando aguas superficiales en el 2023. Por último, se tiene a las Oficinas Centrales donde a partir del 2022 se obtuvo una concesión subterránea y se mantuvo en el 2023.

Tabla 4.- Autoridad que ha emitido los títulos de concesiones en la Cuenca de Cuitzeo en el año 2020, 2021, 2022 y 2023

<i>Autoridad que emite</i>	Sub 20	Sup 20	Total	Sub 21	Sup 21	Total	Sub 22	Sup 22	Total	Sub 23	Sup 23	Total
<i>Dirección General del Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico (Morelia-Queréndaro)</i>	30	1	31	30	1	31	30	1	31	28	1	29
<i>Dirección local Guanajuato</i>	70	3	73	74	5	79	76	5	81	0	6	6
<i>Dirección Local Michoacán</i>	1 088	502	1 590	1 213	524	1 737	1 276	538	1 814	1379	562	1941
<i>Gerencia de Servicios a Usuarios</i>	39	3	42	39	3	42	39	3	42	45	3	48
<i>Subdirección General de Administración del Agua (Morelia)</i>	0	3	3	0	3	3	0	2	2	1	4	5
<i>Oficinas Centrales</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1
<i>Sin Registro</i>	182	25	207	103	11	114	54	5	59	4	11	15
<i>Total</i>	1 409	537	1 946	1 459	547	2 006	1 476	555	2 031	1458	576	2034

Se presenta las distintas autoridades que emiten las diferentes concesiones de extracción y Aprovechamiento. Sub: Subterráneo, Sup: Superficial. **Fuente:** elaborado a partir de CONAGUA (2024b)

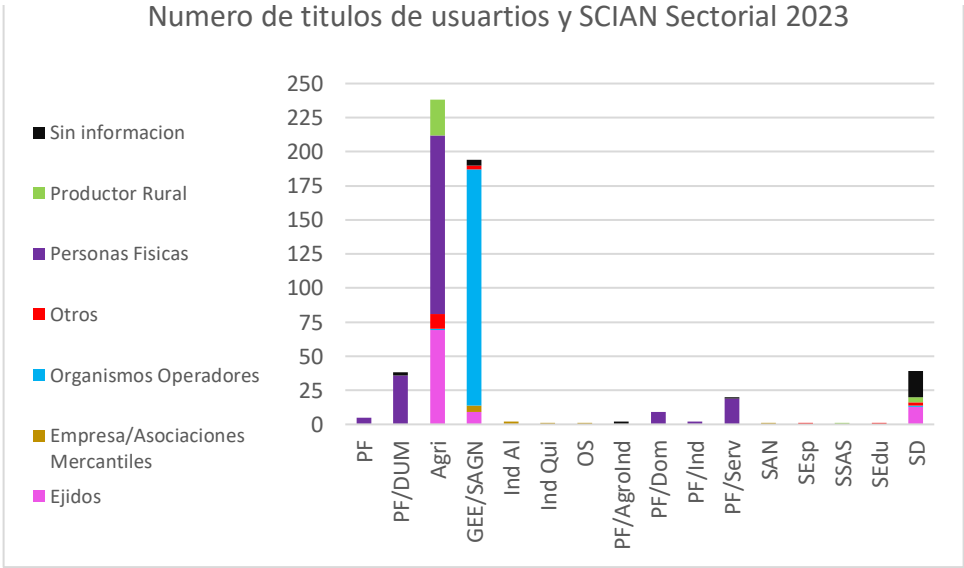
Número de Usuarios y SCIAN sectorial del 2023

Superficial

Se examino el Sistema de Clasificación Industrial de America del Norte (SCIAN), que estructura las actividades productivas en categorías jerárquicas como sectores, subsectores, ramas, clases y otras subdivisiones afines. Este sistema se basa en la similitud de los procesos de producción para mejorar la comparabilidad de la información estadística y económica a nivel internacional. El SCIAN se analiza en función de los usuarios que hacen uso del agua, observándose que la agricultura es el sector con mayor cantidad de títulos otorgados. Se analizaron únicamente los datos del bloque 2022, ya que son muy similares a los de los bloques anteriores.

Para el aprovechamiento superficial, se otorgaron 131 títulos a personas físicas, 69 a ejidos, 26 a productores rurales, 11 a otros y 1 a organismos operadores, haciendo un total de 238 (Fig. 20). El siguiente usuario es la generación de energía eléctrica, suministro de agua y gas natural, donde los organismos operadores tienen 173 títulos, 9 son para ejidos, 5 para empresas/asociaciones mercantiles, 4 sin información y 3 para otros, dando un total de 194. El siguiente grupo son los títulos sin información, donde se obtuvieron 39 títulos, de los cuales 19 no presentan información, 13 son para ejidos, 4 para producción rural, 2 para otros y 1 para organismos operadores. Por último, el usuario "persona física / diferentes usos múltiples" tiene un total de 38 títulos, siendo las personas físicas las que tienen el mayor número de títulos, obteniendo 36, con 2 sin información.

Figura 20.- Títulos concesionados de uso del agua por el SCIAN superficial

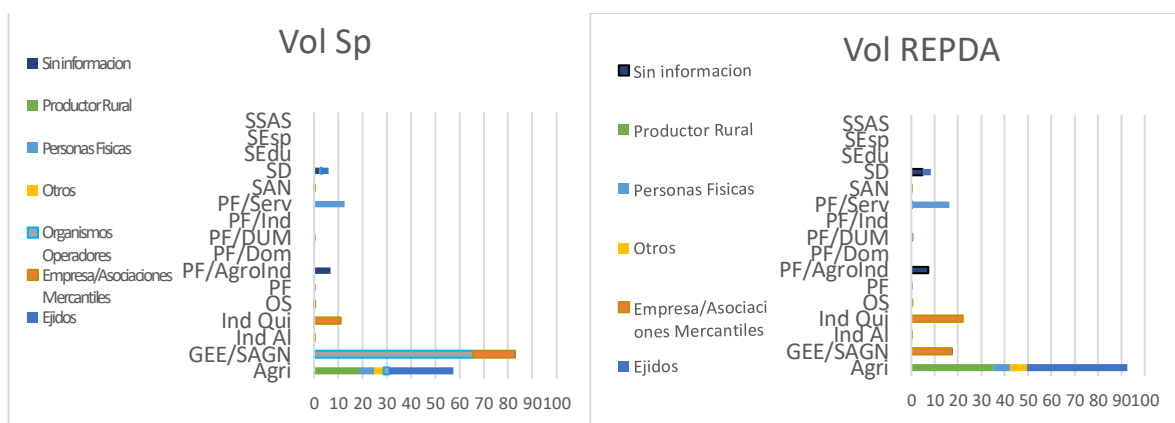


Nota: En ellos se abrevian de la siguiente forma: Persona Física =PF; Persona física / Diferentes Usos-Múltiples PF/DUM; Agri= Agricultura; Generación de Energía Eléctrica Suministro de Agua y Gas Natural= GEE/SAGN; Industria alimentaria= Ind AI; Industria Química= Ind Qui; Otros servicios excepto actividades gubernamentales= OS; Persona Física / Agroindustrial= PF/AgroInd; Persona física / Doméstico= PF/Dom; Persona física / industrial= PF/Ind; Persona Física / Servicio= PF/Serv; Servicio de Apoyo a los Negocios= SAN; Servicios de Esparcimiento= SEsp; Servicios de Salud y Asistencia Social= SSAS; Servicios educativos= SEdu; Sin Información= SD. **Fuente:** elaborado a partir de CONAGUA (2024e)

Se define como volumen efectivo el recurso hídrico que fue utilizado realmente durante un año, y como volumen concesionado al volumen de agua que se ha asignado

para su aprovechamiento bajo un permiso otorgado por CONAGUA y registrado en el REPDA. Se observó claramente que el sector del SCIAN de la generación de energía eléctrica, suministro de agua y gas natural es el de mayor tendencia, representando el 46.48% del total, acumulando 83 hm³/año. Los usuarios con mayor volumen efectivo son los organismos operadores, con un uso de 65.57 hm³/año, seguidos de empresas/asociaciones mercantiles con 17.13 hm³/año, ejidos con 0.15 hm³/año, otros con 0.09 hm³/año y usuarios sin información con 0.06 hm³/año (Fig. 21).

Figura 21.- Volumen Concesionado de uso del agua por el SCIAN superficial



Nota: Se presenta los Volúmenes Efectivos (VolSP) y los Concesionados (VolREPDA) para los distintos Usuarios del uso del Agua con los distintos SCIAN en la Cuenca de Cuitzeo, representado en hm³/Año. En ellos se abrevian de la siguiente forma: Persona Fisica =PF; Persona fisica / Diferentes Usos-Multiples PF/DUM; Agri= Agricultura; Generacion de Energia Electrica Suministro de Agua y Gas Natural= GEE/SAGN; Industria alimentaria= Ind Al; Industria Quimica= Ind Qui; Otros servicios excepto actividades gubernamentales= OS; Persona Fisica / Agroindustrial= PF/AgroInd; Persona fisica / Domestico= PF/Dom; Persona fisica / industrial= PF/Ind; Persona Fisica / Servicio= PF/Serv; Servicio de Apoyo a los Negocios= SAN; Servicios de Esparcimiento= SEsp; Servicios de Salud y Asistencia Social= SSAS; Servicios educativos= SEdu; Sin Informacion= SD. **Fuente:** elaborado a partir de CONAGUA (2024e)

Para el uso concesionado, representa el 60.70%, donde los organismos operadores hacen uso de 215.50 hm³/año (casi 4 veces más que el volumen efectivo), seguido de empresas/asociaciones mercantiles con 17.15 hm³/año, los ejidos con 0.27 hm³/año, otros con 0.09 hm³/año y usuarios sin información con 0.06 hm³/año, dando un total de 233.06

hm³/año. Sin embargo, al ser un uso no consuntivo, se omitió en el análisis, quedando únicamente los usos consuntivos.

Para el análisis de los usos consuntivos, podemos observar que el volumen efectivo de mayor relevancia corresponde a los usuarios agrícolas, que representan el 32.14%. En este grupo, los ejidos consumen 26.36 hm³/año, seguidos de productores rurales con 19.02 hm³/año, personas físicas con 5.19 hm³/año, otros con 3.94 hm³/año y organismos operadores con 2.49 hm³/año. Otros sectores del SCIAN con relevancia superior al 1% son personas físicas/servicio con 7.09%, industria química con 6.18%, personas físicas/agroindustrial con 3.71% y usuarios sin información con 3.27%. En total, el volumen efectivo de toda la cuenca de Cuitzeo es de 178.56 hm³/año.

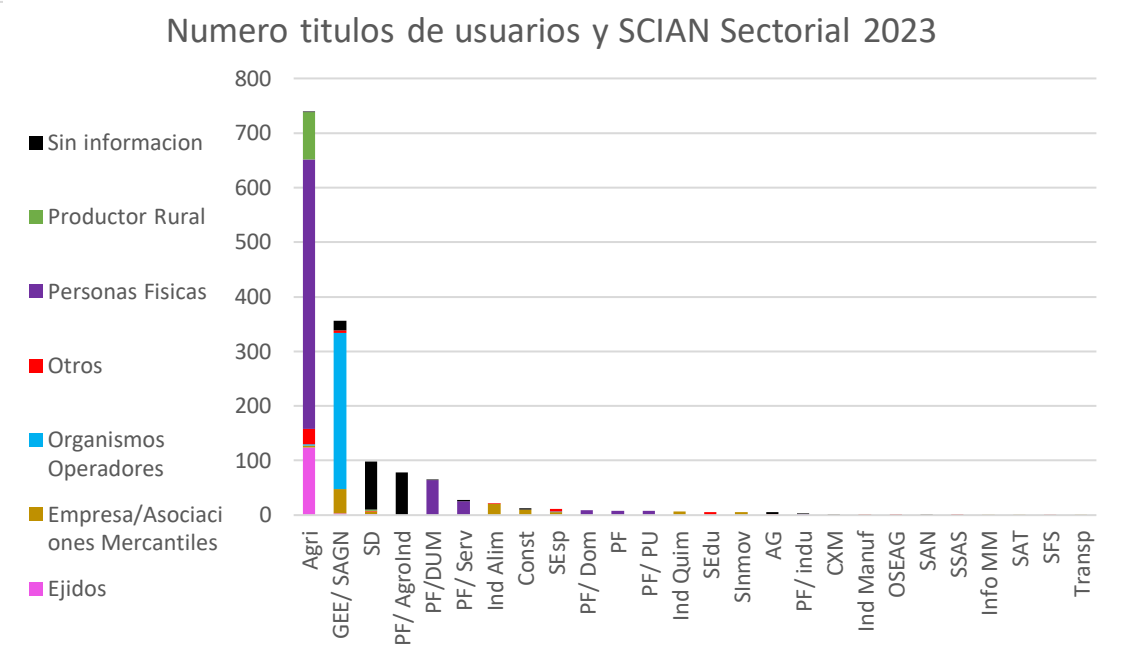
Para los análisis de uso consultivo de concesiones se observa que la agricultura está representada por 24.72%, donde los ejidos concentran 43.04, productores rurales con 35.22 hm³/año, Otros y Personas Físicas con 7.08 y 7.09%, respectivamente. Para el análisis de uso consuntivo de concesiones, observamos que la agricultura está representada por un 24.72%. Dentro de este sector, los ejidos tienen un uso de 43.04 hm³/año, los productores rurales 35.22 hm³/año, y otros y personas físicas con 7.08% y 7.09% respectivamente y organismos operadores usan 2.49 hm³/año. En el SCIAN, otros sectores con una representación mayor al 1% incluyen la industria química con 5.75%, personas físicas/servicio con 4.22%, usuarios sin información con 2.16% y personas físicas/agroindustrial con 1.90%. En total, el uso de agua concesionada en toda la cuenca de Cuitzeo es de 383.98 hm³/año.

Subterráneo

En el SCIAN sectorial de aprovechamiento subterráneo, la agricultura representa el 50.14% del total de títulos. Entre los usuarios con más títulos concesionados se encuentran las personas físicas con 494 títulos, ejidos con 124, productores rurales con 86 títulos, otros con 28, empresas/asociaciones mercantiles con 4, y organismos operadores y otros con 2 títulos cada uno, sumando un total de 740 títulos concesionados (Fig. 22). El siguiente sector es uno no consuntivo, el de la generación de energía eléctrica, suministro de agua y gas natural, que representa el 24%, con los organismos operadores presentando 286 títulos, seguidos de empresas/asociaciones mercantiles con 45, sin información con 17, otros con cinco y ejidos con tres, dando un total de 356 títulos concesionados. Otros sectores del SCIAN con una representación mayor al 1% incluyen usuarios sin información con 6.64%, personas físicas/industria con 5.28%, personas físicas/diferentes usos-múltiples

con 4.40%, personas físicas/servicio con 1.90% e industria alimentaria con 1.49%. El total general de títulos concesionados subterráneos es de 1,476.

Figura 22.- Títulos concesionados de uso del agua por el SCIAN Subterráneos

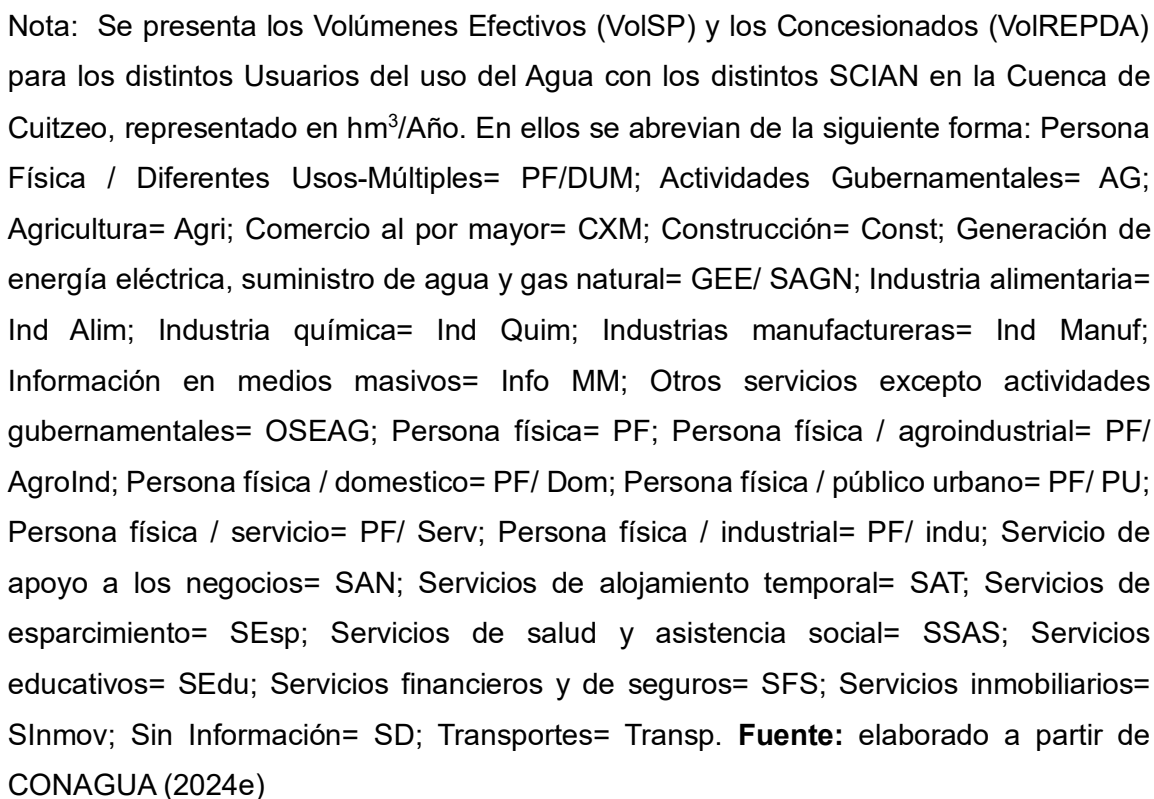


Nota: Se presenta los títulos concesionados para los distintos Usuarios del uso del Agua con los distintos SCIAN en la Cuenca de Cuitzeo, representado en $\text{hm}^3/\text{Año}$. En ellos se abrevian de la siguiente forma: Persona Física / Diferentes Usos-Múltiples= PF/DUM; Actividades Gubernamentales= AG; Agricultura= Agri; Comercio al por mayor= CXM; Construcción= Const; Generación de energía eléctrica, suministro de agua y gas natural= GEE/ SAGN; Industria alimentaria= Ind Alim; Industria química= Ind Quim; Industrias manufactureras= Ind Manuf; Información en medios masivos= Info MM; Otros servicios excepto actividades gubernamentales= OSEAG; Persona física= PF; Persona física / agroindustrial= PF/ AgroInd; Persona física / domestico= PF/ Dom; Persona física / público urbano= PF/ PU; Persona física / servicio= PF/ Serv; Persona física / industrial= PF/ indu; Servicio de apoyo a los negocios= SAN; Servicios de alojamiento temporal= SAT; Servicios de esparcimiento= SEsp; Servicios de salud y asistencia social= SSAS; Servicios educativos= SEdu; Servicios financieros y de seguros= SFS; Servicios inmobiliarios= Sinmov; Sin Información= SD; Transportes= Transp.

Fuente: elaborado a partir de CONAGUA (2024e)

Aunque la generación de energía eléctrica, suministro de agua y gas natural representa un 36.43% del uso subterráneo, no se considera como consuntivo, pero se analiza. Los organismos operadores tuvieron un volumen efectivo de $43.54 \text{ hm}^3/\text{año}$,

Figura 23.- Volumen Concesionado de uso del agua por el SCIAN Subterráneo



físicas/agroindustrial con 3.16%, industria alimentaria con 1.66% y personas físicas/diferentes usos-múltiples con 1.57%.

Para el volumen concesionado, la generación de energía eléctrica, suministro de agua y gas natural ocupa 95.46%, con un total de 2,803.92 hm³/año. Los organismos operadores tienen el mayor volumen concesionado 1,925.86 hm³/año, seguidos por empresas y asociaciones mercantiles 874.87 hm³/año, sin información 1.99 hm³/año, otros con 0.82 hm³/año y ejidos 0.39 hm³/año. En segundo lugar, pero con menor porcentaje está la agricultura, representando 3.10%, con la mayoría de las concesiones en ejidos (33.07 hm³/año), productores rurales (25.51 hm³/año), personas físicas (24.08 hm³/año), otros (7.54 hm³/año), sin información (0.65 hm³/año), organismos operadores (0.15 hm³/año) y empresas/asociaciones mercantiles (0.19 hm³/año). El total de concesiones suma 2,937.15 hm³/año. Los demás sectores del SCIAN se encuentran por debajo del 1%.

Uso concesionado del agua

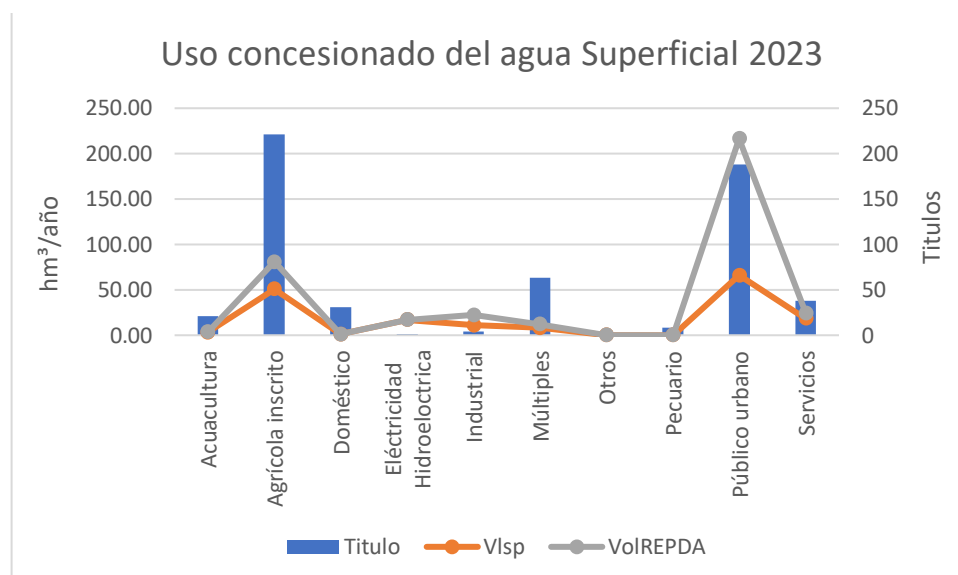
Superficial

En la cuenca, existe un uso no consuntivo único, que es la generación de energía eléctrica, suministro de agua y gas natural, con un solo título, mientras que hay nueve usos consuntivos con 576 títulos concesionados (Fig. 24). La agricultura es el uso con más títulos concesionados, alcanzando 221 títulos, lo que representa 38.37%, seguido por el uso público urbano con 188 títulos, equivalente al 32.64%, y los usos múltiples con 63 títulos, representando 10.94%. Los seis siguientes usos tienen menos del 10% del total en toda la cuenca.

En cuanto al volumen efectivo, el total de todos los usos representa 175.98 hm³/año, donde el uso público urbano utiliza 66.10 hm³/año, lo que equivale al 37.56%, seguido por el uso agrícola con 50.91 hm³/año, representando el 28.93% y el uso de servicios con 18.47 hm³/año, ocupando el 10.49%. Los demás usos se encuentran por debajo del 10%.

En relación al volumen concesionado, representa en total 377.40 hm³/año, donde el uso público urbano concentran 57.31%, con un total de 216.30 hm³/año, más de tres veces el volumen efectivo. El siguiente uso en volumen concesionado es el agrícola, con 21.40% del total con 80.78 hm³/años concesionados.

Figura 24.- Usos concesionados del agua superficial



Nota: Títulos, volumen utilizado y concesiones otorgadas a nivel superficial en los distintos usos del agua. Vols: Volumen efectivo Superficial, VolREPDA: Volumen concesionado. **Fuente:** elaborado a partir de CONAGUA (2024e).

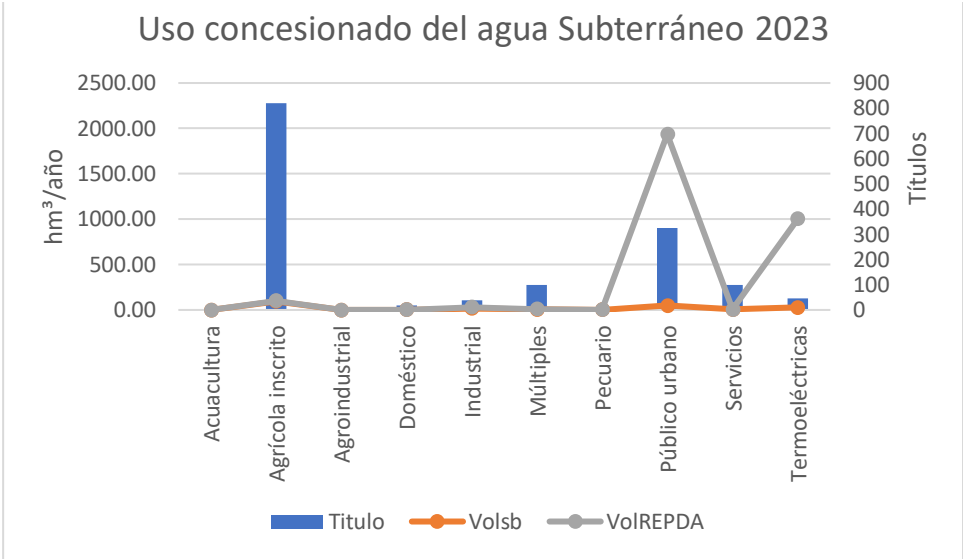
Subterráneo

Los usos con mayor número de títulos concesionados se dividen principalmente en dos categorías: agricultura y público urbano. A diferencia de la generación de energía eléctrica, las termoeléctricas son consideradas consuntivas debido a las emisiones de sustancias contaminantes durante su producción de energía y está presente en el aprovechamiento subterráneo con 45 títulos, un volumen efectivo de 26.25 hm³/año y con un volumen concesionado de 1004.57 hm³/año. Sin embargo, la agricultura representa 56.31%, con un total de 821 títulos concesionados para este uso. En segundo lugar, está el uso público urbano, con 22.22%, contando con 324 de un total de 1,458 títulos concesionados en toda la cuenca. Los otros ocho usos están representados con un porcentaje inferior al 10% (Figura 25).

En términos de volumen efectivo, se destacan tres usos principales de los diez considerados: la agricultura ocupa 46.06% %, con un volumen efectivo de 93.24 hm³/año. El segundo uso más relevante es el público urbano, con 24.27%, alcanzando 48.97 hm³/año. Por último, las termoeléctricas representan 13.25%, con un consumo de 26.25

hm³/año. Los otros siete usos tienen valores menores al 10%, sumando un total de volumen efectivo para toda la cuenca de 198.14 hm³/año.

Figura 25.- Usos concesionados del agua Subterráneo



Nota: Títulos, volumen utilizado y concesiones otorgadas a nivel subterráneo en los distintos usos del agua. Volsp: Volumen efectivo Superficial, VolREPDA: Volumen concesionado. **Fuente:** elaborado a partir de CONAGUA (2024e)

En cuanto al volumen concesionado, los dos usos más significativos de los diez son el público urbano, con 62.64%, con un volumen concesionado de 1,934.56 hm³/año, y las termoeléctricas, con 32.53%, alcanzando 1,004.57 hm³/año. La agricultura, con un 3.28% y un volumen concesionado de 101.44 hm³/año, representa menos del 10%. El total del volumen concesionado para los diez usos es 3,038.33 hm³/año.

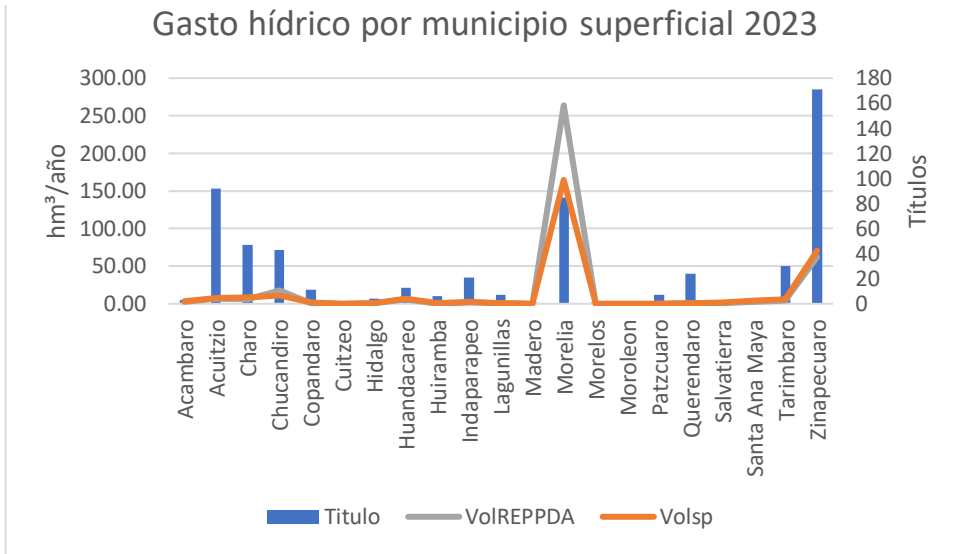
Gasto de agua Por Municipio

Superficial

En cuanto a los títulos concesionados para el aprovechamiento superficial, tres municipios destacan con más del 10% del total. Zinapécuaro lidera con 171 títulos, abarcando 29.69% del total. Morelia con 85 y Acuitzio con 92 títulos, representando el 14.76% y 15.97 respectivamente. Otros municipios con más del 1% incluyen Charo con 47 títulos, Chucándiro con 43, Tarímbaro con 30, Queréndaro con 24, Indaparapeo con 21,

Huandacareo con 13, Copándaro con 11, Pátzcuaro con 7, Lagunillas con 7 y Huiramba con 6 títulos (Figura 26).

Figura 26.- Gasto hídrico por Municipio Superficial



Nota: Títulos, volumen utilizado y concesiones otorgadas por Municipio a nivel Superficial. Volsp: Volumen efectivo Superficial, VolREPPDA: Volumen concesionado por el REPDA.

Fuente: elaborado a partir de CONAGUA (2024e)

En cuanto al volumen efectivo, solo dos municipios superan 10%. Morelia lidera con 98.78 hm³/año, lo que representa 56.13%, seguido por Zinapécuaro con 42.54 hm³/año, equivalente al 24.17%. Otros municipios significativos con más del 1% incluyen Chucándiro con 6.54 hm³/año, Charo con 5.01 hm³/año, Acuitzio con 4.68 hm³/año, Huandacareo con 3.95 hm³/año, Tarímbaro con 3.68 hm³/año, Santa Ana Maya con 2.75 hm³/año y Acámbaro 2.25.

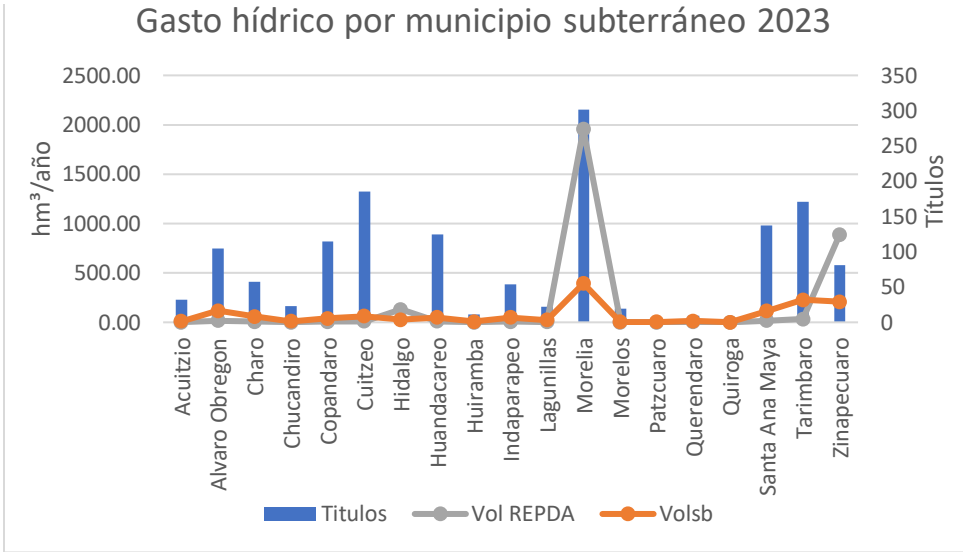
En cuanto al volumen concesionado, Morelia lidera con 263.95 hm³/año, abarcando el 69.94% del total, seguido por Zinapécuaro con 61.72 hm³/año, que representa el 16.36%. Otros municipios con más del 1% incluyen Chucándiro con 17.63 hm³/año, Acuitzio con 7.17 hm³/año, Huandacareo con 6.00 hm³/año, Charo con 5.81 hm³/año, y Tarímbaro con 3.86 hm³/año.

Subterráneo

En los títulos concesionados para el aprovechamiento subterráneo, tres municipios destacan con más del 10%. Morelia es el municipio con la mayor cantidad de títulos, con

301, lo que representa el 20.64% del total. Le sigue Cuitzeo con 185 títulos, equivalentes al 12.69%, y Tarímbaro con 171 títulos, que corresponden al 11.73% (Fig. 27).

Figura 27.- Gasto hídrico por Municipio Subterráneo



Nota: Títulos, volumen utilizado y concesiones otorgadas por Municipio a nivel Superficial.
Volsb: Volumen efectivo Superficial, VolREPDA: Volumen concesionado por el REPDA.
Fuente: elaborado a partir de CONAGUA (2024e)

En términos de volumen efectivo, también hay tres municipios que superan el 10%. Morelia ocupa el primer lugar con 55.09 hm³/año, lo que representa 27.80%. En segundo lugar, se encuentra Tarímbaro con 31.67 hm³/año, representando 15.98%, y Zinapécuaro con 29.24 hm³/año, equivalente al 14.76%. Solo ocho municipios tienen un porcentaje mayor al 1%.

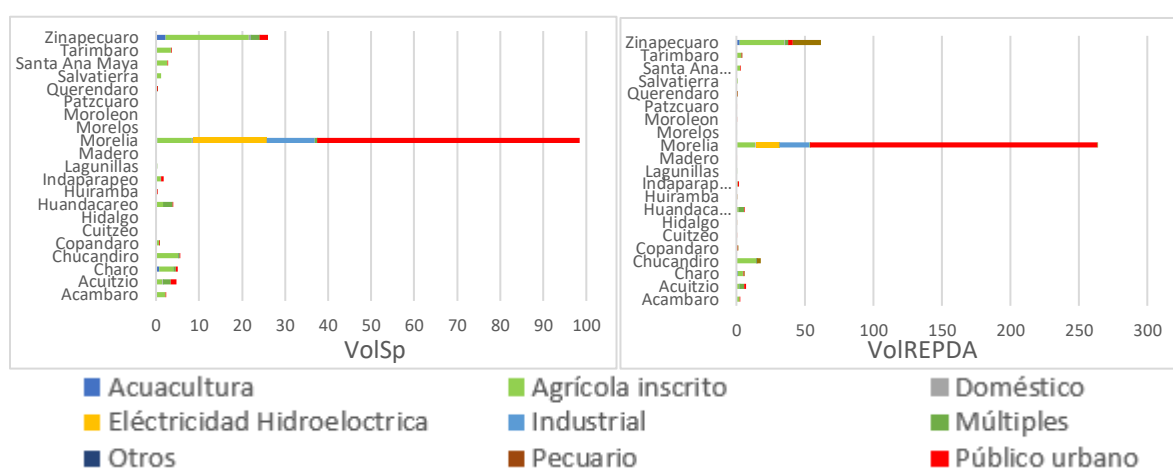
Respecto al volumen concesionado, observamos que solo dos municipios superan el 10%. Morelia tiene un volumen concesionado de 1,953.88 hm³/año, lo que representa 63.27%, mientras que Zinapécuaro tiene un volumen concesionado de 888.03 hm³/año, representa 28.75%. Únicamente Tarímbaro supera el 1%, con 33.28 hm³/año, lo que equivale al 1.08%.

Usos de Agua por Municipio

Superficial

Sobre el uso del agua superficial, se eliminó la generación de energía eléctrica por ser un recurso no consuntivo y por tener una gran cantidad de agua concesionada y efectiva tanto para el aprovechamiento superficial como subterráneo. Al observar el volumen efectivo, se destacan tres usos importantes del agua (público urbano, agrícola y servicios), que en conjunto suman 135.49 hm³/año de todos los usos y 76.99% respectivamente de todos los municipios en la Cuenca (Fig. 28).

Figura 28.- Volumen efectivo y concesionado por municipio Superficial



Nota: volumen efectivo y concesiones otorgadas por Municipio a nivel Superficial. VolSp: Volumen efectivo Superficial, VoIREPDA: Volumen concesionado por el REPDA.

Fuente: elaborado a partir de CONAGUA (2024e)

En primer lugar, el volumen efectivo se encuentra el uso público urbano, que aprovecha 66.10 hm³/año y está presente en casi todos los municipios, excepto en Lagunillas, Morelos, Madero y Salvatierra. Morelia es el municipio que concentra la mayor parte del volumen suministrado ocupando el 92.39% de este uso, aprovechando 61.08 hm³/año. El segundo uso más importante es el agrícola, presente en 17 de los 21 municipios registrados. Morelia y Zinapécuaro encabezan la lista, concentrando entre ambos el 53.85% del total anual de 27.42 hm³/año asignados a este rubro. Donde Zinapécuaro tiene 19.39 hm³/año (38.09%) y Morelia 8.03 hm³/año (15.76%). El tercer uso de mayor relevancia es el de servicios, presente en ocho municipios, donde Zinapécuaro representa 89.48% con un aprovechamiento de 16.53 hm³/año. El uso industrial solo está presente en Morelia con 11.04 hm³/año siendo 100% de toda la cuenca.

Respecto al volumen concesionado, los usos público urbano y agrícola son los más significativos arriba del 10%, ocupando 78.72 hm³/año (8.71%) del total de todos los usos. El uso público urbano de Morelia se le concesionan 209.62 hm³/año, representando el 96.91% de ese uso en toda la cuenca. Este uso está presente en 17 municipios, con un total de 216.30 hm³/año. El segundo uso relevante es el agrícola, acaparando 21.40% de los 10 usos. Los municipios con más concesiones en este rubro son, en primer lugar, Zinapécuaro, con 80.78 hm³/año, lo que representa 21.40%. En segundo lugar, está Chucándiro, con 14.60 hm³/año (18.08%), seguido por Morelia, con 13.40 hm³/año (16.59%).

Subterráneo

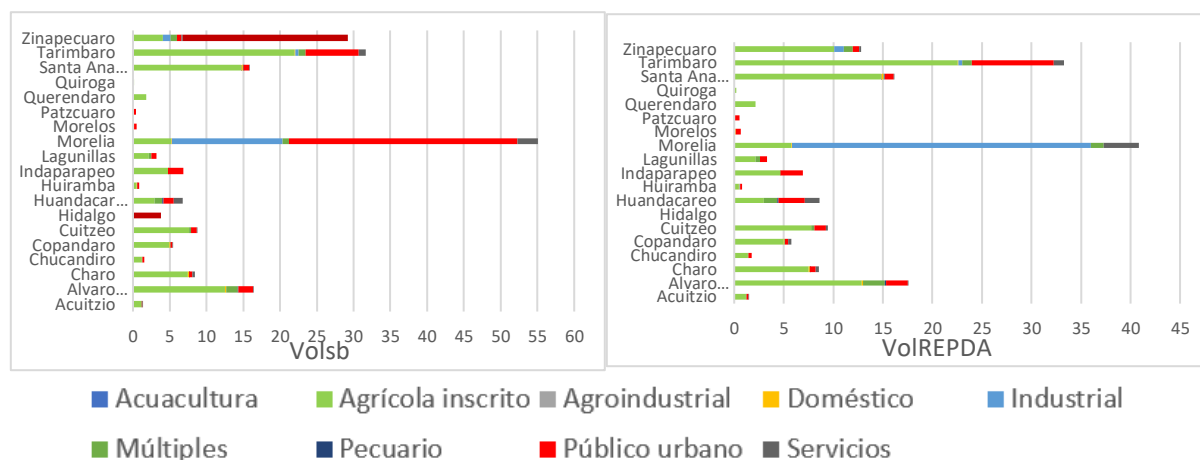
Los volúmenes del uso de termoeléctrica fueron eliminados debido a que se puede considerar un uso no consuntivo ya que la mayor cantidad de agua es regresada sin ninguna alteración. ocupa en la gráfica un área mayor haciendo la escala de otro uso menos perceptible. Sin embargo, el volumen efectivo 15.71% y en uso concesionado 85.47%. Los municipios de Hidalgo y Zinapécuaro son los únicos que presentan este uso con un volumen efectivo de 3.81 y 22.44 hm³/año respectivamente. En cuanto al volumen concesionado se observa para el municipio de Hidalgo 129.35 hm³/año, mientras que Zinapécuaro se le otorga un volumen de 875.22 hm³/año.

Se muestran principalmente dos usos de mayor relevancia mayores al 10%, siendo el uso público urbano y el agrícola. La agricultura es el primer uso importante en la cuenca, utilizando 93.24 hm³/año y que representa el 47.06% de todos los usos, distribuido entre 17 municipios. El municipio más representativo es Tarímbaro, que hace uso de 22.00 hm³/año, representando 23.60%. Le sigue Santa Ana Maya, con un uso de 14.72 hm³/año (15.78%). Por último, está Álvaro Obregón, que utiliza 12.52 hm³/año, representando el 13.43% de todo este uso. Los demás municipios se encuentran por debajo del 10%. El siguiente uso relevante es el público urbano, con un aprovechamiento total de 48.97 hm³/año en 19 municipios. La ciudad de Morelia utiliza 31.10 hm³/año, que representa 63.52% de este uso en toda la cuenca. En segundo lugar, está Tarímbaro, que aprovecha 7.21 hm³/año, representando 14.72% del uso dentro de la cuenca (Fig. 29).

El uso concesionado para el público urbano es de mayor relevancia, con 1,934.56 hm³/año, representando 62.64% de todos los usos. El municipio más representativo es Morelia, que utiliza 1,913.02 hm³/año, ocupando 98.89% de toda la cuenca. Además, sobresalen por su volumen los municipios de Tarímbaro, con 8.27 hm³/año; Huandacareo

2.68 hm³/año; Indaparapeo 2.29 hm³/año y Álvaro Obregón, con 13.20 hm³/año. En cuanto al uso agrícola tenemos que está representado por 3.28% que representan 101.44 hm³/año, siendo los más representativos los municipios de Tarímbaro con 22.54 hm³/año (22.22%), Santa Ana Maya 14.84 hm³/año (14.63%), Álvaro Obregón 12.88 hm³/año (12.70%) y Zinapécuaro 10.05 hm³/año (10.01%).

Figura 29.- Volumen efectivo y concesionado por municipio Subterráneo



Nota: Volumen efectivo y concesiones otorgadas por Municipio a nivel Subterráneo. Volsb: Volumen efectivo Superficial, VoIREPDA: Volumen concesionado por el REPDA. Se eliminó el volumen público urbano de Morelia y el Uso de las Termoeléctricas para poder visualizar mejor el gráfico, debido a la gran cantidad que representaban. **Fuente:** elaborado a partir de CONAGUA (2024e).

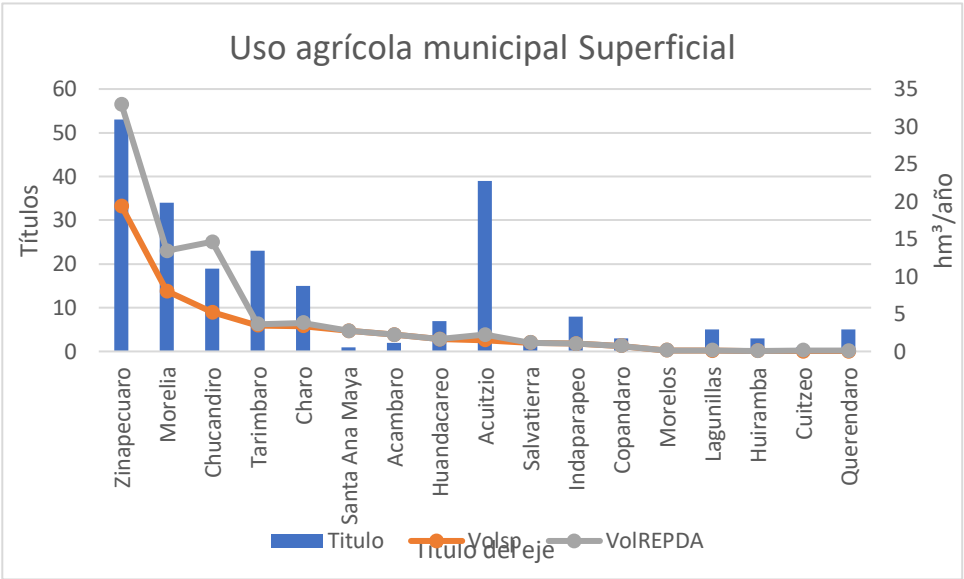
Uso agrícola municipal

Superficial

Los municipios con mayor número de títulos concesionados de aprovechamiento superficial mayores al 10%, se encuentra Zinapécuaro con 53 (23.98%), Acuitzio con 39 (17.65%), Morelia con 34 (15.38%) y Tarímbaro con 23 (10.41%), con un total de 221 títulos concesionados (Fig. 30). En cuanto al volumen efectivo tenemos en primer lugar a Zinapécuaro con 19.39 hm³/año (38.09%), segundo lugar Morelia con 8.03 hm³/año (15.77%) y Chucándiro con 5.22 hm³/año (10.25%), de un total de 50.91 hm³/año en toda la cuenca. En lo que respecta al volumen concesionado, Zinapécuaro es el municipio que mayor volumen tiene con 32.97 hm³/año (40.81%), seguido por Chucándiro con 14.60 hm³/año (18.08%) y Morelia con 13.40 hm³/año (16.59%) de un volumen total concesionado de 80.79 hm³/año. Cabe mencionar que Zinapécuaro y Morelia aparecen en las tres variables, siendo

siempre mayor Zinapécuaro. En lo referente a al volumen Morelia y Chucándiro intercambian posiciones en cuanto a volumen efectivo y concesionado.

Figura 30.- Uso agrícola municipal Superficial



Nota: En gris representa los títulos concesionados, en azul representa el volumen efectivo y en naranja representa el volumen concesionado representado en hm³/año.

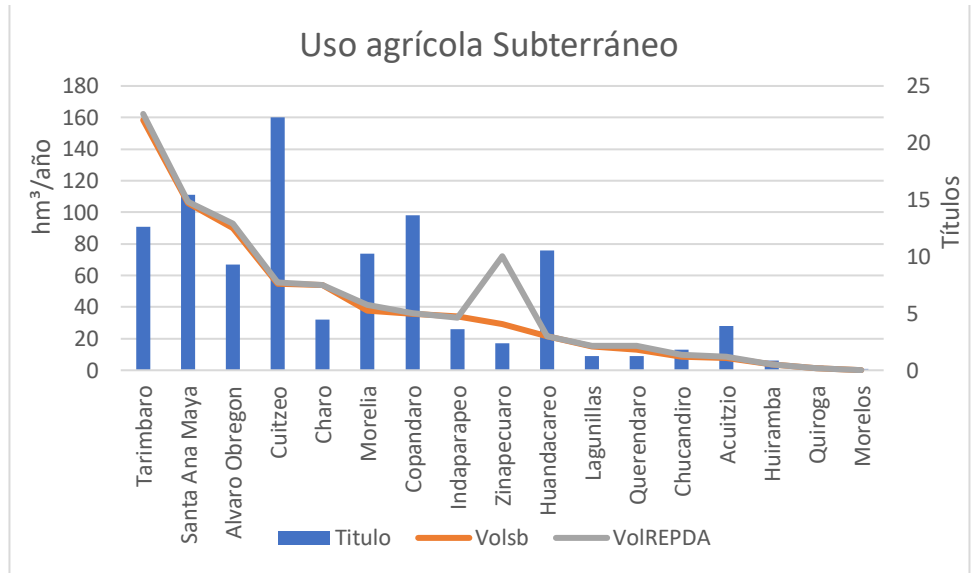
Fuente: elaborado a partir de CONAGUA (2024e).

Subterráneo

Para este tipo de aprovechamiento se cuenta con 17 municipios de los 24 que presenta la cuenca. sin embargo, para el número de títulos concesionados mayores al 10% tenemos que Cuitzeo encabeza la lista con 160 títulos (19.49%), le sigue Santa Ana Maya con 111 (13.25%), Copándaro con 98 (11.94%) y Tarímbaro con 91 (11.08%) de un total de 821 títulos en la cuenca (Fig. 31). En lo que respecta al volumen efectivo, se tiene tres municipios mayores al 10% siendo Tarímbaro el de mayor volumen con 22.00 hm³/año (23.60%), seguido por Santa Ana Maya con 14.72 hm³/año (15.78%) y Álvaro Obregón con 12.52 hm³/año (13.43%) de un volumen total de 93.24 hm³/año. Lo que respecta al uso concesionado se puede ver que son los mismos municipios en el mismo orden los que tienen mayor representatividad siendo Tarímbaro el que presenta mayor cantidad concesionada con 22.54 hm³/año (22.22%), Santa Ana Maya con 14.83 hm³/año (14.63%) y Álvaro Obregón con 12.88 hm³/año (12.70%). Sin embargo, vemos que en algunos municipios existe cierta discrepancia entre el volumen efectivo y el concesionado, siendo

más evidente el caso de Zinapécuaro. a este Municipio se le otorga un volumen efectivo de 4.06 hm³/año, pero se le concede 10.05 hm³/año (2.47 veces más que el volumen efectivo).

Figura 31.- Uso agrícola Municipal Subterráneo



Nota; En gris representa los títulos concesionados, en azul representa el volumen efectivo y en naranja representa el volumen concesionado representado en hm³/año.

Fuente: elaborado a partir de CONAGUA (2024e)

Área y producción de cultivos de en la Cuenca

Para los cultivos de importancia en los municipios se tomaron de la base de datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), de los cuales se tomaron municipios que estuviesen representados en un área mayor al 20%, quedando solo 18 municipios del total que representan la cuenca de Cuitzeo. Para la temporada del 2023. Se registraron 51 cultivos de los cuales se tomaron aquellos que fuesen más representativos (Tabla 5), de los cuales tuvieran un porcentaje mayor al 1%. En cuanto a hectáreas sembradas se tiene al Maíz (66.18%), Aguacate (4.84%), Trigo de grano (4.65%), Avena forrajera (4.36%), Sorgo de grano (2.58%), Ciruela (2.22%), Alfalfa Verde (2.16%), Garbanzo Grano (1.84%), Agave (1.73%), Durazno (1.70%), Frijol (1.02%). En cuanto al volumen de producción en toneladas se tiene que al Zempoalxochitl (manejo) (24.50%), Maíz (19.31%), Alfalfa (14.03%), Nube (7.90%), Mano de León (6.89%), Avena forrajera (4.96%), Aguacate (3.71%), Agave (3.20%), Fresa (1.82%), Trigo (1.74%), Cebolla (1.33%), Nopales (1017%) y Duraznos (1.01%).

Tabla 5.- Cultivos presentes en los municipios de la cuenca de Cuitzeo en el 2023

no	Cultivo	Sembrada	Producción	no	Cultivo	Sembrada	Producción	no	Cultivo	Sembrada	Producción
1	Maíz grano	60310.8	230632.07	18	Guayaba	290	2410	35	Chile verde	55.3	726.35
2	Aguacate	4407.5	44359.97	19	Calabacita	283.5	6486.41	36	Zempoalxochitl (manejo)	54	292609.89
3	Trigo grano	4241.73	20820.31	20	Zanahoria	237	6209.9	37	Brócoli	46	1156.9
4	Avena forrajera en verde	3977.5	59206.79	21	Tomate rojo (jitomate)	219	6625.85	38	Jícama	30.2	1026.8
5	Sorgo grano	2350.4	11333.86	22	Pastos y praderas	211	9424.32	39	Chicharo	28	237.44
6	Ciruela	2025	10408.5	23	Avena forrajera achicalada	200	3230	40	Mano de león	24.5	82351.36
7	Alfalfa verde	1972	167614.34	24	Tomate verde	199.2	3960.7	41	Nube	21	94395.21
8	Garbanzo grano	1673	3486.29	25	Lechuga	170.25	3847.33	42	Ejote	15	243.3
9	Agave	1578	38273.69	26	Elote	159.74	2477.9	43	Semilla de avena grano	15	31.4
10	Durazno	1549	12043.04	27	Haba grano	121.5	161.64	44	Acelga	8	82.48
11	Frijol	926.2	824.2	28	Chile seco	108	113.4	45	Espárrago	8	62
12	Fresa	653	21687	29	Cebada grano	85	516.8	46	Tuna	8	48.41
13	Ebo (janamar go o veza)	625.3	6543.37	30	Col (repollo)	85	2770.15	47	Espinaca	6	86.64
14	Pera	600	6630	31	Pepino	76.5	2560.09	48	Cilantro	3	28.95
15	Cebolla	534.1	15831.02	32	Manzana	69	501	49	Semilla de trigo grano	3	7.98
16	Lenteja	394	555.54	33	Coliflor	68.9	2103.05	50	Trébol	3	237.51
17	Nopalitos	342	14032.62	34	Camote	59.6	1363.08	51	Flor lisianthus	1	2048.55

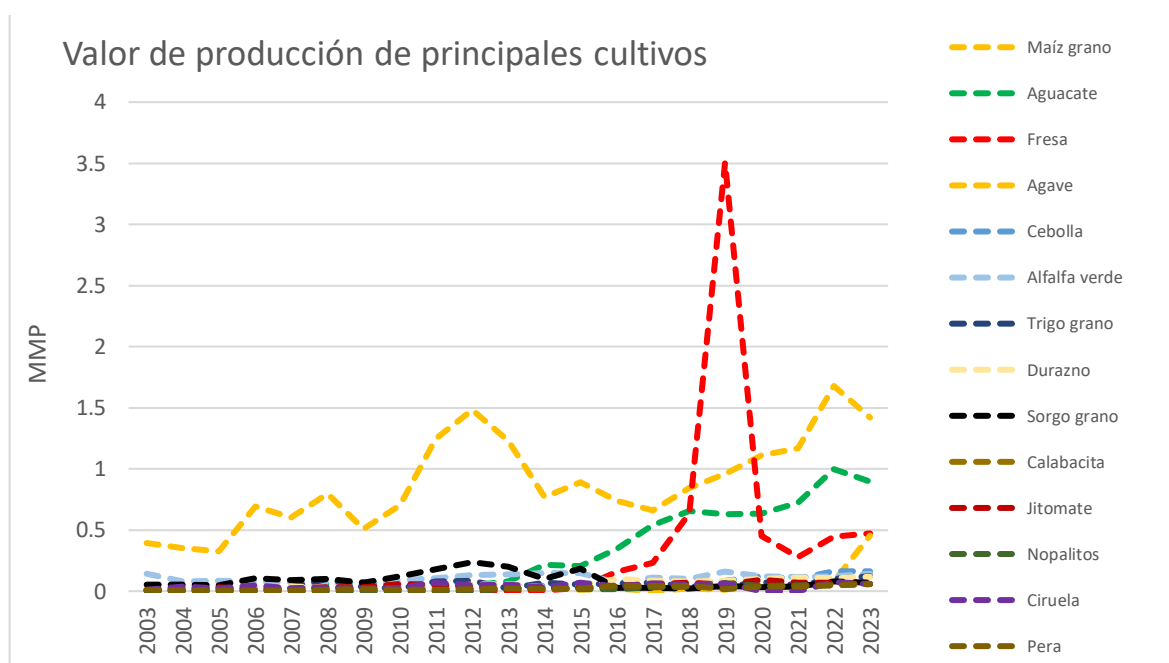
Datos están representados por 18 municipios que tuvieron el 20% del área dentro de la cuenca. Área sembrada está representada en hectáreas y volumen de producción está representado en toneladas. Datos tomados del SIAP para el 2023. **Fuente:** elaborado a partir del SIAP (2023).

Valor de producción de principales cultivos

Los cultivos que mayor remuneración económica tiene en los 18 municipios dentro de la cuenca, son aquellos que se encuentran mayores al 1% del total de lo remunerado desde el 2003 hasta el 2023, siendo 15 cultivos principales (Fig. 32). Dentro de los cuales existen tres cultivos de mayor importancia económica que remuneró en el 2023 más 77.51% del total y son el maíz principalmente con 31.32%, el aguacate con 19.73% y la fresa con 10.44% y el agave con 10.03%. De estos cultivos, la fresa tuvo empezó a fortalecerse en el 2009, hasta tener un incremento en el 2016 y su máximo fue en 2019 y tuvo un descenso

en el 2020, hasta mantenerse en tercer lugar en 2023. El primer lugar lo tiene el maíz con 1.42 mil millones de pesos (mmp), en segundo lugar, el aguacate con 0.89 mmp y el tercer lugar la fresa con 0.47 mmp. El cultivo de agave es un producto que desde el año 2011 fue incrementándose llegando en 2023 a posicionarse en cuarto lugar con 0.45 mmp (1.75%). Los cultivos restantes tienen porcentajes menores al 4%, como la cebolla que obtuvo 0.16 mmp (3.58%), alfalfa 0.14 mmp (3.17%), trigo 0.12 mmp (2.69%), durazno 0.12 mmp (2.59%), sorgo 0.07 mmp (1.50%), calabacita 0.06 mmp (1.33%), jitomate 0.06 mmp (1.29%), nopales 0.06 mmp (1.27%), ciruela 0.06 mmp (1.27%), pera 0.06 mmp (1.25%) y avena 0.05 mmp (1.21%). Los cultivos restantes tienen valores de porcentaje inferiores al 1%, por lo que no fueron analizados dentro de esta gráfica.

Figura 32.- Valor de producción de principales cultivos en la Cuenca de Cuitzeo



Nota; Valor de producción de los principales cultivos, representado en miles de millones de pesos (MMP). Los registros presentes en el SIAP, están presentes desde el 2003 hasta la fecha de corte de 2023. **Fuente:** elaborado a partir del SIAP (2023).

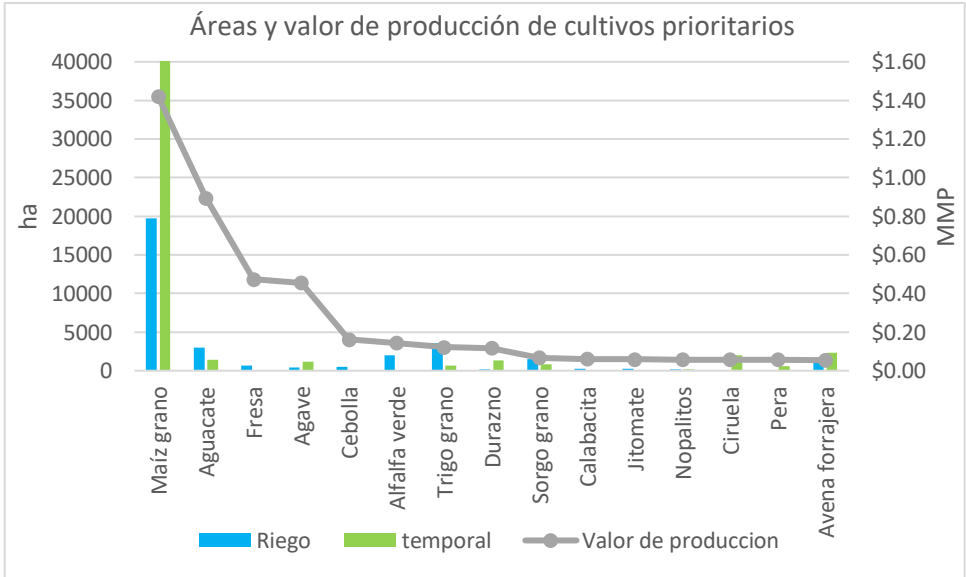
Áreas y valor de producción de cultivos prioritarios

En lo que respecta a las áreas de cultivo de la huella hídrica verde (temporal) y la huella hídrica azul (riego), se puede observar que el maíz presenta el área más grande en estos dos tipos de riego, siendo mayor la de temporal con 40590.1 ha y de riego con 19720.7 ha (Fig. 42). El área de riego mayor es el de trigo con 3534 ha y 707.73 ha de

temporal. El tercer cultivo con mayor superficie de riego es el aguacate con 3019.5 ha y de temporal 13.88 ha. La siguiente es la alfalfa con 1972 ha de riego únicamente. En sexto lugar está la avena con 1679.5 ha de riego y 2298 ha de temporal. El sorgo quedaría en séptimo lugar con 1479.9 ha de riego y 870.5 ha de temporal. Como se puede observar en la figura 33 el área de riego es mayor que la de temporal en la mayoría de los cultivos exceptuando el maíz.

Sin embargo, las hectáreas obtenidas por los principales cultivos se observan que existe una mayor remuneración en el cultivo de maíz, aunque su área es mayor, pero hay cultivos como el aguacate, fresa y agave que su área es menor pero su remuneración es muy alta.

Figura 33.- Áreas y valor de producción de principales cultivos por riego



Nota: Áreas y Valor de producción de los principales cultivos, representado en miles de millones de pesos (MMP) y en hectáreas (ha). Los registros hechos fueron tomados del 2023. **Fuente:** elaborado a partir del SIAP (2023).

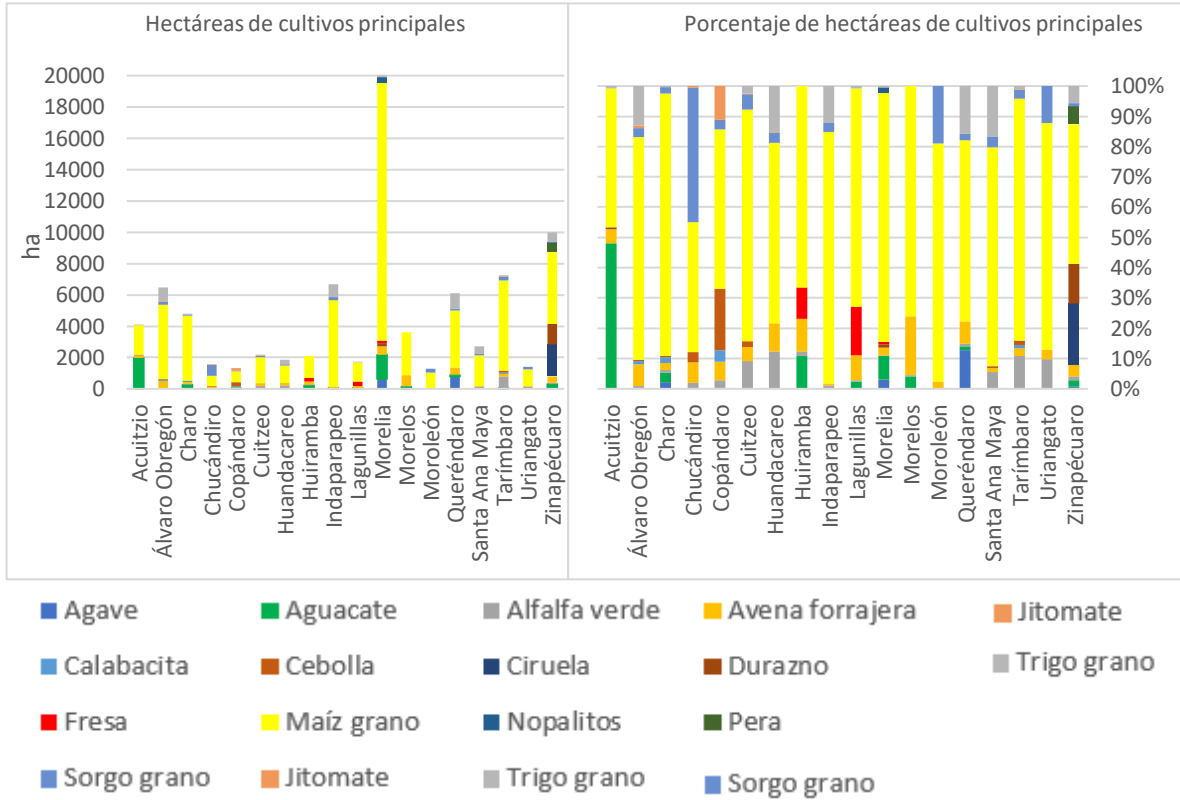
Porcentaje de hectáreas de cultivos principales

En cuanto a las áreas de los cultivos principales se tiene que Morelia es el municipio con mayor extensión de toda la cuenca, atribuible a la superficie propia de este (Figura 34). El principal cultivo en Morelia es el maíz ocupando 16,453 Ha (82.22%), seguido del aguacate 1,564 Ha (7.82), agave con 610 Ha (3.05%), avena con 505 Ha (2.52%) y nopales

con 342 Ha (1.71%), y cultivos inferiores al 1% tenemos la alfalfa y el sorgo en una extensión de cultivo de 20,011 Ha (Fig. 43).

El segundo municipio con mayor extensión es Zinapécuaro con 9,994 ha, del cual el maíz es el principal cultivo con 4,593 ha (45.96%), seguido por la ciruela con 2,025 ha (20.26%) y durazno con 1,308 ha (13.09%). Los cultivos menores al 10% tenemos a la pera con 600 ha (6.00%), el trigo con 575 ha (5.75%), la avena con 395 ha (3.95%), el aguacate con 225 ha (2.25%), alfalfa con 112 ha (1.12%) y el agave con 65 ha (0.62%).

Figura 34.- Áreas y porcentaje de los principales cultivos por municipio



Nota: Áreas y porcentaje de los principales cultivos por municipio, representado en hectáreas (ha) y porcentaje (%). Los registros hechos fueron tomados del 2023. **Fuente:** elaborado a partir del SIAP (2023).

En tercer lugar, se tiene a Tarímbaro con un área de cultivo de 7,241.1 ha, teniendo como principal cultivo al maíz con 5,777 ha (79.78%) y como segundo la alfalfa con 790 ha (10.91%), seguido del sorgo 215 ha (2.97%), avena 177.77 (2.45), cebolla con 11.2 ha (1.55%), trigo con 80 ha (1.10%) y calabacita con 78 ha (1.08%). Cultivos inferiores al 1% está el aguacate y jitomate.

En cuarto lugar, esta Indaparapeo, con una extensión de 6,679.8 ha, donde el maíz es el principal cultivo con 5,551 ha (83.10%) y segundo lugar está el trigo con 820 ha (12.28%), seguido por el sorgo con 186.5 ha (2.79). cultivos inferiores al 1% se encuentra la alfalfa, avena, agave y aguacate.

En quinto lugar, se tiene a Álvaro obregón con una extensión de 6,465.4 ha donde sus principales cultivos son el maíz con 4,754.4 ha (73.54%) y el trigo 850 ha (13.15%). Queréndaro presenta una extensión de 6,113.9 ha donde tiene dos principales cultivos que es el maíz con 3,658 ha (59.83%) y el agave con 782 ha (12.79%). Charo tiene una extensión de 4,780 ha donde su cultivo principal es el maíz con 4,145 ha (86.72%). Acuitzio presenta tres cultivos en un área de 4,080 ha, donde el maíz tiene 1,875 ha (45.96%), seguido de aguacate con 1959 ha (48.01%) y avena con 195 ha (4.78%). Morelos tiene una extensión de 1,270 ha donde sus principales cultivos son el maíz con 2,747 ha (76.14%) y avena con 645 ha (19.26%). Santa Ana Maya tiene dos principales cultivos en un área de 2,705.7 ha, donde el maíz tiene 1,960 ha (72.46%) y el trigo tiene 450 ha (16.63%). Cuitzeo tiene un principal cultivo el cual tiene un área de 2,175.5 ha siendo el maíz con 1,663 ha (76.44%). Huiramba tiene cuatro principales cultivos en una extensión de 2,100 ha, donde el maíz es el principal cultivo con 1,398 ha (66.57%), seguido de aguacate con 228 ha (10.86%), avena con 226 ha (10.76%) y fresa con 1215 ha (10.24%). Huandacareo con un área de 1,850.3 ha tiene tres cultivos de importancia donde el maíz tiene 1,102.6 ha (59.59%), trigo con 280 ha (15.13%) y alfalfa con 230 ha (12.43%). En Lagunillas sobresalen dos cultivos principales: de un total de 1,703.73 ha, el maíz ocupa 1,228 ha (72.08%), mientras que la fresa abarca 273 ha (16.02%) de esa superficie. Chucándiro tiene el sorgo con 685 ha (44.54%) y el maíz con (657 ha (42.75%), en una extensión de 1,538 ha. Uriangato con un área de 1,422 ha sus principales cultivos son el maíz con 1,062 ha (74.68%) y el sorgo con 175 ha (12.31%). Copándaro tiene tres cultivos de mayor relevancia con 1,305 ha el maíz tiene 685.8 ha (52.55%), la cebolla con 266 ha (20.38%) y el jitomate con 145.8 ha (11.17%). Por último, tenemos a Moroleón con 1,270 ha donde el maíz tiene 1,000 ha (78.74%) y el sorgo con 240 ha (18.90%).

Discusión

La tendencia que tiene las concesiones hídricas durante los periodos 2020-2023, puede deberse a una respuesta a las presiones sobre el agua a nivel regional y de políticas gubernamentales orientadas a sus múltiples usos. También, este incremento puede deberse a estrategias de Gestión Integrada de Recursos Hídricos impulsada por CONAGUA y el Gobierno Federal (DOF, 2020c, 2023c). Sin embargo, en un inicio las principales concesiones fueron escasas debido a la complejidad de los trámites en un principio, donde inicialmente eran otorgados por mandatos presidenciales hasta la creación de CONAGUA, que facilitó la obtención de los títulos concesionados de agua (Gómez-Arias y Moctezuma, 2020). La cuenca de Cuitzeo, integrada al sistema Lerma-Chapala enfrenta estrés hídrico crónico (Amador et al., 2011; Gómez, 2013), evidenciado por los registros federales 2020 y 2023 (DOF, 2020a, 2020b, 2023a, 2023b). Tales carencias podrían tener su origen en la entrega de permisos de aprovechamiento que toman en cuenta fluctuaciones anuales de los caudales, dado que la cantidad de recurso disponible solo se revisa cada tres años. Por ello, el otorgamiento de títulos superficiales requiere de criterios de sustentabilidad más rigurosos, especialmente en cuencas que presentan déficit hídrico superficial y subterráneo. Si bien estas restricciones pueden dificultar la satisfacción de la demanda hídrica, la cual constituyen una medida necesaria para evitar la sobreasignación del recurso y garantizar su disposición a largo plazo.

Existe una predominancia en el número de títulos concesionados de agua donde se otorgan en su mayoría a la agricultura y ganadería como se menciona a nivel nacional, siendo la actividad principal dentro de la cuenca y en segundo lugar se le otorga al uso público urbano, por lo tanto son los más importantes de la cuenca de Cuitzeo. (IMCO, 2025; INEGI, 2025b). Los factores como la variabilidad climática (fenómeno de El Niño/La Niña) inciden directamente en la dinámica del agua (Bolaños y Betancur, 2018), pero la gestión humana sigue siendo determinante, causando la sobreexplotación y reduciendo la recarga de los mantos acuíferos agravando el déficit hídrico (DOF, 2020a, 2020b, 2023a, 2023b).

En cuanto a la estructura institucional, revela una concentración de competencias: la Dirección Local Michoacán gestionó entre 562 y 1379 títulos en 2023, reflejando la descentralización operativa de CONAGUA (DOF, 1992, 2015). Paralelamente, la categoría "Sin Registro" disminuyó, sugiriendo mejoras en sistematización administrativa (CONAGUA, 2025c). Esta optimización, sin embargo, no resuelve disparidades sectoriales. El análisis SCIAN (2023) expone que las Personas Físicas (PF) poseen la mayoría de títulos

superficiales, especialmente en usos agroindustriales (PF/Agroind) y múltiples (PF/DUM), mientras que sectores como generación eléctrica (GEE/SAGN) y agricultura industrial (Agri) consumen volúmenes desproporcionados con pocos títulos (Gómez-Arias y Moctezuma, 2020). La brecha entre volúmenes concesionados y efectivos indica sobreconcesión o subutilización, un fenómeno crítico en cuencas bajo presión hídrica (OCDE, 2013; Pacheco-Treviño y Manzano-Camarillo, 2024). En el ámbito subterráneo, aunque los volúmenes concesionados y efectivos se registran iguales por deficiencias metodológicas, esto oculta extracciones no cuantificadas que profundizan el déficit.

El análisis a escala municipal revela que Morelia concentra más títulos y volúmenes debido a su infraestructura, posición y tamaño en la cuenca (Carlón et al., 2009; Mendoza et al., 2002). Dicha concentración de decisiones provoca desajustes cuando se da preferencia al suministro para fines urbanos por encima del destinado a la agricultura, a pesar de que esta última representa la actividad económica fundamental y de mayor relevancia en la zona. Estas discrepancias entre el agua concesionada y la efectiva pueden persistir por la variabilidad climática, los retornos hídricos y transvases (Pacheco-Vega, 2020), siendo agravadas por los marcos legales rígidos que no incorporan ajustes ante la escasez (OCDE, 2013). No obstante, en los acuíferos, la explotación intensiva tanto en áreas urbanas como agrícolas replica esquemas de sobreexplotación ya registrados en el centro del país (Díaz et al., 2013; Pacheco-Treviño y Manzano-Camarillo, 2024), donde falta monitoreo preciso lo cual impide gestionar el recurso sustentablemente (Pacheco-Vega, 2020).

Aunque, la actividad primaria en la cuenca de Cuitzeo es la agricultura, se aprecia una distribución sesgada del uso agrícola. Solo unos pocos municipios acumulan la mayoría de títulos concesionados, especialmente en el régimen subterráneo, donde los picos volumétricos son mayores que el superficial. Por otra parte, aunque existe ciertas correspondencias entre el volumen concesionado y el efectivo (Debido a que en muchas ocasiones no se tiene el dato efectivo y en su lugar colocan el dato concesionado), en el nivel subterráneo se observan más las diferencias entre volúmenes sobre todo en algunos municipios. Sin embargo, existen más municipios con altas concesiones lo que evidencian usos inferiores, lo que podría indicar subutilización, retrasos en actualización de registros, o prácticas no reportadas (similares a estudios de sobreexplotación de acuíferos en zonas agrícolas del país) (Ochoa-Noriega et al., 2020; Pacheco-Treviño y Manzano-Camarillo, 2024; Scott, 2011).

En cuanto a producción agrícola en el 2023, el maíz está siendo sembrado en toda la cuenca en una gran cantidad de hectáreas. No obstante, son los cultivos perennes de alto valor comercial como son el aguacate y la fresa, los que aportan la mayor rentabilidad económica por hectárea cultivada. La alta densidad de títulos para personas físicas en usos agrícolas (PF/Agroind) y múltiples (PF/DUM), puede estar relacionados con estos tipos de cultivos que demandan alto riego constante. Aunque este esquema podría ser redituable en el corto plazo, desde el punto de vista hidrológico es inviable en la cuenca que enfrenta escasez de agua y cuyos acuíferos se encuentran en condiciones de sobre explotación, tal como ha sido documentado (DOF, 2023a, 2023b).

Como se ilustra en las figuras los cultivos de alto valor (Aguacate y fresa) dependen en su mayoría del agua de riego, cosa contraria de los granos básicos que tienen una combinación de riego y temporal, siendo estos más sustentables. Lo anterior demuestra la dependencia hídrica subterránea principalmente, para sostener la rentabilidad económica, creando una sobreexplotación de los acuíferos para mantener la productividad de los cultivos de alto valor comprometiendo la sostenibilidad hídrica de todos los usos. Por consiguiente, incluye el abastecimiento público urbano, del cual está en riesgo el derecho humano y universal del acceso al agua segura, asequible y aceptable para todas sus necesidades incluyendo el saneamiento, reconocido por la ONU dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2025).

Esta situación ya ha sido contemplada en trabajos como Fuerte-Velázquez (2022), el cual alerta del consumo excesivo de agua mediante la huella hídrica del aguacate y fresa dentro de la cuenca, mencionando que explotan los recursos naturales y causa vulnerabilidad hídrica, por el alto consumo del agua azul, que puede ocasionar fractura en los distintos ecosistemas por este tipo de agricultura. También, trabajos recientes se explica que en las últimas décadas los cultivos han ido ganando terreno dentro de la cuenca expandiéndose principalmente las huertas y los cultivos protegidos, pero entre los más representativos sigue siendo el maíz y el aguacate (Pimienta-Ramírez, 2024; Pimienta-Ramírez et al., 2025). Esto representa un problema en la cuenca de Cuitzeo, ya que, si los cultivos de alto consumo hídrico se van expandiendo y están ocupando menos espacio, pero requiere más cantidad de agua (como se ven en las gráficas) pueden provocar problemas en lo social, en lo económico, en lo ecológico si no son reguladas mediante gestiones hídricas y políticas públicas.

Conclusiones

La gestión hídrica en Cuitzeo presenta muchos problemas en cuanto a los títulos de concesiones hídricas tanto superficiales y subterráneas, uno de los problemas son las inconsistencias en el registro, las cuales subestiman las extracciones reales y subestiman la disponibilidad, sin tomar en cuenta los eventos naturales, sociales y climáticos. Se requieren políticas públicas que se adapten y alineen a las concesiones con la disponibilidad real. También, deben de promover tecnologías nuevas en cuanto a eficiencia hídrica y que fortalezcan el monitoreo integrado tanto superficial como subterráneo. Por otro lado, también es importante monitorear aquellos titulares que tienen pocos títulos concesionarios con un gasto mayor al igual que las personas físicas que tienen muchos títulos, pero bajo consumo. Por lo tanto, si no se realizan ajustes en cuanto a la presión antrópica y al cambio climático perpetuarán en un futuro próximo conflictos en la distribución hídrica y a la degradación ecosistémica como lo vemos actualmente en el lago de Cuitzeo.

La promoción de cultivos de alto valor económico sin una planificación en la cual integre la disponibilidad efectiva y renovable del agua, pudo haber generado la sobreexplotación de los mantos acuíferos y superficiales que llevaron al déficit hídrico. Es necesario promover nuevas técnicas de riego o en su defecto la reconversión hacia los cultivos menos demandantes, pero es necesario tener volúmenes reales que tiene la cuenca a nivel superficial y subterráneo para así asignarles la cantidad efectiva y que este sea cada año y no esperar a tenerlo cada tres años.

Recomendaciones

Es fundamental CONAGUA le dé prioridad a la revisión de sus datos georreferenciados en cuanto al aprovechamiento del agua (superficial y subterránea) y se encuentren en las coordenadas en las que pertenecen. Además, los datos asociados al Registro Público de Derechos del Agua (REPDa) presenta demasiados errores tanto de posición geográfica, ortografía, valores, clave de titular, entre otras y en ocasiones no corresponden con la base de datos georreferenciadas. También, se requiere que los datos como echa de emisión, tipo de uso, volumen utilizado, gasto máximo, clasificación SCIAN y fecha de corte deberían estar completos y actualizados, ya que en muchos de los casos se encuentran vacíos.

Una mejora crítica es medir el volumen realmente consumido cada año, evitando que se rellene automáticamente con el volumen concesionado, práctica que genera incertidumbre sobre el consumo real. Asimismo, debe existir coherencia entre el número de título georreferenciado y el registrado en el REPDa (plataforma oficial de concesiones de agua), pues frecuentemente difieren los códigos, obligando a búsquedas manuales o interpretación de códigos por el usuario.

Por otro lado, se identifican usos del agua no contemplados en la Ley de Aguas Nacionales (LAN), como los usos múltiples u otros los cuales requieren ser incorporados y claramente definidos. También se exige reducir los plazos para la actualización de los datos, ya que actualmente pueden tardar hasta tres años y aun así contener errores.

Este enfoque permitiría contar con información confiable, actualizada y geoespacialmente consistente, siendo esto base de cualquier sistema de monitoreo hídrico y agrícola.

CAPITULO II

Ajuste porcentual de datos climáticos satelitales para completar series incompletas en estaciones locales

Resumen

Los datos climáticos son necesarios para realizar modelos en muchos campos de la investigación como la ingeniería, la climatología, ecología y la gestión de recursos hídricos. Para su obtención de datos se requiere de estaciones meteorológicas, sensores satelitales y modelos de procesamiento, cada uno con sus metodologías particulares de recolección de datos y tratamiento para evitar errores, sesgos e incertidumbres. Sin embargo, actualmente en todo el mundo se enfrentan desafíos, debido a la escasez de estaciones en zonas remotas, obsolescencia tecnológica, discontinuidad de registros y problemas operativos. Estudios recientes, revelan que existe discrepancias entre las diversas bases de datos climáticos sobre todo en precipitación pluvial, pero también en otras variables. Por ello, se hipotetiza que, si los datos de sensores climáticos como NASA POWER se mantiene constante en el tiempo, se podría predecir por medio de diferencia porcentual los datos faltantes de CONAGUA o por regresión lineal para el 2023. Se pudo observar que existen muchas diferencias entre los valores de las estaciones. En cuanto a las variables, la precipitación presenta el mayor porcentaje de diferencia de error entre ambos modelos. La precipitación tuvo un comportamiento errático en cuanto a el Error absoluto medio (MAE) y la raíz media del error cuadrático (RMSE) en los modelos del 2020 y 2023, pero el porcentaje media de error absoluto (MAPE) fue menor en diferencia porcentual. En lo que respecta a la temperatura, los valores de MAE y RMSE son altos en diferencia porcentual y en MAPE solo significativamente alto en 2023 y solamente 0.01% de diferencia en 2020. Por lo que se concluye que los modelos podrían ser mejor la regresión ya que presenta menos error cuadrático en cuanto a los datos. Podría en un futuro realizarse un procedimiento distinto que contemple a ambos modelos o incluyendo inteligencia artificial y poder estandarizar las diferentes fuentes de datos de CONAGUA, para mejorar la calidad de sus datos climáticos.

Palabras clave: Diferencia porcentual, Regresión, MAPE, NASA POWER, CONAGUA.

CHAPTER II

Percentage Adjustment of Satellite Climate Data to Complete Incomplete Series at Local Stations

Abstract

Climate data are necessary for developing models in many fields of research, such as engineering, climatology, ecology, and water resource management. Acquiring these data requires meteorological stations, satellite sensors, and processing models, each with its own specific methodologies for data collection and processing to avoid errors, biases, and uncertainties. However, numerous challenges are currently faced worldwide due to a scarcity of stations in remote areas, technological obsolescence, data record discontinuities, and operational issues. Recent studies reveal discrepancies among various climate databases, particularly in rainfall precipitation but also in other variables. Therefore, it is hypothesized that if data from climate sensors, such as NASA POWER, remain consistent over time, the missing data from CONAGUA for 2023 could be predicted using percentage difference or linear regression. It was observed that significant differences exist between the values recorded by the stations. Regarding the variables, precipitation showed the highest percentage of error difference between the two models. Precipitation exhibited an erratic behavior in terms of Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) in the 2020 and 2023 models; however, the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) was lower for the percentage difference method. Concerning temperature, the MAE and RMSE values were high for the percentage difference method. The MAPE was only significantly high in 2023, with a mere 0.01% difference in 2020. It is thus concluded that the regression model could be superior as it presents a lower quadratic error for the data. In the future, a different procedure could be implemented that incorporates both models or includes artificial intelligence to standardize the different CONAGUA data sources and improve the quality of its climate data.

Keywords: Percentage Difference, Regression, MAPE, NASA POWER, CONAGUA.

Introducción

Los registros meteorológicos representan un pilar fundamental para la simulación de diversos fenómenos en áreas como la ingeniería, la biología, la ecología, la bioquímica, la gestión de recursos hídricos, la agricultura, la climatología y las ciencias atmosféricas (Fick y Hijmans, 2017; Karger et al., 2017). Para estos fines, se requiere información proveniente principalmente de estaciones meteorológicas, sensores satelitales o modelos climáticos ya procesados. Cada una de estas fuentes se distingue por los métodos utilizados para la recolección, procesamiento y depuración de los datos, lo que puede introducir incertidumbre, sesgos y errores en los resultados. Por esta razón, es fundamental conocer las limitaciones de cada fuente, así como realizar procesos de comparación y validación entre ellas.

Actualmente, la información meteorológica o hidrológica de varias fuentes climáticas, enfrentan desafíos en cuanto a la recopilación, procesamiento y difusión. La carencia de datos limita la capacidad para realizar proyecciones confiables, gestionar riesgos hidrometeorológicos y diseñar estrategias de adaptación (Valencia-Gonzalez et al., 2022; Villanueva et al., 2010). Entre las principales causas de esta insuficiencia se encuentra la falta de estaciones meteorológicas en regiones remotas, negligencias operativas, sustitución del operador, la obsolescencia tecnológica y la discontinuidad de los registros históricos (ASF, 2025; DOF, 2020c; Valencia-Gonzalez et al., 2022). Para resarcir este problema se ha optado por el uso de tecnologías satelitales, algoritmos para modelos climáticos y modernizar la tecnología de captura, así como colaboraciones entre instituciones académicas, organismos internacionales y sectores gubernamentales (IPCC, 2023). La falta de datos climáticos confiables pueden afectar la planificación agrícola, la gestión hídrica y la respuesta temprana a eventos extremos como inundaciones y sequías (Valencia-Gonzalez et al., 2022).

Estudios recientes, han evidenciado diferencias significativas entre fuentes climáticas al comparar variables como la temperatura y la precipitación en distintas regiones (Bobrowski et al., 2021). La cuantificación de estas discrepancias mediante indicadores porcentuales se ha convertido en una herramienta clave para evaluar la confiabilidad de los modelos climáticos utilizados en diversas aplicaciones. Hoy en día, se cuenta con numerosas plataformas de información meteorológica de libre acceso, las cuales utilizan diversos métodos de interpolación y ajuste de datos. Por ejemplo, WorldClim utiliza interpolaciones basadas en estaciones meteorológicas terrestres y parámetros satelitales;

CHELSEA (Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas) incorpora algoritmos estadísticos corregidos por efectos topográficos, integrando datos del GPCC (Global Precipitation Climatology Centre); mientras que NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources) combina observaciones satelitales, datos de estaciones terrestres y productos de reanálisis, para generar información climática a escala global (Fick y Hijmans, 2017; Karger et al., 2017; Marínez et al., 2023; NASA, 2025). Aunque todas estas plataformas buscan reducir los sesgos mediante procedimientos estadísticos complejos, los resultados pueden variar considerablemente en función de factores como la escala espacial y temporal, el número de estaciones utilizadas, el tipo de interpolación aplicada y las variables consideradas. Por lo tanto, la selección de una fuente climática adecuada debe basarse en las características específicas del estudio a realizar (Bobrowski et al., 2021; Fick y Hijmans, 2017; Karger et al., 2017; Marínez et al., 2023; Rincón-Gutiérrez et al., 2024).

Las diferencias entre fuentes climáticas han sido ampliamente documentadas. Por ejemplo, Fierke et al. (2024) compararon datos de temperatura y precipitación entre CHELSA y WorldClim en la cuenca del río Puelo, al norte de la Patagonia. Sus resultados indican que la temperatura mostró una alta consistencia entre ambas fuentes, mientras que la precipitación presentó discrepancias significativas, especialmente en zonas montañosas, donde es necesario considerar factores geográficos y meteorológicos adicionales.

De forma similar, Rincón-Gutiérrez et al. (2024) analizaron siete fuentes digitales de información climática en México, enfocándose particularmente en la variable de precipitación. Sus hallazgos coinciden con los de Fierke et al. (2024), subrayando las dificultades actuales para modelar con precisión la precipitación. También resaltan la importancia de transparentar los métodos de generación de datos climáticos y fomentar la comparación entre fuentes para identificar enfoques más eficaces y áreas susceptibles de mejora.

En otro estudio, Pena-Arancibia y Ahmad (2020) utilizaron sensores remotos para estimar y comparar series temporales de evapotranspiración (ETa) en la cuenca del río Indo, en Pakistán, mediante dos algoritmos distintos. Aunque reconocen que estas herramientas resultan robustas y escalables en plataformas como Google Earth Engine, advierten que su aplicación debe realizarse con precaución, debido a los posibles sesgos inherentes a cada metodología.

Estas diferencias comparativas permiten identificar la fuente más adecuada para una región o escala y contribuye a reducir la incertidumbre y aumentar la robustez de los resultados, para poder aplicarlos correctamente en los estudios que realicemos.

Justificación

La disponibilidad de datos climáticos confiables es esencial para el desarrollo de estudios hidrológicos, agrícolas y ambientales. Sin embargo, la cobertura temporal de las estaciones meteorológicas locales, como las de CONAGUA, es frecuente que este incompleta, lo que representa una limitación importante para la investigación científica. Ante esta situación, el uso de bases de datos satelitales como NASA POWER se vuelve una alternativa viable, aunque con diferencias respecto a los datos observados localmente.

Con base en lo anterior, en este estudio se empleó un procedimiento accesible y replicable para calcular los valores ausentes, aplicando un ajuste porcentual a los registros de NASA POWER, tomando como referencia un año base en el que ambas fuentes de información convergen. De comprobarse su validez, este método permitiría fortalecer el análisis climático en zonas con escasa cobertura de estaciones, mejorando la precisión de estudios sobre disponibilidad hídrica, productividad agrícola y cambio climático. Otra opción viable es realizar una regresión lineal a los datos climáticos que se tiene para poder calcular el clima en años que no estén presentes en la base de datos de CONAGUA.

Pregunta

¿Es posible estimar los datos climáticos faltantes del año 2023 en las estaciones climáticas de CONAGUA, utilizando las diferencias porcentuales o por regresión lineal observadas en el 2017 entre los registros de NASA POWER y las estaciones meteorológicas de CONAGUA?

Hipótesis

A manera de hipótesis se menciona que la diferencia porcentual registrada entre los datos climáticos de NASA POWER y las estaciones meteorológicas de CONAGUA se mantienen relativamente constantes en el tiempo, por lo que puede utilizarse para ajustar los valores de NASA POWER en la temporalidad del 2020 y 2023, o podrían ser completadas por medio de regresión lineal y estimar de manera confiable los datos faltantes de CONAGUA en ese año.

Objetivo General

Evidenciar que los datos climáticos faltantes del año 2020 y 2023 en estaciones de CONAGUA se pueden obtener y complementar mediante la corrección de los valores de NASA POWER, utilizando como base la diferencia porcentual y regresión lineal observada en el año 2017.

Objetivos específicos

1. Calcular las diferencias porcentuales entre los registros climáticos de NASA POWER y CONAGUA para el año 2017
2. Aplicar dichas diferencias porcentuales a los datos de NASA POWER del año 2023 y regresión lineal para datos faltantes de CONAGUA y generar una estimación ajustada
3. Evaluar la validez y consistencia del método mediante la comparación con estaciones que si tienen datos completos o con valores esperados según promedios históricos.
4. Establecer un promedio reproducible que permita la estimación de datos climáticos faltantes cuando no se dispone de registros locales.

Metodología

En este estudio se emplearon datos climatológicos correspondientes al año 2017, obtenidos de estaciones ubicadas dentro de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, así como de aquellas localizadas en un radio de 20 km fuera de su perímetro (Fig. 35), con el objetivo de minimizar errores en futuros procesos de interpolación espacial. A partir de la plataforma de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2025a), se identificaron 46 estaciones climatológicas operativas; de las cuales, se descartaron 14 debido a la presencia de registros incompletos o series temporales insuficientes. se identificaron 46 estaciones climatológicas operativas. De estas, se descartaron 14 debido a la presencia de registros incompletos o series temporales insuficientes.

De las 34 estaciones restantes, únicamente 9 contaban con datos correspondientes al año 2023, mientras que las otras 23 presentaban registros dispersos en el tiempo, coincidiendo únicamente en el año 2017. Por tanto, se seleccionó este año como base de comparación para ajustar las variables climatológicas utilizando los datos proporcionados por la plataforma NASA POWER (NASA, 2025).

Figura 35.- Estaciones presentes dentro de la cuenca de Cuitzeo



En verde se muestran las estaciones utilizadas y la X roja son estaciones eliminadas.

Fuente: elaboración propia realizado a partir de datos de CONAGUA (2025a) e INEGI (2026)

Se consideraron seis variables climatológicas: temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, humedad relativa y velocidad del viento. NASA POWER proporcionó los datos de humedad relativa y velocidad del viento, ya que estas variables no contaban con equivalentes confiables en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (CONAGUA, 2025b). Debido a la ausencia de un referente local, estas variables fueron incorporadas directamente sin ajuste.

Para las demás variables (temperaturas y precipitación), se calculó el sesgo porcentual entre los registros de CONAGUA y NASA POWER para el año 2017, utilizando la siguiente fórmula:

Fórmula 1:

$$\Delta_{\%2017} = \frac{SMN_{2017} - NASA_{2017}}{NASA_{2017}} \times 100$$

En los casos donde el sesgo absoluto superó el 100% en algún mes, se conservaron los valores de NASA POWER. Si esta condición se presentó en más del 25 % del total de registros anuales (equivalente a tres o más meses), la estación fue descartada por considerarse inconsistente.

Con base en las estaciones válidas resultantes, se estimaron los valores ajustados para el año 2020 y 2023 a partir de los datos de NASA POWER, utilizando la siguiente expresión:

Fórmula 2:

$$\hat{X}_{2023} = X_{NASA,2023} \times \left(1 + \frac{\Delta_{\%2017}}{100}\right)$$

donde $\hat{X}_{2023}$ representa el valor ajustado que aproxima las condiciones observadas por el SMN. En el caso de la precipitación, se empleó el total acumulado anual; mientras que, para las temperaturas, la humedad relativa y el viento, se obtuvieron valores medios por cada mes.

Para llevar a cabo el estudio comparativo, se eligieron 16 estaciones cuyo porcentaje de datos ausentes no superara el 25%, a las cuales se sumaron aquellas que contaban con registros correspondientes al año 2023. Se tomó como periodo de referencia

el 2007, mientras que el 2017 se estableció como el año para el cual se realizarían las estimaciones. Luego, se compararon los valores mensuales de precipitación y temperatura del 2007 proporcionados por NASA POWER con los datos de cada estación y mediante la fórmula 1, se determinó la diferencia porcentual entre ambas. Tras obtener las estimaciones, se colocaron los valores del 2017 de NASA POWER y posteriormente se colocó la fórmula 2 para ajustar la diferencia porcentual. Finalmente, se compararon los resultados proyectados con los datos reales del 2017, para obtener los valores de la diferencia porcentual. El método Porcentual fue comparado con el método de regresión lineal, de cual se completaron las series históricas de 1977 a 2007 rellenando datos faltantes con la media y esta se ajustó para proyectar los valores del 2017. Las comparaciones entre estos métodos se realizaron mediante error absoluto, el error cuadrático y derivar las métricas de desempeño predictivo: Error Absoluto Medio (MAE), el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE y la Raíz del Error Cuadrado Medio (RMSE).

Todos los valores climatológicos —incluyendo los proporcionados directamente por NASA POWER (humedad relativa y velocidad del viento)— fueron organizados en tablas únicas por variable y por estación. Este conjunto de datos climatológicos constituirá la base de un sistema de información geoespacial que será empleado en un capítulo posterior para realizar interpolaciones espaciales, elaborando capas raster mensuales para cada variable junto con sus estadísticos correspondientes (totales o promedios), lo cual facilitará la realización de estudios comparativos y la estimación de cambios relativos porcentuales a través del tiempo.

Sin embargo, solo se tomarán los datos de temperatura media y precipitación para realizar las comparaciones debido a que las otras variables como humedad relativa y velocidad del viento no existen en la base de datos de CONAGUA.

Resultados

Selección de datos para análisis de comparación

Los resultados mostrados en la tabla 6 corresponden a las 34 estaciones presentes dentro de la cuenca y que presentaban valores para el año 2017, de los cuales se clasificaron en tres grupos para conocer cuales tienen menos errores y poderlos usar para realizar el análisis.

Tabla 6.- Tabla de selección de estaciones para análisis.

No	100%	>100%	E. T.	Estación	Nombre	No	100%	>100%	E. T.	Estación	Nombre
1	0	0	0	11010	Cerano	18			2023	16096	Presa Malpaís
2	4	0	4	11047	Moroleón	19	2	0	2	16104	Puruándiro
3	2	0	2	11060	Salvatierra	20	0	0	0	16105	Quirio
4	3	0	3	11076	Presa Solís	21	2	5	7	16109	San Diego Curupatzco
5	5	0	5	11156	El Dormido	22	2	2	4	16114	San Miguel Del Monte
6	2	2	4	11158	Piñicuaró	23	3	2	5	16118	Santa Fe
7	3	1	4	16016	Carrillo Puerto	24	3	2	5	16119	Santa Rita
8			2023	16022	Cointzio	25			2023	16136	Tzitzio
9	4	1	5	16027	Cuitzeo	26			2023	16145	Zinapécuaro
10			2023	16045	El Temazcal	27	4	1	5	16146	Zirahuén
11	2	1	3	16050	Huaniqueo	28	1	3	4	16199	San Miguel Curinhuato
12	3	0	3	16052	Huingo	29	0	6	6	16234	Galeana
13	2	2	4	16055	Jesús Del Monte	30	4	2	6	16235	Huajúmbaro
14	2	3	5	16080	Morelia (OBS)	31			2023	16241	Tafetán
15			2023	16081	Morelia	32	3	8	11	16250	Huandacareo
16	4	1	5	16087	Pátzcuaro	33	3	2	5	16255	Ucareo
17			2023	16091	Álvaro Obregón (DGE)	34	2	1	3	16512	El Colegio

No= Numero, 100%= valores que presentan el 100%, >100%= valores mayores al 100%, Estación= número de estación, Nombre= nombre de la estación. En Naranja se presentan valores que superan al 25% o más de cuatro meses mayores al 100%, con amarillo representa estaciones que tienen menos del 25% o menos de tres meses con valores mayores al 100%, y en color verde, se representa los valores que contienen para el 2023.

Fuente: elaboración propia realizado a partir de datos de CONAGUA (2025b)

Para dividir aquellos que tienen menos errores se usó la fórmula 1 para realizar esta distinción. Se obtuvo 17 estaciones que contenían valores con más de 4 meses con valores $\geq$ al 100% y se colorearon de naranja, por lo que se tuvo que eliminar para no generar más errores en el análisis. En color amarillo se destacan las ocho estaciones que presentaban $\leq$ 25% de error y tenían datos del 2017 y 2020, los cuales se usaron para el análisis. Con color verde se identificaron nueve estaciones que presentaba datos del 2017, 2020 y 2023 por lo cual fueron usados para el análisis.

Evaluación de la precisión de modelos de estimación de precipitación: regresión lineal vs. diferencia porcentual

Los resultados obtenidos muestran que el método comparativo de regresión lineal climática presenta un MAE de 162.30 mm, mientras que el modelo de diferencia porcentual arrojó un MAE superior de 273.46 mm. Dicho parámetro señala que, por término medio, el método de regresión lineal presenta menor desviación respecto a los datos reales registrados, lo que evidencia una exactitud superior en la predicción (Tabla 7).

Asimismo, el RMSE fue significativamente menor para en el modelo de regresión (242.29 mm) frente al modelo porcentual (431.47 mm). Esto indica que los errores extremos son más frecuentes o más severos en el modelo de diferencia porcentual. Esto demuestra que el enfoque de regresión lineal resulta más sólido ante las fluctuaciones observadas a través del periodo evaluado

En cuanto al MAPE, que permite evaluar la magnitud del error relativo al valor observado. La regresión alcanzo valores de 17.04%, considerando aceptable en estudios hidrológicos, mientras que el modelo de diferencia porcentual presento un error promedio de 58.58%, lo cual evidencia una baja capacidad de predicción y un comportamiento inestable.

Tabla 7.- Proyección del 2017 y su comparación de la precipitación de diferencia porcentual y regresión

		Precipitación							
		Regresión				Diferencia Porcentual			
Nombre	2017	2007	E. ABS	E. ^2	% MAPE	2007	E. ABS	E. ^2	% MAPE
Cerano	702.80	749.38	46.58	2170.04	0.066	782.18	79.38	6300.99	0.11
Salvatierra	790.88	825.61	34.73	1206.49	0.044	765.21	25.67	658.82	0.03
Presa Solis	748.67	974.42	225.75	50962.1	0.302	711.55	37.12	1378.14	0.05
Cointzio	874.64	805.44	69.20	4788.22	0.079	706.20	168.44	28372.20	0.19
El Temazcal	1341.0	1262.74	78.26	6124.22	0.058	254.76	1086.24	1179924.3	0.81
Huaniqueo	940.87	1009.10	68.23	4655.52	0.073	673.03	267.84	71736.95	0.28
Huingo	781.58	949.44	167.86	28177.0	0.215	701.77	79.81	6368.96	0.10
Morelia	691.26	879.72	188.46	35516.2	0.273	779.21	87.95	7735.24	0.13
Álvaro	606.08	651.55	45.47	2067.44	0.075	794.12	188.04	35360.49	0.31
Presa Malpais	823.32	980.98	157.66	24857.3	0.191	818.33	4.99	24.85	0.01
Quirio	591.31	652.07	60.76	3691.45	0.103	766.02	174.71	30523.56	0.30
Tzitzio	1394.6	2139.61	745.01	555036.	0.534	546.91	847.69	718574.39	0.61
Zinapécuaro	727.29	807.97	80.68	6508.70	0.111	725.95	1.34	1.78	0.00
San Miguel	946.37	946.37	0.00	0.00	0.000	645.10	551.87	304563.13	5.92
Tafetán	1509.0	1104.85	404.15	163333.	0.268	742.80	766.20	587063.35	0.51
El Colegio	667.71	891.74	224.03	50188.4	0.336	675.85	8.14	66.28	0.01
			MAE	162.30				MAE	273.46
			RMSE	242.29				RMSE	431.47
			MAPE	17.04				MAPE	58.58

Nombre= Nombre de la estación, 2017= valor del 2017, 2007= valor del 2007, E. ABS= Error Absoluto, E. ^2= Error Cuadrático, % MAPE= Error Porcentual Absoluto por estación, MAE= Error Absoluto Medio, RMSE= Raíz del error Cuadrático Medio, MAPE, Error Porcentual Absoluto Medio. **Fuente:** elaboración propia realizado a partir de datos de CONAGUA (2025b)

En cuanto a la temperatura, los resultados vuelven a favorecer el modelo de regresión. Este método presentó un error absoluto medio (MAE) de 1.08 °C, en contraste con los 1.33 °C obtenidos mediante el enfoque basado en porcentajes. El RMSE fue de 1.93 °C en regresión, frente a 1.79 °C en diferencia porcentual, aunque esta diferencia no se considera significativa entre ambos modelos (Tabla 8). El estadístico relevante fue MAPE, que fue de 0.03% en regresión, un valor casi nulo y altamente preciso en contraste con el 6.68% que se obtuvo de la diferencia porcentual. La baja magnitud del modelo indica que la regresión no solo se ajusta bien a los datos reales, sino que lo hace con una estabilidad notable entre las estaciones.

Tabla 8.- Proyección del 2017 y su comparación de la temperatura de diferencia porcentual y regresión

		Temperatura							
		Regresión				Diferencia Porcentual			
Nombre	2017	2007	E. ABS	E. ^2	% MAPE	2007	E. ABS	E. ^2	% MAPE
Cerano	18.44	17.86	0.58	0.34	0.03	17.81	0.631	0.40	0.03
Salvatierra	19.26	19.64	0.38	0.15	0.02	16.97	2.290	5.24	0.12
Presa Solis	19.58	20.23	0.65	0.42	0.03	16.90	2.671	7.13	0.14
Cointzio	18.25	19.55	1.30	1.69	0.07	17.78	0.466	0.22	0.03
El Temazcal	17.45	17.05	0.40	0.16	0.02	18.08	0.632	0.40	0.04
Huaniqueo	18.96	19.05	0.09	0.01	0.00	17.76	1.195	1.43	0.06
Huingo	17.31	17.59	0.28	0.08	0.02	16.59	0.718	0.52	0.04
Morelia	18.95	19.35	0.40	0.16	0.02	18.32	0.629	0.40	0.03
Álvaro	19.20	20.29	1.09	1.20	0.06	18.02	1.182	1.40	0.06
Presa Malpais	18.42	18.76	0.34	0.12	0.02	16.76	1.657	2.75	0.09
Quirio	18.03	18.48	0.44	0.20	0.02	17.70	0.337	0.11	0.02
Tzitzio	18.33	20.10	1.78	3.15	0.10	19.18	0.855	0.73	0.05
Zinapécuaro	17.56	18.96	1.40	1.95	0.08	16.20	1.356	1.84	0.08
San Miguel	18.33	19.42	1.10	1.20	0.06	17.33	0.996	0.99	0.05
Tafetán	24.90	17.90	7.00	48.96	0.28	19.64	5.255	27.62	0.21
El Colegio	17.00	17.04	0.04	0.00	0.00	17.33	0.340	0.12	0.02
			MAE	1.08				MAE	1.33
			RMSE	1.93				RMSE	1.79
			MAPE	0.03				MAPE	6.68

Nombre= Nombre de la estación, 2017= valor del 2017, 2007= valor del 2007, E. ABS= Error Absoluto, E. ^2= Error Cuadrático, % MAPE= Error Porcentual Absoluto por estación, MAE= Error Absoluto Medio, RMSE= Raíz del error Cuadrático Medio, MAPE, Error Porcentual Absoluto Medio. **Fuente:** elaboración propia realizado a partir de datos de CONAGUA (2025b)

La precisión observada en el modelo de regresión se alinea con hallazgos previos, lo que destacan la utilidad de los métodos basados en series temporales para la reconstrucción de datos meteorológicos faltantes, siempre que se disponga de una serie amplia y homogénea (Fick y Hijmans, 2017; Karger et al., 2017). Sin embargo, esta diferencia entre temperatura y precipitación ha sido ampliamente documentada por varios autores de entre los que se destacan Fierke et al. (2024), Rincón-Gutiérrez et al. (2024), Bobrowski et al. (2021) y Marínez et al. (2023).

Comparación de métodos para la estimación de variables climáticas del 2020

El análisis de los modelos para poder predecir la precipitación para el 2020, utilizando el año del 2017 como referencia, puede verse muy similar los resultados en ambas métricas. Los datos del Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) son muy similares (34.28 en regresión y 34.01 en Diferencia porcentual) (Tabla 9).

Tabla 9.- Proyección del 2020 y su comparación de la temperatura de diferencia porcentual y regresión

		Precipitación							
		Regresión				Diferencia Porcentual			
Nombre	2020	2017	E. ABS	E. ^2	% MAPE	2017	E. ABS	E. ^2	% MAPE
Cerano	775.17	821.85	46.68	2179.44	0.060	866.66	91.49	8371.00	0.118
Salvatierra	442.50	702.56	260.06	67631.2	0.588	812.84	370.34	137148.	0.837
Presa Solis	644.00	831.76	187.76	35253.8	0.292	752.31	108.31	11730.1	0.168
Cointzio	802.45	820.14	17.69	312.87	0.022	710.13	92.32	8523.86	0.115
El Temazcal	1479.00	1417.56	1461.15	2134971	0.988	628.20	1460.63	2133430	0.988
Huaniqueo	602.08	1024.68	422.60	178594.	0.702	771.48	169.40	28697.2	0.281
Huingo	673.13	813.62	140.49	19737.2	0.209	694.01	20.88	435.86	0.031
Morelia	525.94	903.35	377.41	142441.	0.718	706.19	180.25	32491.5	0.343
Álvaro	609.13	654.35	45.22	2044.49	0.074	717.69	108.56	11785.5	0.178
Presa Malpais	713.78	853.65	139.87	19564.1	0.196	823.32	109.54	11999.0	0.153
Quirio	573.23	673.42	100.19	10037.6	0.175	730.52	157.29	24739.7	0.274
Tzitzio	1129.87	1674.62	544.75	296752.	0.482	349.19	780.68	609460.	0.691
Zinapécuaro	641.34	789.88	148.54	22062.9	0.232	773.14	131.80	17372.4	0.206
San Miguel	654.53	926.40	271.87	73914.3	0.415	702.55	48.02	2306.40	0.073
Tafetán	1105.17	1221.36	116.19	13499.6	0.105	400.63	704.54	496374.	0.637
El Colegio	601.47	738.08	136.61	18663.3	0.227	810.00	208.53	43484.7	0.347
			MAE	276.07				MAE	296.41
			RMSE	435.72				RMSE	472.91
			MAPE	34.28				MAPE	34.01

Nombre= Nombre de la estación, 2017= valor del 2017, 2007= valor del 2007, E. ABS= Error Absoluto, E. ^2= Error Cuadrático, % MAPE= Error Porcentual Absoluto por estación, MAE= Error Absoluto Medio, RMSE= Raíz del error Cuadrático Medio, MAPE, Error Porcentual Absoluto Medio. **Fuente:** elaboración propia realizado a partir de datos de CONAGUA (2025b).

Sin embargo, en el Error Medio Cuadrático (MAE) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) son ligeramente mayores en la diferencia porcentual. Esto podría indicar que el modelo de regresión podría predecir mejor ya que presentan una magnitud de error

mucho menor. No obstante, un examen detallado por estaciones desvela una variabilidad significativa. Por ejemplo, estaciones como Cointzio y Huingo muestran errores bajos con ambos métodos, lo que sugiere que estas locaciones poseen una dinámica de precipitación más estable y predecible. Por el contrario, estaciones como El Temazcal y Salvatierra registran errores excepcionalmente altos (MAPE >58% y >83%, respectivamente) en ambos modelos, lo que apunta a una alta impredecibilidad o a la posible influencia de eventos atípicos o microclimas que los modelos no logran capturar.

La temperatura muestra que la regresión tiene magnitudes menores en cuanto a los errores como es el MAE (0.91 °C) y el RMSE (1.41 °C), en contraste con los de diferencia porcentual donde presenta valores de MAE de 1.72 °C y RMSE de 2.43 °C (Tabla 10).

Tabla 10.- Proyección del 2020 y su comparación de la temperatura de diferencia porcentual y regresión

		Temperatura							
		Regresión				Diferencia Porcentual			
Nombre	2020	2017	E. ABS	E. ^2	% MAPE	2017	E. ABS	E. ^2	% MAPE
Cerano	19.25	18.38	0.87	0.76	0.05	18.52	0.73	0.54	0.04
Salvatierra	19.90	19.71	0.19	0.04	0.01	17.50	2.40	5.74	0.12
Presa Solís	20.00	19.62	0.38	0.14	0.02	17.25	2.75	7.55	0.14
Cointzio	18.50	18.90	0.40	0.16	0.02	18.84	0.34	0.12	0.02
El Temazcal	17.4	17.85	0.45	0.20	0.03	18.37	0.97	0.95	0.06
Huaniqueo	20.50	18.77	1.73	3.00	0.08	18.47	2.03	4.13	0.10
Huingo	18.51	17.53	0.98	0.95	0.05	16.95	1.56	2.44	0.08
Morelia	19.60	19.72	0.12	0.01	0.01	18.75	0.85	0.72	0.04
Álvaro	19.80	19.94	0.14	0.02	0.01	18.47	1.33	1.77	0.07
Presa Malpais	18.73	18.61	0.12	0.01	0.01	17.53	1.19	1.42	0.06
Quirio	15.20	18.08	2.88	8.29	0.19	18.37	3.17	10.07	0.21
Tzitzio	19.20	18.50	0.70	0.50	0.04	19.19	0.01	0.00	0.00
Zinapécuaro	18.60	18.14	0.46	0.21	0.02	17.21	1.39	1.94	0.07
San Miguel	18.60	19.36	0.76	0.57	0.04	17.48	1.12	1.26	0.06
Tafetán	1105.17	23.38	4.12	17.01	0.15	20.02	7.48	55.95	0.27
El Colegio	601.47	17.48	0.22	0.05	0.01	17.83	0.13	0.02	0.01
			MAE	0.91				MAE	1.72
			RMSE	1.41				RMSE	2.43
			MAPE	0.05				MAPE	0.04

Nombre= Nombre de la estación, 2017= valor del 2017, 2007= valor del 2007, E. ABS= Error Absoluto, E. ^2= Error Cuadrático, % MAPE= Error Porcentual Absoluto por estación, MAE= Error Absoluto Medio, RMSE= Raíz del error Cuadrático Medio, MAPE, Error Porcentual Absoluto Medio. **Fuente:** elaboración propia realizado a partir de datos de CONAGUA (2025b).

Sin embargo, el MAPE favorece a la diferencia porcentual por la diferencia de 1 °C. La consistencia del modelo de regresión es evidente al observar los errores individuales por estación, los cuales son notablemente bajos y uniformes en la mayoría de los casos (e.g., Morelia, Presa Malpaís, Álvaro). Si bien el modelo de diferencia porcentual funciona de manera aceptable en algunas estaciones (e.g., Tzitzio, con un error casi nulo), exhibe una tendencia general a subestimar la temperatura de 2020, resultando en errores absolutos sustancialmente más altos en varias locaciones (e.g., Salvatierra, Presa Solís, Quirio).

Comparación de métodos para la estimación de variables climáticas del 2023

La comparación entre los métodos para la estimación de la temperatura y precipitación para el 2023, se realizó para ocho estaciones, que presentaban datos para este año. Los resultados muestran que, en el modelo de regresión lineal climática para la precipitación el MAE fue de 327.57 mm, mientras que para el modelo de diferencia porcentual fue de 242.35 mm (Tabla 11). Esto sugiere que, en métodos absolutos, el segundo método proporcione estaciones más cercanas al valor observado. El RMSE fue menor en el modelo de regresión siendo 374.90 mm en comparación con el modelo porcentual que es de 489.49 mm, lo que indica que la regresión fue menos sensible en los valores extremos. Sin embargo, en cuanto al MAPE, el modelo porcentual presentó un valor de 30.70% en contraste con el 47.62% de la regresión, revelando una mayor precisión relativa del primero.

Estos resultados muestran que el modelo de diferencia porcentual fue preciso en términos relativos y absolutos promedio, aunque también presentó valores con mayor dispersión en errores extremos presentado en el RMSE. Sin embargo, este enfoque podría ser menos confiable en escenarios de alta variabilidad climática, ya que se basa en proporcionalidad constante y esto no se refleja normalmente en los procesos meteorológicos subyacentes. Por su parte, el modelo de regresión lineal, considera una tendencia lineal de largo plazo (1977-2017), y esta tiende a suavizar las variaciones abruptas, lo cual puede ser ventajoso en ciertos contextos de modelación hidrológica.

Tabla 11.- Proyección del 2023 y su comparación de la temperatura de diferencia porcentual y regresión

		Precipitación							
		Regresión				Diferencia Porcentual			
Nombre	2023	2017	E. ABS	E. ^2	% MAPE	2017	E. ABS	E. ^2	% MAPE
Coíntzio	620	820.89	200.89	40357.6	0.324	642.39	22.39	357137.25	0.036
El Temazcal	1172.5	1429.50	257.00	66051.2	0.219	556.92	615.58	310162.82	0.525
Morelia	476.02	921.50	445.48	198449.	0.936	655.67	179.65	87832.93	0.377
Álvaro	464.71	658.98	194.27	37740.9	0.418	661.35	196.64	71859.95	0.423
Presa Malpais	575.7	865.39	289.69	83920.1	0.503	463.35	112.35	214689.76	0.195
Tzitzio	962.4	1715.96	753.56	567857.	0.783	439.16	523.24	192862.82	0.544
Zinapécuaro	688.94	781.28	92.34	8526.20	0.134	747.46	58.52	397433.62	0.085
San Miguel	639.5	939.98	300.48	90286.6	0.470	614.27	25.23	377325.00	0.039
Tafetán	831	1245.44	414.44	171761.	0.499	383.49	447.51	147062.45	0.539
		MAE				MAE			
		327.57				242.35			
		RMSE				RMSE			
		374.90				489.49			
		MAPE				MAPE			
		47.62				30.70			

Nombre= Nombre de la estación, 2017= valor del 2017, 2007= valor del 2007, E. ABS= Error Absoluto, E. ^2= Error Cuadrático, % MAPE= Error Porcentual Absoluto por estación, MAE= Error Absoluto Medio, RMSE= Raíz del error Cuadrático Medio, MAPE, Error Porcentual Absoluto Medio. **Fuente:** elaboración propia realizado a partir de datos de CONAGUA (2025b).

Los resultados muestran que el modelo de regresión lineal para la temperatura se obtuvo un MAE de 0.98 °C, mientras que el método de diferencia porcentual se obtuvo un valor superior de 1.60 °C. en términos cuadráticos, el RMSE fue de 1.24 °C en la regresión, mientras que para el modelo porcentual fue de 18.27 °C, lo cual evidencia una alta sensibilidad en la diferencia porcentual para valores de errores extremos (Tabla 12). En cuanto al MAPE la regresión obtuvo 4.73% y para el modelo porcentual obtuvo 7.59%, reflejando un mejor comportamiento relativo del modelo basado en tendencias lineales.

En el modelo de regresión se obtuvo un mejor desempeño por su capacidad de capturar la tendencia térmica en el tiempo, amortiguando variaciones interanuales. En contraste, los modelos de diferencia porcentual mostro un comportamiento errático en estaciones con cambios abruptos, resultando en valores sobrestimados y con alta varianza. Este comportamiento es especialmente en Tafetán, donde se obtuvo errores de 5.56 °C.

Tabla 12.- Proyección del 2023 y su comparación de la temperatura de diferencia porcentual y regresión

		Temperatura							
		Regresión				Diferencia Porcentual			
Nombre	2023	2017	E. ABS	E. ^2	% MAPE	2017	E. ABS	E. ^2	% MAPE
Coíntzio	18.38	19.02	0.65	0.42	0.035	19.24	0.87	306.59	0.047
El Temazcal	16.96	17.94	0.98	0.97	0.058	18.75	1.79	229.98	0.106
Morelia	19.86	19.83	0.03	0.00	0.001	19.15	0.71	366.73	0.036
Álvaro	19.90	20.10	0.20	0.04	0.010	19.06	0.84	363.19	0.042
Presa Malpais	19.91	18.70	1.21	1.45	0.061	18.09	1.82	327.19	0.091
Tzitzio	19.18	18.32	0.86	0.74	0.045	19.58	0.40	352.34	0.021
Zinapécuaro	19.38	18.14	1.24	1.54	0.064	17.74	1.64	314.83	0.085
San Miguel	18.81	19.59	0.78	0.61	0.042	18.03	0.78	325.00	0.042
Tafetán	26.00	23.14	2.86	8.15	0.110	20.44	5.56	417.77	0.214
			MAE	0.98			MAE	1.60	
			RMSE	1.24			RMSE	18.27	
			MAPE	4.73			MAPE	7.59	

Nombre= Nombre de la estación, 2017= valor del 2017, 2007= valor del 2007, E. ABS= Error Absoluto, E. ^2= Error Cuadrático, % MAPE= Error Porcentual Absoluto por estación, MAE= Error Absoluto Medio, RMSE= Raíz del error Cuadrático Medio, MAPE, Error Porcentual Absoluto Medio. **Fuente:** elaboración propia realizado a partir de datos de CONAGUA (2025b).

Considerando los resultados entre precipitación y temperatura del 2007-2017 y 2017-2023, el modelo de regresión resulto más adecuado para predecir temperaturas futuras debido a su consistencia y bajo error. Sin embargo, la precipitación tuvo un mejor rendimiento en el análisis 2007-2017, la variabilidad del existente en 2017-2023 se puede sugerir un modelo hibrido (combinando regresión con técnicas de diferencia porcentual o modelos lineales) que podrían ajustarse para ser más efectivo.

Estas diferencias pueden deberse a que en la regresión lineal se usaron datos que estuviesen desde 1977 hasta el 2007 o 2017, mientras que en diferencia porcentual solo se utilizó el dato obtenido en el año de análisis. Esto pudo haber generado que la regresión fuese mejor por ajustar una gran cantidad de datos entre estaciones, mientras que en la diferencia porcentual es más errática. Estos errores pueden deberse a errores de lectura o transcripción, error instrumental, error de calibración, sistémico, resolución temporal, datos faltantes o incompletos, error de digitalización, etc.

Discusión

La carencia de información confiable puede restringir la capacidad de comprender y anticipar fenómenos climáticos extremos, lo cual dificulta la implementación de estrategias, normativas o técnicas adecuadas. Algunas investigaciones demuestran la importancia de ello, ya que se indica que el cambio climático afectara más en regiones que presentan recursos económicos limitados (Berberian et al., 2022). Es por esto, que la integración de datos satelitales con mediciones in situ requiere de estaciones meteorológicas bien calibradas y mantenidas.

Los hallazgos en la investigación realizada confirman el problema que se tiene de la falta de datos y su calidad, tanto de estaciones como satelitales, lo que hace coincidir con datos de literatura científica global. En este estudio se identificó solo el 26.47% (9 estaciones) los cuales presentaron valores para el 2023 y 3.53% (ocho estaciones) presentaron diferencia menor al 25% en su comparación, para ser tomados dentro del análisis. Sin embargo, 50% (17 estaciones) de las estaciones meteorológicas analizadas presentaron mucha diferencia comparándolas con la información satelital para el 2023. Este alto porcentaje refleja una problemática extendida y consistente con otras investigaciones documentadas por Valencia-Gonzalez et al. (2022) En cuanto a la confiabilidad que ofrecen los registros de las estaciones meteorológicas distribuidas en el territorio nacional. La situación empeora, cuando se revisa que existe una baja cantidad de estaciones meteorológicas en varias regiones y en muchas ocasiones tienen archivados valores climáticos mal archivados o incompletos, presentándose este problema en varias partes del mundo (Carrara et al., 2023; Deichmann y Eklundh, 1991).

La variable de temperatura para el 2023, resultó tener una pequeña superioridad significativa en regresión en comparación con la diferencia porcentual, evidenciada por 0.39% en el Error Absoluto Medio (MAE) y una disimilitud de 37.68% en Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE). En cuanto, a la precipitación para el 2023, vemos superada la regresión con 26.01% en el MAE y en cuanto al MAPE existe una diferencia de 35.53%, siendo mejor la diferencia porcentual. Estos hallazgos concuerdan con las observaciones de Carrara et al. (2023) y Marzouk (2021), donde en sus investigaciones destacaron la efectividad del sistema meteorológico satelital NASA POWER, donde estimaron que variables como la temperatura y velocidad del viento son variables más estables y predecibles en comparación con las variables pluviométricas, facilitando su modelación con mayor precisión. Las discrepancias registradas entre las variables térmicas y las pluviales

pueden atribuirse a factores como el terreno y la vegetación presente. Sin embargo, el régimen de lluvias podría estar influido por procesos atmosféricos intrincados y altamente cambiantes, sumando a la resolución espacial característica de NASA POWER, establecida en celdas de $0,1^\circ$ de latitud por $0,1^\circ$ de longitud (equivalentes a unos 10 km) (NASA, 2025).

También, la cuenca de Cuitzeo está caracterizada principalmente por una topografía y vegetación muy variada a lo largo de sus 3,675 km² ampliamente documentada (Amador et al., 2011; Cram et al., 2010; IPLAEM, 2019; López, 2006; Mendoza et al., 2002; Pimienta-Ramírez, 2024; Pimienta-Ramírez et al., 2025). Lo cual puede influir en los análisis debido a la heterogeneidad climática sugiriendo que la topografía local, los patrones de circulación atmosférica y los microclimas influyen significativamente en la confiabilidad de las correcciones propuestas.

En cuanto a la validación de datos satelitales ya se han realizado anteriormente, como Monteiro et al. (2018), donde hizo uso de los errores cuadrados medios (RMSE) y el error medio relativo (RME) en las variables de temperatura donde existió menos variación a diferencia de la precipitación en NASA POWER donde se encontró mayor error, sugiriendo que por el tamaño del pixel se recomienda en actividades agrícolas o a trabajos de escala regional o nacional, pero no a escalas reducidas. En cuanto a Loew et al. (2017), respalda este trabajo debido a que utilizó varios métodos de validación y evaluando las diferencias y similitudes que existe entre las distintas métricas.

La integración de técnicas de aprendizaje automático e inteligencia artificial representa una oportunidad prometedora para identificar patrones espacio temporales complejos en las correcciones de datos, mejorando la precisión de los métodos existentes. Además, la combinación de múltiples fuentes satelitales (NASA POWER, ERA5-Land, CHIRPS) mediante ensambles probabilísticos podría reducir incertidumbres y aumentar la robustez de las estimaciones en regiones con monitoreo insuficiente.

La validación de la metodología propuesta en otras cuencas hidrográficas mexicanas con características climáticas contrastantes, permitiría evaluar su generalización y desarrollar protocolos estandarizados para la corrección de datos satelitales a nivel nacional. Este planteamiento cobra especial importancia en el escenario del calentamiento global, donde la exactitud de la información meteorológica resulta determinante para la adopción de medidas en el manejo del agua

Conclusiones

Los hallazgos de esta investigación demuestran avances significativos en la metodología de corrección de datos climáticos. Sin embargo, persisten desafíos en cuanto a la validación de variables climáticas como la precipitación, donde más existe variación a diferencia de la temperatura. También, existe una alta variabilidad entre los datos de las estaciones climáticas y los datos satelitales de NASA POWER. A pesar de ello, para esta investigación la diferencia porcentual fue la métrica que mejor se comportó para la obtención de valores del 2020 y 2023.

Sin embargo, a pesar que en algunas ocasiones la diferencia porcentual tiene una magnitud de Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) bajo, los Error Absoluto Medio (MAE) y una Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) son superiores lo que hace que la regresión sea un modelo mejor aceptado.

La validación de la metodología en cuencas con características climáticas contrastantes permitirá desarrollar protocolos estandarizados aplicables a nivel nacional, mientras que la consideración de factores topográficos y de uso de suelo mejorará la representatividad espacial de las correcciones.

Estos avances metodológicos contribuirán significativamente a la mejora de los sistemas de información climática nacionales, fortaleciendo las capacidades de monitoreo y predicción necesarias para la adaptación al cambio climático y la gestión sostenible de los recursos hídricos en México.

Recomendaciones

Podría usarse una combinación entre regresión y diferencia porcentual, adicionalmente usando inteligencia artificial para analizar mejor los datos y tendencias, sobre todo en la precipitación que es la más caótica.

Se requiere un protocolo establecido de validación climática estandarizada entre diferentes fuentes de datos por parte de CONAGUA, pero que este validado científicamente para subsanar valores faltantes en las estaciones climáticas.

CAPÍTULO III

Evaluación de la Huella Hídrica de Cultivos Básicos en la Cuenca de Cuitzeo mediante CROPWAT 8.0 en el 2023

Resumen

La seguridad hídrica global enfrenta un punto crítico donde la agricultura de regadío al consumir más del 90% del agua utilizada a nivel mundial. Ante la creciente incertidumbre climática, los modelos tradicionales de gestión resultan insuficientes, siendo necesario priorizar la eficiencia en el uso del recurso. El concepto de Huella Hídrica, que distingue entre agua verde (precipitación) y azul (riego), permite evaluar la sostenibilidad de los sistemas productivos. En México, la sobreexplotación de acuíferos supera el 40%, afectando gravemente a cuencas endorreicas como la de Cuitzeo en Michoacán. Esta investigación aplica el modelo CROPWAT 8.0 para cuantificar el consumo hídrico de cultivos básicos, buscando optimizar el uso del agua y contribuir a la preservación de este ecosistema amenazado. Se plantea como hipótesis que los cultivos de mayor importancia económica presentan una huella hídrica azul superior a la de los cultivos de interés nacional, y que la suma del consumo hídrico total de todos los cultivos evidenciará el déficit de la cuenca al contrastarse con las concesiones del REPDA. Para ello, se realizó un análisis de 36,959 parcelas con cultivos de aguacate, frijol, maíz y sorgo, de los sistemas de riego y temporal para la Cuenca de Cuitzeo del 2023. Se utilizó el programa CROPWAT 8.0 para calcular las necesidades hídricas utilizando datos climáticos, suelos y cultivos para determinar la cantidad de agua exacta de cada cultivo y con ello estimar la huella hídrica verde y azul. El análisis de la huella hídrica en la cuenca del Lago de Cuitzeo revela un déficit estructural de 218.81 hm³ anuales, resultante de contrastar la demanda real de cultivos (401.03 hm³/año) con el volumen concesionado (182.22 hm³/año). El maíz concentra el 77% de la huella azul total (308.91 hm³/año), duplicando la capacidad de recarga. El aguacate, pese a ocupar solo el 9% de la superficie, presenta un impacto desproporcionado (107.78 hm³/año) en zonas de recarga. Se requiere urgentemente regularizar extracciones, restringir cultivos de alto impacto y fomentar alternativas resilientes como el sorgo para evitar una crisis ecológica irreversible.

Palabras clave: Huella Hídrica, CROPWAT, Cuenca de Cuitzeo, Sostenibilidad, Cultivos

CHAPTER III

Assessment of the Water Footprint of Staple Crops in the Cuitzeo Basin Using CROPWAT 8.0 in 2023

Abstract

Global water security is reaching a critical threshold, as irrigated agriculture accounts for more than 90% of total water use worldwide. Under increasing climatic uncertainty, traditional management models are proving insufficient, making it necessary to prioritize efficiency in water use. The concept of the Water Footprint, which distinguishes between green water (precipitation) and blue water (irrigation), provides a framework for evaluating the sustainability of production systems. In Mexico, aquifer overexploitation exceeds 40%, severely affecting endorheic basins such as the Cuitzeo Basin in Michoacán. This research applies the CROPWAT 8.0 model to quantify the water consumption of staple crops, aiming to optimize water use and contribute to the preservation of this threatened ecosystem. The working hypothesis proposes that crops of higher economic value exhibit a greater blue water footprint than those of national importance, and that the total aggregated water consumption of all crops will reveal the basin's deficit when contrasted with REPDa concession volumes. To this end, an analysis was conducted on 36,959 plots cultivated with avocado, beans, maize, and sorghum, under both irrigated and rainfed systems within the Cuitzeo Basin for the year 2023. The CROPWAT 8.0 model was employed to calculate crop water requirements using climatic, soil, and crop data, allowing for the precise estimation of water consumption and, consequently, the green and blue water footprints. The water footprint analysis in the Cuitzeo Lake Basin reveals a structural deficit of 218.81 hm³ per year, resulting from the comparison between actual crop water demand (401.03 hm³/year) and concessioned volume (182.22 hm³/year). Maize accounts for 77% of the total blue water footprint (308.91 hm³/year), effectively doubling the basin's recharge capacity. Avocado, despite occupying only 9% of the cultivated area, exerts a disproportionate impact (107.78 hm³/year) in recharge zones. Urgent measures are required to regulate water withdrawals, restrict high-impact crops, and promote resilient alternatives such as sorghum in order to prevent an irreversible ecological crisis.

Keywords: Water Footprint, CROPWAT, Cuitzeo Basin, Sustainability, Crops

Introducción

La seguridad hídrica a nivel mundial actualmente se está enfrentando a un punto de inflexión crítico. En el sector agrícola de regadío se le destina poco más del 70% de las captaciones de agua superficial y subterránea, así como más del 90% del consumo consuntivo global (FAO, 2021; Mancosu et al., 2015), todo ello operando bajo una creciente incertidumbre climática que va en crecimiento. La demanda evaporativa de la atmósfera ha aumentado debido al calentamiento global, modificando los ciclos de evapotranspiración de los cultivos, acentúa el déficit de presión de vapor, particularmente en zonas con escasa precipitación (Davis et al., 2017). Ante este panorama, los enfoques tradicionales de administración del recurso hídrico, centrados únicamente en garantizar su disponibilidad, resultan inadecuados. Por lo tanto, se hace imperativa una evolución hacia los modelos de gestión que prioricen la demanda, optimizando tanto la eficiencia física en su uso como la productividad económica.

La evaluación del consumo de agua asociado a la cadena agroalimentaria se ha formalizado mediante el paradigma de la Huella Hídrica (HH), una metodología propuesta inicialmente por Hoekstra (2003) y posteriormente consolidada en el marco de evaluación estandarizado (Hoekstra et al., 2011). Dicho indicador, de naturaleza multidimensional, distingue entre tres fuentes de origen: los componentes azul, verde y gris. No obstante, investigaciones más recientes subrayan la necesidad de someter a un examen minucioso la distinción entre la Huella Hídrica Verde —que alude al agua de lluvia retenida en el terreno y la Huella Hídrica Azul, integrada por volúmenes de riego extraídos de mantos subterráneos o cauces superficiales (Hoekstra, 2003; Hoekstra et al., 2011; Rosa et al., 2020). La primera implica un costo de oportunidad ecológico generalmente menor, mientras que la segunda entra en competencia directa con otros usos prioritarios, como el abastecimiento humano, el sector industrial y el mantenimiento de los flujos ambientales. En consecuencia, el consumo de agua azul emerge como el parámetro más determinante para diagnosticar presiones no sostenibles dentro de los sistemas de producción agrícola (Hogeboom et al., 2018; Rosa et al., 2020).

En México existe una notable desigualdad en la distribución del agua. Hay un fuerte desequilibrio entre la relativa abundancia hídrica que distingue al sureste del país y la deficiencia crónica que afecta a las zonas centro y norte, regiones donde se ubica un alto grado de concentración de la actividad económica y agropecuaria nacional. Datos oficiales recientes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2019) revelan que más del 40%

de los acuíferos nacionales están catalogados como sobreexplotados. Este problema se vuelve especialmente crítico en las cuencas de carácter endorreico, es decir, aquellas que carecen de salida al mar. Dichos sistemas hidrológicos, al carecer de una conexión fluvial con el mar, funcionan como receptores terminales de contaminantes y su equilibrio depende exclusivamente de la relación crítica entre la precipitación y la evaporación para la conservación de sus cuerpos de agua (Viveros, 2025).

La administración en estas regiones, poco eficaz del riego, no solamente reduce de manera crítica las reservas acuíferas, sino que además incentiva dos procesos de degradación ambiental: la concentración de sales en los suelos y la degradación de los sistemas lacustres vinculados a ellos. Investigaciones actuales realizadas en cuencas mexicanas concluyen que, con frecuencia, la agricultura de alta demanda (tanto de cultivos básicos como de frutales destinados a la exportación) supera la capacidad natural de recarga de los acuíferos (Ferrer, 2024; Ramírez, 2024) lo que genera daño o contaminación de origen antrópico, que no se ha restablecido y genera un riesgo para los ecosistemas, requiriendo una remediación inmediata, debido a que pone en riesgo la sostenibilidad a largo plazo de la propia producción agropecuaria (Mendoza et al., 2025).

En Michoacán, la cuenca endorreica del Lago de Cuitzeo, situada en el Eje Neovolcánico Transversal, constituye un microcosmos emblemático de esta problemática nacional. A pesar de ser el segundo cuerpo lacustre más extenso del país, Cuitzeo experimenta un proceso acelerado de desecación y eutrofización. La presión humana en esta región es considerable, ya que la expansión del área cultivada y la conversión del territorio hacia sistemas de producción con elevadas necesidades de riego han alterado de forma preocupante el ciclo hidrológico local (Hernández et al., 2025; Pimienta-Ramírez, 2024; Pimienta-Ramírez et al., 2025).

Aunque la cuenca reviste una importancia estratégica para la seguridad alimentaria de la región, al ser una zona productora fundamental de granos básicos como el maíz (*Zea mays*) y el sorgo (*Sorghum bicolor*), así como de forrajes como la alfalfa (*Medicago sativa*) (Villafán-Vidales et al., 2021), persiste una notable falta de información precisa sobre el consumo hídrico real de estos sistemas agrícolas. Las dotaciones de riego suelen calcularse mediante estimaciones empíricas o fórmulas teóricas que no incorporan la variabilidad climática contemporánea ni las propiedades hidrofísicas particulares de los suelos de la zona (principalmente Vertisoles y Andosoles), como su textura y capacidad de retención de humedad. Esta brecha entre los requerimientos fisiológicos del cultivo y la

disponibilidad efectiva del recurso conduce a que la eficiencia en el uso del agua a escala parcelaria a menudo no supere el 45% (Zhuo et al., 2016).

Dada la inviabilidad práctica de implementar instrumentos de medición directa como lisímetros en la totalidad de la superficie agrícola, la simulación mediante modelos matemáticos surge como la alternativa más sólida para cuantificar la Huella Hídrica. Entre estas herramientas, el modelo CROPWAT 8.0, desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), constituye el referente metodológico globalmente aceptado. Esta plataforma se fundamenta en el algoritmo Penman-Monteith (FAO-56), reconocido como el procedimiento de mayor precisión para calcular la evapotranspiración de referencia, ya que integra simultáneamente parámetros termodinámicos y aerodinámicos, tales como la radiación neta, la temperatura del aire, la velocidad del viento y el déficit de presión de vapor (Allen et al., 1998; FAO, 2024; Pereira et al., 2015; Pereira et al., 2020).

La aplicación del modelo CROPWAT para diagnosticar la sostenibilidad del uso del agua ha sido ampliamente validada en estudios recientes. Investigaciones como las de Pasiani et al. (2025), Er et al. (2025), Iacuzzi et al. (2025), Hemareddy et al. (2025) y Golfam (2024) evidencian que una simulación precisa de las necesidades hídricas de los cultivos y una calendarización óptima del riego permiten detectar oportunidades concretas para disminuir la HH Azul, manteniendo al mismo tiempo niveles productivos adecuados. Mediante el cálculo diario del balance hidrológico del suelo, el modelo puede discriminar con exactitud qué proporción de la evapotranspiración es cubierta por el agua de lluvia disponible (HH Verde) y qué volumen debe ser aportado mediante riego (HH Azul).

El análisis diferenciado de la Huella Hídrica Verde y Azul en la Cuenca de Cuitzeo es una necesidad urgente para la gobernanza del agua. Determinar la huella hídrica de los cultivos en esta zona permitirá:

1. Identificar qué cultivos ejercen mayor presión sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos.
2. Proporcionar métricas cuantitativas para el diseño de políticas públicas orientadas a la reconversión productiva o la tecnificación del riego.

Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo central analizar y cuantificar el consumo hídrico de los principales cultivos en la Cuenca de Cuitzeo mediante la aplicación del modelo CROPWAT 8.0. Se busca responder a la interrogante sobre la

magnitud del subsidio ambiental que la extracción de agua azul representa para la agricultura local y proponer estrategias para maximizar la productividad del agua física (kg/m^3), contribuyendo así a la preservación del capital natural de una de las cuencas más emblemáticas y amenazadas de México.

Justificación

Actualmente, la Cuenca de Cuitzeo enfrenta una problemática hídrica de sobreexplotación, donde el sector primario económico que se centra en la producción directa de materia prima de origen natural como es el abastecimiento agrícola y el sector terciario como es el abastecimiento público son los principales usuarios consuntivos. Además, es preocupante ante el actual contexto creciente de la variabilidad climática y conflictos potenciales que se están dando por su gestión del agua y sus Normas y leyes que están modificándose. Por ello, es imperativo generar evidencia científica sólida que pueda cuantificar las cantidades de agua que existen en todas las regiones, el tipo de manejo hídrico (lluvia y riego) y la eficacia que se utiliza en la producción de los cultivos principales. Es por ello que este estudio intenta aportar datos concretos para dar a conocer la cuantificación hídrica con datos gubernamentales, que permitirá informar y priorizar acciones que reconcilien la seguridad alimentaria, el desarrollo económico rural y la sostenibilidad ambiental de la cuenca.

La investigación propone un marco metodológico replicable que combina herramientas de acceso libre (CROPWAT 8.0, Sistemas de Información Geográfica, Imágenes sentinel-2 y normales climáticas) para generar una línea base detallada y espacialmente explícita, llenando un vacío de información específico para la Cuenca de Cuitzeo y sirviendo de referente para otras cuencas o regiones.

Se considera que los resultados obtenidos de este trabajo tendrán una utilidad directa para los actores clave encargados de la gestión hídrica y el desarrollo agrícola, así como para los organismos gubernamentales como CONAGUA y los organismos de cuenca, dado que proporcionara un diagnóstico cuantitativo para fundamentar planes de manejo, asignaciones de agua y políticas de eficiencias dirigidas a los cultivos demandantes. También, para los organismos encargados del sector agrícola como es el SIAP y el SADER, ofrecerá indicadores de productividad hídrica que pueden orientar programas de reconversión productiva o apoyo técnico. Finalmente, esta investigación puede ser de

ayuda a productores y sus organizaciones, los cuales podrían optimizar el uso del agua con los datos obtenidos, mejorando su resiliencia económica y ambiental.

Pregunta

¿Cuál es la magnitud, el consumo hídrico de las Huellas hídricas azul y verde y la eficiencia productiva de la huella hídrica de los cultivos del maíz, sorgo, frijol y aguacate en la Cuenca de Cuitzeo durante el año del 2023 y como se distribuye espacialmente la presión sobre los recursos hídricos?

Hipótesis

Los cultivos de mayor importancia económica como el aguacate y aquellos extensivos y por lo tanto demandantes de grandes cantidades de agua como el maíz, presentaran huellas hídricas azules mayores debido a la intensificación del riego y su concentración territorial, lo cual pueden mostrar un alto consumo hídrico al ser comparado con las concesiones del REPDA.

Objetivos

Objetivo General

Analizar y comparar las huellas hídricas (Verde y Azul) y la eficiencia en el uso del agua de los cultivos de maíz, sorgo, frijol y aguacate en la Cuenca de Cuitzeo para el año 2023, con el fin de identificar los puntos de mayor presión hídrica para proponer estrategias para una mejor gestión sustentable.

Objetivos particulares

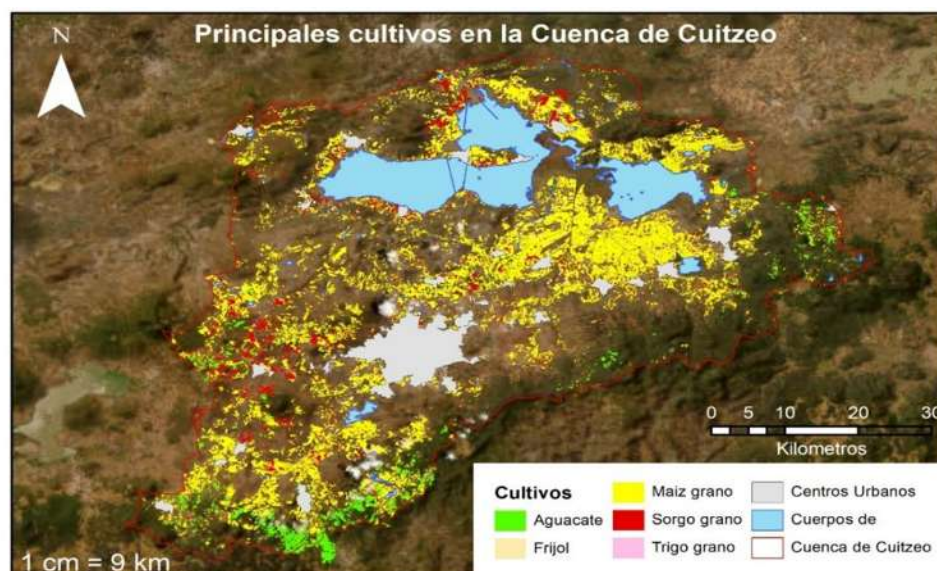
- Estimar cuantitativamente la huella hídrica (verde y azul) total y por municipio, para cada uno de los cinco cultivos de estudio en la totalidad de la cuenca, haciendo uso del programa de CROPWAT 8.0, alimentándolo con datos climáticos interpolados, técnicas cartográficas y superficies de cultivo.
- Georreferenciar los resultados de las huellas hídricas a escalas de parcelas/ polígonos y analizar su distribución geográfica y reportar donde se da el mayor estrés hídrico de acuerdo a estos 5 cultivos.
- Evaluar la eficiencia productiva del agua para cada cultivo mediante el cálculo de la productividad hídrica física y económica utilizando datos oficiales de rendimiento y precios medios.
- Elaborar un conjunto de recomendaciones técnicamente fundamentadas dirigidas a la reducción del riesgo por sobreexplotación y la promoción de un uso más sustentable y eficiente del agua en la agricultura de la cuenca.

Metodología

Con el fin de estimar la huella hídrica de los cultivos en la cuenca de Cuitzeo durante el año 2023, se implementó un procedimiento por etapas que combina información geoespacial con modelos de simulación agrícola. En primer lugar, se tomó como límite de la cuenca de Cuitzeo, el polígono que acota el simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas conocido como SIATL (SIATL, 2026). Después, se recopilaron los datos climáticos necesarios a partir de dos fuentes principales. Por un lado, se utilizaron las normales climatológicas publicadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2025b), que corresponden a 16 estaciones dentro y fuera de la cuenca. De ellas, se extrajeron los valores mensuales de precipitación (mm), temperatura máxima (°C) y temperatura mínima (°C). Debido a la escasez de estaciones que contaran con registros disponibles para el año 2023, se aplicó un método de regresión sobre las variables climáticas a fin de completar los datos faltantes en aquellas estaciones que presentaban vacíos de información para ese periodo. A fin de completar la información, de la segunda fuente se utilizaron los datos de humedad relativa (%), velocidad del viento (m/seg) e insolación (horas) se obtuvieron del programa de Predicción de Recursos Energéticos Mundiales (POWER) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA). Posteriormente, para homogenizar la información espacial y cubrir toda el área de estudio, los datos climáticos mensuales fueron interpolados para toda la cuenca utilizando el método geoestadístico de Kriging.

De manera paralela, se definió la superficie agrícola para los cultivos de maíz de grano, trigo de grano, sorgo de grano y frijol, se empleó la capa de aproximadamente 36,989 polígonos de parcelas de interés nacional, proporcionada por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Asimismo, dada la importancia económica del aguacate, su superficie fue identificada mediante técnicas de teledetección; para ello, se procesaron imágenes multiespectrales (MSI) del satélite Sentinel-2 (nivel L2A) con una resolución de 10 metros, con ayuda en la plataforma Google Earth Engine (Fig. 36). Adicionalmente, se incorporó al análisis una capa de textura del suelo con una resolución espacial de 10 metros para toda la cuenca, asegurando una escala de trabajo consistente de 1:50,000 para todos los insumos geoespaciales. Por último, las parcelas fueron separadas por medio de municipios presentes en la Cuenca de Cuitzeo tomados del INEGI y por las diferentes microcuencas tomadas de FIRCO.

Figura 36.- Principales cultivos de importancia dentro de la cuenca de Cuitzeo



Fuente: datos de cultivos tomados del SIAP (2024a) para el año 2023, imagen de interpretación propia con datos de INEGI (2026).

Tras ensamblar estas bases de información, se dio paso a la etapa de modelación empleando el programa CROPWAT 8.0, creado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024). Este programa posibilitó la modelación del equilibrio hidrológico y las demandas hídricas de cada tipo de cultivo, tomando en cuenta las particularidades de clima, tipo de suelo y prácticas agronómicas establecidas para la cuenca. Con ese fin, se ajustaron los parámetros del modelo empleando la información meteorológica previamente interpolada, los valores estándar de coeficiente de cultivo establecidos por la FAO para las cinco especies vegetales analizadas, y la textura del suelo correspondiente a cada unidad de análisis. El cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) se realizó mediante la ecuación de Penman-Monteith, utilizando datos climáticos diarios correspondientes al año 2023.

La precipitación efectiva se calculó aplicando el procedimiento FAO/AGLW, elegido por su criterio restrictivo frente a las lluvias y por ser ampliamente respaldado en trabajos sobre huella hídrica y balances hidrológicos en el ámbito agrícola. (Er et al., 2025; Hoekstra et al., 2011; Iacuzzi et al., 2025; Kumari y Rawat, 2025). El uso de este enfoque permite evitar la sobrestimación de la lluvia efectiva agrícola que es aprovechable y permite una evaluación más precisa del requerimiento de riego.

Al término del proceso, el modelo estimó las dos vertientes de la huella hídrica: la huella verde (HHV), que representa el volumen de precipitación aprovechado por los

cultivos, y la huella azul (HHA), que cuantifica el agua proveniente del riego empleada tanto en sistemas de producción bajo irrigación como en aquellos de secano. Los resultados permitieron estimar y espacializar el consumo hídrico agrícola total en la cuenca para el año de estudio, proporcionando una base cuantitativa para su gestión sostenible.

Para el cálculo de la huella hídrica para cada cultivo y sistema productivo se realizó atendiendo a varias publicaciones donde se utiliza fórmulas para conocer la HHV y HHA, aportando claridad sobre el origen del agua consumida de la producción agrícola:

$$\text{Huella verde (mm)} = \min (ETc, Pe)$$

$$\text{Huella azul (mm)} = ETc - \text{Huella verde (mm)}$$

Una vez determinados los valores en milímetros (láminas) y con el propósito de facilitar la interpretación comparativa de las huellas hídricas entre distintos cultivos y modelos productivos —en congruencia con lo reportado en otras estimaciones de huella hídrica dentro del ámbito agrícola—, dichas magnitudes se traducen a volumen por hectárea a través de la siguiente expresión matemática:

$$\text{Volumen (m}^3/\text{ha)} - \text{Lámina (mm)} * 10$$

Una vez que se dispone del consumo de agua por hectárea para cada tipo de cultivo (en metros cúbicos por hectárea), este valor se multiplica por la extensión total sembrada de ese cultivo, tal como se documenta en diversos inventarios o registros del sector agrícola (Er et al., 2025; Hassan y Rana, 2024; Iacuzzi et al., 2025; Mizyed et al., 2025) a fin de escalarla a nivel municipal:

$$HHV \text{ municipal} = \left(\frac{m^3}{ha} \text{ verde} \right) * (ha \text{ sembradas})$$

$$HHV \text{ municipal} = \left(\frac{m^3}{ha} \text{ azul} \right) * (ha \text{ sembradas})$$

Este mismo procedimiento se extendió a nivel de cuenca al sumar los valores de cada municipio para cada cultivo y la totalidad de ellos. Este escalonamiento permite cuantificar la carga hídrica global que representan esos cinco tipos de cultivo dentro de una delimitación territorial correspondiente al año 2023

$$HH \text{ total cuenca} = \sum (HH \text{ municipal por cultivo})$$

Resultados

Superficie agrícola y proporción entre sistemas de riego y temporal

La superficie total de la Cuenca de Cuitzeo tomando como referencia el SIATL (2026), comprende 3996.79 km², de los cuales 811.18 km² están dedicados a la actividad agrícola (Tabla 13). Esto representa 20.30 % de todo el territorio de la Cuenca de Cuitzeo. La distribución entre los dos sistemas de producción muestra una ligera predominancia en los cultivos de temporal, con 428.69 km² (52.8%), frente a 382.49 km² (47.2%) de los cultivos de riego. La relación entre ambos sistemas de producción tiene una relación muy cercana de 1:1 lo cual indica una dependencia a la agricultura de secano. Sin embargo, el sistema de riego es un componente estratégico en la región para la seguridad productiva y la diversificación de cultivos.

Tabla 13.- superficie agrícola total y por sistema de producción en la Cuenca de Cuitzeo en el 2023.

Sistema de Producción	Superficie (km ²)	Porcentaje total agrícola
Total bajo riego	382.49	47.2 %
Total de temporal	428.69	52.8 %
Total Agrícola	811.18	100 %

Fuente: datos tomados de las capas del SIAP (2024a).

Composición y predominio de los cultivos principales

El análisis por cultivo revela un claro predominio del cultivo de maíz en ambos sistemas, ocupando 628.89 (77.5% del área agrícola total). El sistema de riego del maíz ocupa 288.37 km², representando 75.40% del área total de riego, mientras que de temporal ocupa 340.52, siendo 79.43% del área total de temporal. Los cultivos que siguen en orden de importancia por área ocupada son el sorgo con 96.99 km² y el aguacate con 72.89 km² del total de la cuenca.

Existe una marcada diferencia en la asignación de sistemas de riego según el cultivo. Se observa que el aguacate esta cultivado predominantemente bajo riego (54.28 km² equivalentes a 14.19%). En cuanto a los cultivos de temporal es el tercero de importancia teniendo 18.61 km², (4.34%). En cuanto al cultivo de sorgo pasa todo lo contrario, presentando una mayor área en temporal (63.11 km², equivalentes a 14.72%), mientras que en riego la superficie es de 33.88 km², (8.86%). Sin embargo, otros cultivos

como el frijol mantienen una presencia equilibrada pero menor con un 11.84 km² del total seguido por el trigo con tan solo 0.57 km².

Análisis de la distribución municipal

La distribución de la agricultura es heterogénea entre los 28 municipios analizados. Tacámbaro es el único municipio que no presenta ninguna zona agrícola de los cultivos analizados, teniendo una superficie de 0.72 km² dentro de la cuenca, siendo el área más pequeña (Tabla 14). Por otro lado, el municipio de Morelia es más grande ocupando 1,052.34 km² (26.3% en la Cuenca de Cuitzeo). También, por su tamaño concentra la mayor superficie agrícola total (220.16 km²), que representan el 27.14% del total regional. Le siguen Tarímbaro con un área en la cuenca de 253.91 km² (6.35%), con 71.49 de área agrícola (8.81%); Álvaro Obregón con 158.42 km² de área en la cuenca (3.96%) con 71.20 km² de área agrícola (8.78%) y Zinapécuaro teniendo 422.31 km² en la cuenca (10.57%) con un área agrícola de 67.83 km² (8.36% de toda la cuenca).

En el extremo opuesto se tiene los municipios que menor área tienen dentro de la cuenca de Cuitzeo como Tacámbaro con 0.72 km² sin área agrícola; Huaniqueo con 5.52 km² (0.14%) y con 0.10 km² de área agrícola (0.01%); Hidalgo con 14.57 km² (0.36%) con un área agrícola de 0.39 km² (0.05%) y Yuridia con un área dentro de la cuenca de 17.09 km² (0.43%), con un área agrícola de 1.00 km² (representando el 0.12%).

Existen municipios con una alta dependencia al agua de riego en las zonas agrícolas en las que destacan cinco municipios por concretar el 60.66% de toda la cuenca de Cuitzeo. Comenzando con Álvaro Obregón que presenta 65.63 km² teniendo el 17.165% de la zona agrícola, seguido por Tarímbaro, con 46.49 km² (12.15%), Morelia con 46.46 km² (12.15%), Zinapécuaro con 37.48 km² (9.80%) e Indaparapeo con 35.96 km² (9.40%). En contraste solo cuatro municipios no requieren agua de riego dentro de la cuenca y son Tacámbaro, Huaniqueo, Yuridia y Moroleón.

Los municipios que predominan de agua de temporal, representan 64.94% del área total de la cuenca, siendo el primer lugar morelia con 173.70 km² (con 40.52% del total), en segundo lugar, esta Zinapécuaro con 30.36 km² (7.08%), Acámbaro con 25.26 km² (5.89), Tarímbaro con 25.00 (5.83%) y Cuitzeo con 24.06 (5.61%). Los municipios que menos área agrícola de uso de temporal representan tan solo 0.98% en su totalidad y corresponden a cinco municipios: Huaniqueo con 0.10 km², Hidalgo con 0.31 km², Madero con 0.87 km², Yuridia con 1.00 km² y Tzintzuntzan con 1.92 km².

Existen municipios que tienen una agricultura mixta equilibrada, presentando casi todos los cultivos exceptuando el trigo. Estos municipios son Álvaro obregón, Tarímbaro, Morelia, Indaparapeo, Copándaro, Chucándiro, Huiramba, Huandacareo y Uriangato.

Tabla 14.- Área de cultivos primordiales en la Cuenca de Cuitzeo

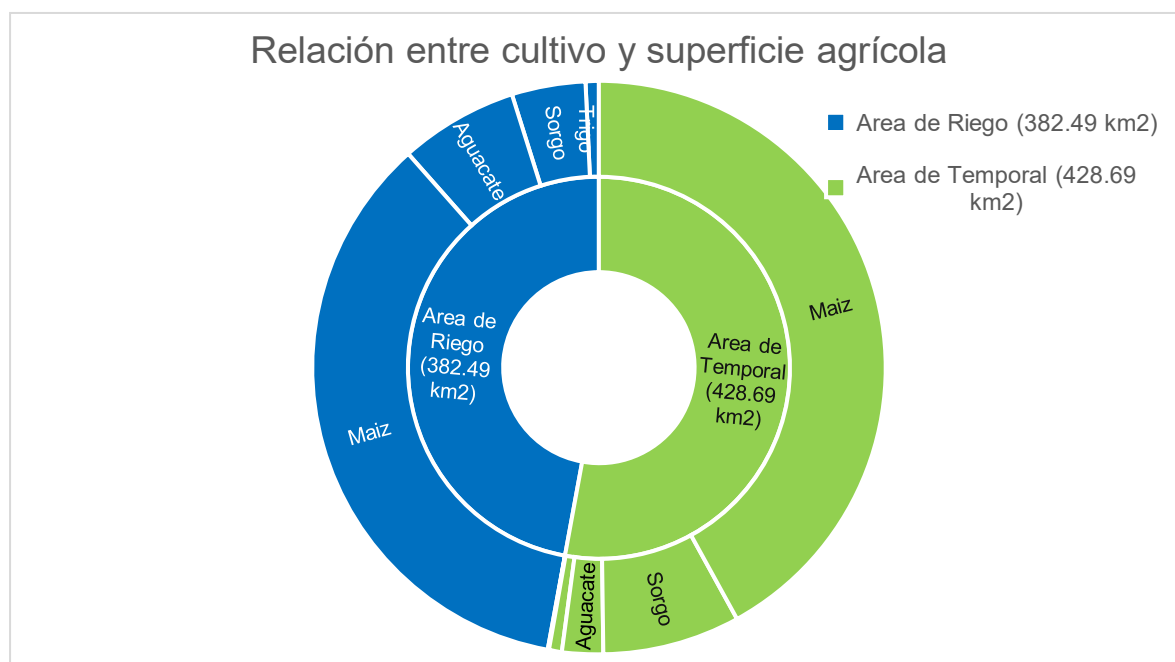
Municipio	Área km ²	% Área	Área de Riego (km ²)					Total Riego	Área de Temporal (km ²)					Total Temp	Total genera
			Aguacate	Frijol	Maíz	Sorgo	Trigo		Aguacate	Frijol	Maíz	Sorgo	Trigo		
Acámbaro	145.31	3.64			13.61	0.37		13.98		0.07	24.53	0.66		25.26	39.25
Acuitzio	137.16	3.43	18.03	0.01	9.26	0.41		27.70	1.26		12.29	0.17		13.72	41.42
Álvaro Obregón	158.42	3.96	0.15	2.77	59.68	3.02		65.63	0.01	1.27	4.00	0.30		5.58	71.20
Charo	199.82	5.00	1.59	0.19	10.79	0.42		12.99	0.71		6.10	0.81		7.62	20.61
Chucándiro	181.00	4.53	0.07	0.77	3.86	1.63		6.33	0.23	1.91	6.11	1.85		10.11	16.44
Copándaro	172.07	4.31	0.06	0.21	4.45	3.72		8.44	0.06	0.30	4.73	1.31		6.41	14.84
Cuitzeo	251.92	6.30	0.01	0.51	7.89	4.97		13.37		0.58	17.29	6.18		24.06	37.43
Hidalgo	14.57	0.36	0.07					0.07	0.03		0.29			0.31	0.39
Huandacareo	95.07	2.38	0.05	0.22	3.16	1.13		4.56	0.02	0.22	3.82	0.48		4.53	9.09
Huaniqueo	5.52	0.14									0.10			0.10	0.10
Huiramba	62.97	1.58	4.16		0.81			4.97	0.90		13.65	0.45		15.00	19.97
Indaparapeo	166.33	4.16	0.08	0.19	34.52	1.17		35.96	0.14	0.42	5.89	0.91		7.36	43.33
Lagunillas	71.99	1.80	0.94		5.24	0.55		6.73	0.10		11.70	1.35		13.16	19.89
Madero	3.98	0.10	0.79		0.09			0.88	0.32		0.53	0.02		0.87	1.75
Morelia	1052.34	26.33	17.08	0.01	25.04	4.34		46.46	5.22	0.05	134.74	33.70		173.70	220.16
Morelos	72.86	1.82	0.09		0.12			0.22	0.10		11.28	2.75		14.13	14.35
Moroleón	32.66	0.82								0.07	2.72	0.04		2.83	2.83
Pátzcuaro	81.20	2.03	2.20					2.20	1.46		4.85	0.41		6.73	8.93
Queréndaro	160.97	4.03	0.07		12.00	0.10	0.10	12.27	0.48		15.75	0.91	0.47	17.61	29.87
Quiroga	26.20	0.66	3.94					3.94	0.26		2.75	1.86		4.87	8.81
Salvatierra	61.83	1.55			0.71	0.01		0.72			5.50	0.08		5.58	6.30
Santa Ana Maya	103.34	2.59		0.48	23.73	5.57		29.79		0.53	5.77	1.98		8.29	38.07
Tacámbaro	0.72	0.02													
Tarímbaro	253.97	6.35	0.07	0.24	41.54	4.62		46.49	0.04	0.47	21.90	2.59		25.00	71.49
Tzintzuntzan	14.71	0.37	0.08					0.08	0.01		0.95	0.96		1.92	2.01
Uriangato	30.43	0.76	0.00	0.28	0.75	0.22		1.25	0.03	0.08	2.10	0.38		2.58	3.83
Yuriria	17.09	0.43									0.81	0.18		1.00	1.00
Zinapécuaro	422.31	10.57	4.73		31.13	1.63		37.48	7.23		20.36	2.77		30.36	67.83
Total	3996.79	100.00	54.28	5.87	288.37	33.88	0.10	382.49	18.61	5.97	340.52	63.1	0.47	428.69	811.1

Fuente: elaboración propia con base en el SIAP (2024a).

Relación entre cultivo y superficie agrícola

El área de cultivo dentro de la Cuenca de Cuitzeo de 811.18 km², de los cuales el sistema de riego presenta valores de 382.49 km² (47.15%) y el temporal de 428.69 km² (52.85%) (Fig. 37). De ambos sistemas, el cultivo de maíz abarca 628.89 km² ocupando 77.53% de toda la cuenca, 340.52 km² sistema de temporal y 288.37 km² en sistema de riego.

Figura 37.- Relación de área entre los sistemas de riego y temporal de los cultivos agrícolas



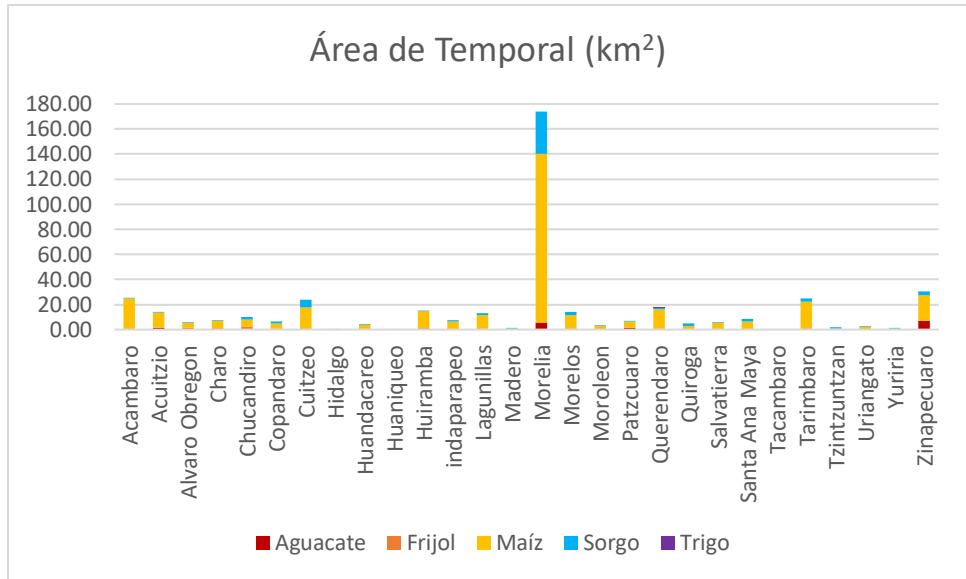
Fuente: elaboración propia con base en las capas del SIAP (2024a). para la Cuenca de Cuitzeo 2023

Existen municipios con mayor área de cultivo de maíz, donde en el sistema temporal se requieren 3 para abarcar el 53.20 % de toda la cuenca, siendo Morelia en primer lugar con 134.74 km² (39.57% de toda la cuenca), segundo Acámbaro con 24.53 km² (7.20%) y por último Tarímbaro con 21.90 km² (6.43%) (Fig. 38). En cuanto al sistema de riego solo cuatro municipios abarcan el 57.87%, donde Álvaro Obregón está en primer lugar con 59.68 km² (20.70%), seguido por Tarímbaro 41.54 km² (14.41%), le sigue Indaparapeo con 34.52% (11.97%) y Zinapécuaro con 31.13 km² (10.79%) (Fig. 39).

El sorgo es el segundo cultivo más importante de los cultivos que se están analizando teniendo un área de 97.00 km² (11.96% de toda la cuenca). El sistema de temporal para esta área solo Morelia ocupa el 33.70 km² (53.40%). Sin embargo, en el

sistema de riego se requieren 4 municipios para ocupar el 57.55%, siendo principalmente Santa Ana Maya con 5.57 km² (16.45%), le sigue Cuitzeo con 4.97 km² (14.66%), Tarímbaro con 4.62 km² (13.65%) y Morelia con 4.34 km² (12.80%).

Figura 38.- Áreas de cultivo agrícola en la Cuenca de Cuitzeo 2023 en sistema de temporal

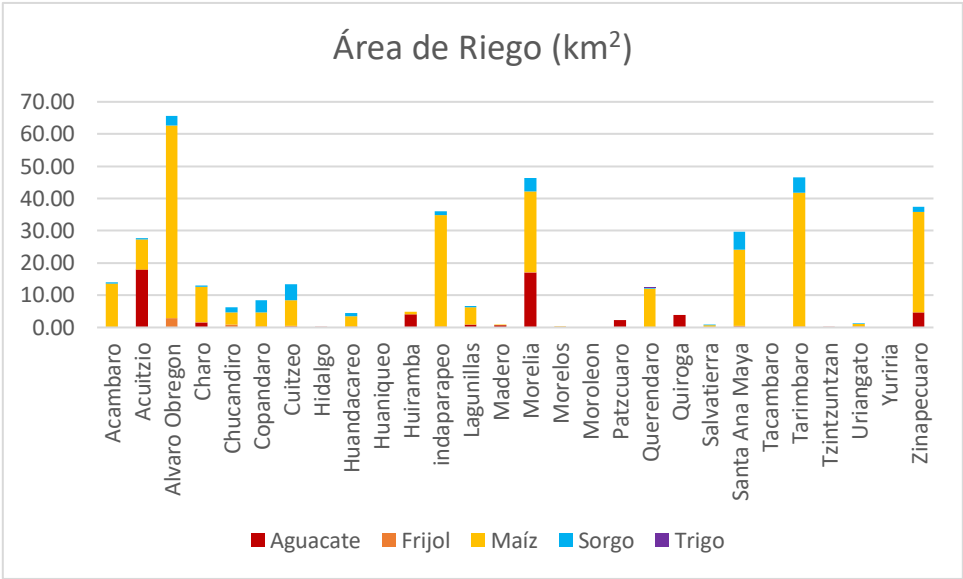


Fuente: elaboración propia con base en el SIAP (2024a).

La superficie dedicada al aguacate es de 72.89%. Su cultivo bajo riego representa 54.28 km² (14.19%) y está concentrado principalmente en dos municipios: Acuitzio con 18.03 km² (33.21%) y Morelia con 17.08 km² (31.47%), en total suman un 64.68% de este sistema. Para el sistema de temporal se observa un patrón de mayor dispersión de los 18.61 km², (4.34% de toda la cuenca). Los municipios que destacan son Zinapécuaro con 7.23 km² (38.82%) y Morelia con 5.22 km² (28.03%). Municipios como Cuitzeo, Santa Ana Maya, Acámbaro, Yuridia, Salvatierra, Moroleón, Huaniqueo y Tacámbaro no presentan cultivo de este frutal dentro de la cuenca de Cuitzeo.

El frijol ocupa una superficie de 11.84 km² (1.46%), teniendo una superficie de riego de 5.87 km² (1.53%), siendo los dos mayores productores Álvaro Obregón (2.77 km²) y Chucándiro (0.77 km²). El sistema de temporal representa 5.97 km², distribuidos en Chucándiro (1.91 km²) y Álvaro Obregón (1.27 km²) ambos son los máximos productores de esta leguminosa. Es notable la ausencia de este cultivo en la mayoría de los municipios bajo riego y su presencia en temporal también es muy limitada, indicando su rol como cultivo de rotación o de autoconsumo.

Figura 39.- Áreas de cultivo agrícola en la Cuenca de Cuitzeo 2023 en sistema de riego



Fuente: elaboración propia con base en el SIAP (2024a).

En cuanto al cultivo de trigo este se considera marginal, pues ocupa únicamente 0.57 km² (0.57% de toda la cuenca). Su presencia es exclusiva en Queréndaro, en las modalidades de riego (0.10 km²) y temporal (0.47 km²). Por tal motivo es excluido dentro del análisis dentro de la Cuenca de Cuitzeo.

Distribución espacial de la huella hídrica de los diferentes sistemas de los cultivos de importancia

Huella hídrica verde de riego de Aguacate

La huella hídrica verde del aguacate bajo riego presenta una variabilidad muy alta, con valores que oscila entre los 503 a 191,461 m³/año. La media general es de 76,781.67 m³/año, mientras que su desviación estándar refleja una dispersión considerable entre parcelas (Tabla 15). Sin embargo, la mayor parte de las unidades productivas se concentran en el rango inferior, lo que indica que el componente pluvial aporta de manera significativa al requerimiento hídrico del cultivo, incluso en sistemas de riego. No obstante, existe un número muy pequeño de parcelas con valores elevados que asimilan el requerimiento hídrico de los rangos inferiores, lo que evidencia contrastes territoriales en el aprovechamiento del agua verde.

El conjunto, los resultados muestran que el aporte pluvial en el aguacate de riego no es homogéneo dentro de la cuenca, sino que presenta diferencias espaciales marcadas que influyen en el balance hídrico del sistema productivo.

Tabla 15.- Descripción de la huella hídrica verde ($m^3/año$) del Aguacate de riego por intervalos de clasificación.

Huella Hídrica verde de Aguacate de riego								
Rango $m^3/año$		Parcelas		$m^3/año$				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	387,496	671	3,284.98	32,265,665.00	503.00	498,139.00	48,085.94	69,596.17
387,497	774,517	24	1,254.97	12,647,136.00	400,101.00	752,237.00	526,964.00	109,394.76
774,518	1,161,538	3	269.17	2,727,310.00	794,227.00	1,132,214.00	909,103.33	157,786.37
1,161,539	1,548,559	2	275.02	2,796,167.00	1,360,482.00	1,435,685.00	1,398,083.50	37,601.50
1,548,560	1,935,580	2	343.70	3,464,456.00	1,549,846.00	1,914,610.00	1,732,228.00	182,382.00
Total		702	5,427.83	53,900,734.00	503.00	1,914,610.00	76,781.67	169,416.47

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución del SIAP (2024a)..

En el mapa de distribución los valores bajos de huella hídrica verde en riego se distribuyen de manera generalizada en todos los municipios de la cuenca, exceptuando Uriangato, Cuitzeo, Acámbaro, Santa Ana Maya, Salvatierra y Yuridia (Fig. 40). En contraste, los rangos intermedios se concentran en un número reducido de municipios, destacando Acuitzio, Huiramba, Lagunillas, Morelia, Charo y Zinapécuaro.

Los valores más altos se concentran en Morelia y Acuitzio, y en menor medida Quiroga y Huiramba. En conjunto, el patrón observado evidencia una amplia presencia de niveles bajos de HHV y una concentración espacial progresiva de los valores más elevados en municipios específicos de la cuenca.

Huella hídrica azul de riego de Aguacate

Respecto a la huella hídrica azul del aguacate en situación de riego muestra una estructura distributiva altamente concentrada en los rangos inferiores, donde se ubica la mayoría de las parcelas, lo que indica que el sistema productivo opera mayormente con niveles moderados de extracción por hectáreas (Tabla 16). Conforme avanza los intervalos superiores se observa una disminución significativa en el número de unidades productivas

y un incremento sustancial en los volúmenes aplicados. Sin embargo, en los tres últimos rangos encontramos parcelas similares a HHV de riego.

Los rangos entre valor mínimo y máximo, junto con una desviación estándar elevada respecto a la media, revela una heterogeneidad en la intensidad del uso del agua de riego. Esta configuración sugiere la coexistencia de esquemas productivos diferenciados dentro de la cuenca, posiblemente asociados a variaciones en infraestructura de riego, manejo agronómico o economía de la región.

Tabla 16.- Descripción de la huella hídrica azul ($m^3/año$) del Aguacate de riego por intervalos de clasificación.

Huella Hídrica azul de Aguacate de riego								
Rango $m^3/año$		Parcelas		$m^3/año$				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	387,496	671	3,284.98	32,022,448.52	475.73	378,854.00	47,723.47	67,945.42
387,497	774,517	24	1,254.97	12,795,209.00	404,484.00	759,045.00	533,133.71	111,972.82
774,518	1,161,538	3	269.17	2,743,318.00	801,072.00	1,137,440.00	914,439.33	157,692.65
1,161,539	1,548,559	2	275.02	2,824,180.00	1,372,770.00	1,451,410.00	1412090	39,320.00
1,548,560	1,935,580	2	343.70	3,496,920.00	1,561,340.00	1,935,580.00	1748460	187,120.00
Total		702	5,427.83	53,882,075.52	475.73	1,935,580.00	76,755.09	170,349.19

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución.

La huella hídrica azul de aguacate en sistema de riego muestra un patrón espacial de concentración progresiva. El primer rango, que agrupa 671 parcelas, se distribuye en toda la cuenca menos en Uriangato, Cuitzeo, Acámbaro, Santa Ana Maya salva tierra y Yuridia, indicando que los niveles bajos son predominantes. Sin embargo, conforme aumentan los rangos, el número de parcelas disminuye y la distribución se focaliza principalmente en Acuitzio y Morelia, seguidos por Quiroga, Huiramba y Zinapécuaro (Figura 40). Los valores más altos se concentran en un número reducido de municipios, lo que evidencian una intensificación territorial del uso del agua de riego en zonas específicas de la cuenca.

Huella hídrica verde de temporal de Aguacate

La huella hídrica verde del aguacate de temporal muestra una marcada heterogeneidad espacial, con valores que oscilan entre 462.95 y 405,781.39 $m^3/año$ con una media general de 27,667.38 $m^3/año$ (Tabla 17). La mayor parte de las parcelas (99 %) se concentra dentro del rango inferior, lo que indica que el sistema productivo opera

predominantemente bajo condiciones relativamente homogéneas de aprovechamiento pluvial.

Sin embargo, los valores elevados de 405,781.39 m³/año, hace que incremente significativamente la media y la desviación estándar, lo cual evidencia una distribución asimétrica positiva y una alta variabilidad entre las unidades productivas. Estas dispersiones pueden sugerir que exista diferencias agroecológicas dentro de la cuenca asociadas a factores como el microclima, características edáficas, condiciones topográficas las dimensiones del terreno.

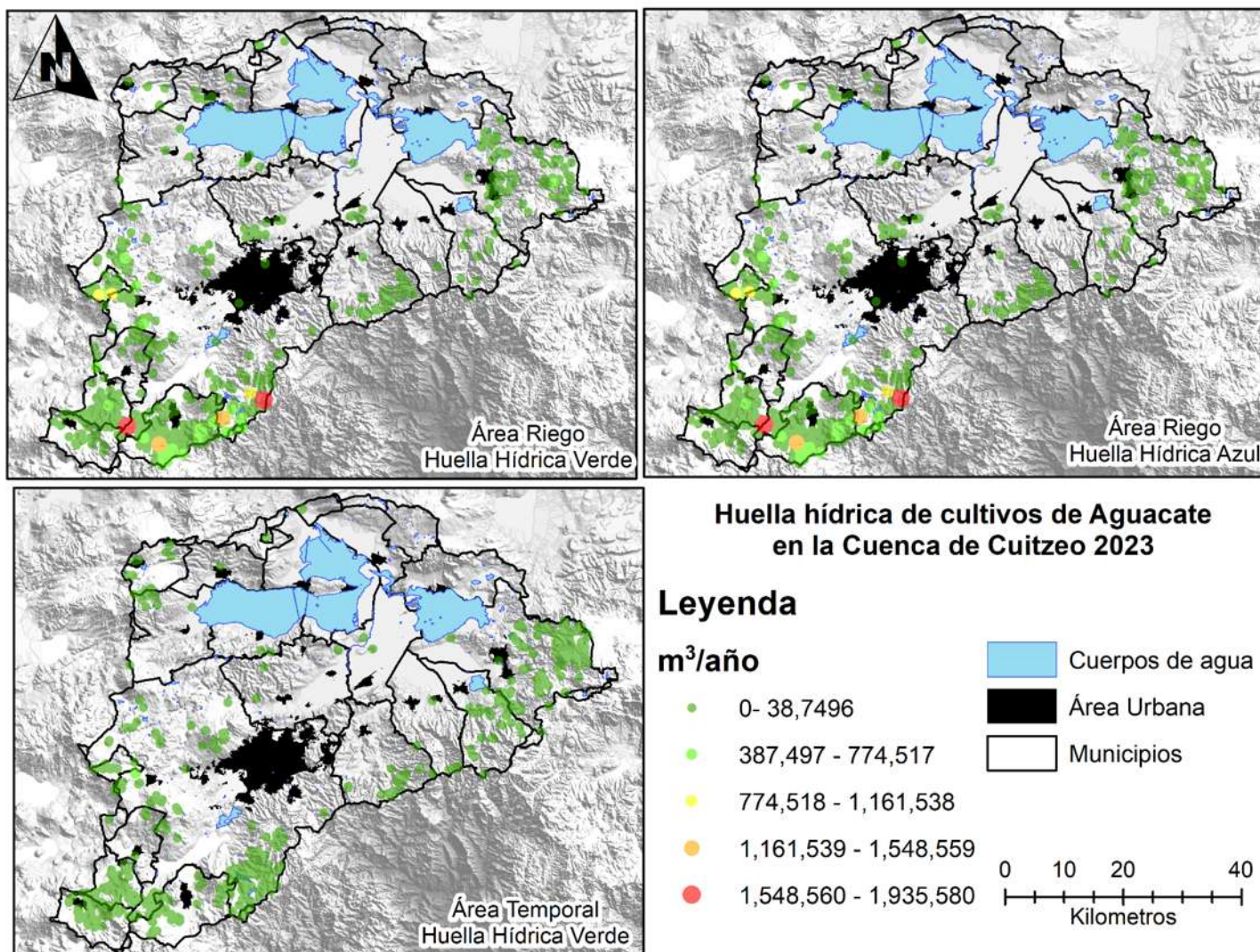
Tabla 17.- Descripción de la huella hídrica verde (m³/año) del Aguacate de temporal por intervalos de clasificación.

Huella Hídrica Verde de Aguacate de temporal								
Rango m ³ /año		Parcelas		m ³ /año				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	387,496	602	1,817.90	16,332,982.36	462.95	290,526.21	27,131.20	38,177.63
387,497	774,517	1.00	40.86	405,781.39	405,781.39	405,781.39	405,781.39	0.00
774,518	1,161,538	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,161,539	1,548,559	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,548,560	1,935,580	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total		603	1,858.77	16,738,763.75	462.95	405,781.39	27,759.14	41,139.89

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución del SIAP (2024a).

La Huella Hídrica Verde del aguacate de temporal presenta una amplia distribución en el rango más bajo (603 parcelas), cubriendo casi toda la cuenca, con excepción de los municipios como Acámbaro, Salvatierra, Yuridia, Santa Ana Maya, Hidalgo y Huaniqueo (Fig. 40).

Figura 40.- Distribución de Huella Hídrica de cultivos de aguacate en la Cuenca de Cuitzeo.



Fuente: elaboración propia con datos de SIAP (2024a)..

Huella hídrica verde de riego de Maíz

La Huella Hídrica verde (HHV) del maíz bajo riego se concentra principalmente en el rango inferior (0–85,479 m³), donde se ubica la gran mayoría de las parcelas (13,655), abarcando 274,684,731 ha (Tabla 18). En contraste, los rangos superiores presentan un reducido número de parcelas, con solo 30 en el tercero, 4 en el cuarto rango y 2 en el quinto. En términos generales, los valores oscilan entre 533 y 416,643 m³/año, con una media general de 21,861.80 m³, lo que indica que el uso de agua azul en el cultivo de maíz bajo riego se mantiene predominantemente en niveles bajos dentro de la cuenca.

Tabla 18.- Descripción de la huella hídrica verde (m³/año) del Maíz de riego por intervalos de clasificación.

Huella Hídrica verde de Maíz de riego								
Rango m³/año		Parcelas		m³				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	85,479	13,655	26,152.28	274,684,731.00	533.00	85,396.00	274684731	14,307.35
85,480	170,470	178	1,914.74	20,329,279.00	85,590.00	167,954.00	114,209.43	22,722.48
170,471	255,461	30	576.08	6,169,797.00	171,623.00	254,156.00	205,659.90	23,875.55
255,462	340,452	4	112.53	1,195,773.00	281,984.00	334,136.00	298,943.25	20,582.18
340,453	425,443	2	81.40	821,764.00	405,121.00	416,643.00	410,882.00	5,761.00
	Total	13,869	28,837.04	303,201,344.00	533.00	416,643.00	21861.80	20,952.83

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución del SIAP (2024a).

El análisis espacial de la huella hídrica verde del maíz bajo riego muestra que el primer rango concentra la mayor cantidad de parcelas (13,655), distribuidas en la mayor parte de los municipios de la cuenca, con excepción de Quiroga, Hidalgo, Pátzcuaro, Moroleón, Tzintzuntzan y Yuriria (Fig. 41).

El segundo rango presenta 178 parcelas localizadas en municipios similares al primer intervalo, no se registran en Chucándiro, Charo, Acámbaro, Madero y Salvatierra. En el tercer rango se identifican 30 parcelas, con ausencia en Indaparapeo, Queréndaro, Huiramba y Lagunillas.

Finalmente, el cuarto rango está representado por únicamente 4 parcelas, en Tarímbaro, Indaparapeo y dos en Álvaro Obregón, lo que evidencia que los valores más altos de huella hídrica verde de maíz se concentran en un número muy reducido de municipios dentro de la cuenca.

Huella hídrica azul de riego de Maíz

La Huella Hídrica Azul del maíz bajo riego se concentra principalmente en el primer rango (0–85,479 m³/año), donde se ubican 13,640 parcelas que abarcan la mayor parte de la superficie analizada (Tabla 19). Los rangos superiores presentan un número considerablemente menor de parcelas, con 193 en el segundo intervalo, 28 en el tercero y solo 8 en los dos rangos más altos.

En términos generales, los valores varían entre 488 y 425,443 m³/año, con una media de 22,273.07 m³/año, lo que indica que el uso de agua azul en el maíz bajo riego se concentra mayoritariamente en intervalos bajos dentro de la cuenca.

Tabla 19.- Descripción de la huella hídrica azul (m³/año) del Maíz de riego por intervalos de clasificación.

Huella Hídrica azul de Maíz de riego								
Rango m³/año		Parcelas		m³/año				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	85,479	13,640	26,035.19	278,494,092.34	488.00	85,401.80	20,417.46	14,485.90
85,480	170,470	193	2,031.84	22,061,605.51	85,503.60	170,370.00	114,308.84	23,599.90
170,471	255,461	28	528.64	206,211.93	175,730.00	249,033.00	206,211.93	21,550.73
255,462	340,452	5	128.72	1,399,361.00	258,476.00	296,182.00	279,872.20	17,144.98
340,453	425,443	3	112.65	1,176,227.00	341,250.00	425,443.00	392,075.67	36,521.32
	Total	13,869	28,837.04	308,905,219.85	488	425,443.00	22,273.07	21,413.36

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución del SIAP (2024a).

La distribución espacial de la Huella Hídrica Azul del maíz bajo riego muestra que el primer rango concentra la mayor cantidad de parcelas (13,640), las cuales se distribuyen en la mayor parte de la cuenca, con excepción de los municipios de Hidalgo, Huaniqueo, Yuriria, Moroleón, Quiroga, Tzintzuntzan y Pátzcuaro (Fig. 41).

El segundo rango (193 parcelas) presenta una distribución muy similar al primero, aunque también se observa ausencia de parcelas en el municipio de Chucándiro. En el tercer rango la distribución comienza a reducirse, dejando de registrarse parcelas en Queréndaro, Huandacareo, Lagunillas, Huiramba e Indaparapeo.

Los rangos superiores presentan una clara focalización territorial. El cuarto rango se localiza únicamente en los municipios de Tarímbaro, Indaparapeo y Álvaro Obregón, mientras que el quinto rango se concentra exclusivamente en Tarímbaro y Álvaro Obregón.

Huella hídrica verde de temporal de Maíz

La Huella Hídrica Verde del maíz de temporal se concentra principalmente en el primer rango (0–85,479 m³/año), donde se ubican 16,208 parcelas que abarcan 32,636.76 ha, representando casi la totalidad del área analizada (Tabla 20).

Los rangos superiores presentan muy pocas parcelas, con 12 en el segundo rango y 3 en el tercero, mientras que en los rangos más altos no se registran valores. En total se contabilizan 16,223 parcelas con una media general de 5,767.61 m³/año, lo que indica que la mayor parte de la huella hídrica verde se encuentra en niveles bajos dentro de la zona de estudio.

Tabla 20.- Descripción de la huella hídrica verde (m³/año) del Maíz de temporal por intervalos de clasificación.

Huella Hídrica verde de Maíz de temporal								
Rango m ³ /año		Parcelas		m ³ /año				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	85,479	16,208	32,636.76	91,571,662.58	16.07	84,386.95	5,649.78	6,812.77
85,480	170,470	12	121.14	1,372,831.80	85,488.78	164,151.90	114,402.65	22,821.08
170,471	255,461	3	54.28	623,466.63	186,475.91	223,209.39	207,822.21	15,577.13
255,462	340,452	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
340,453	425,443	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total		16,223	32,812.17	93,567,961.01	16.07	223,209.39	5,767.61	7,943.18

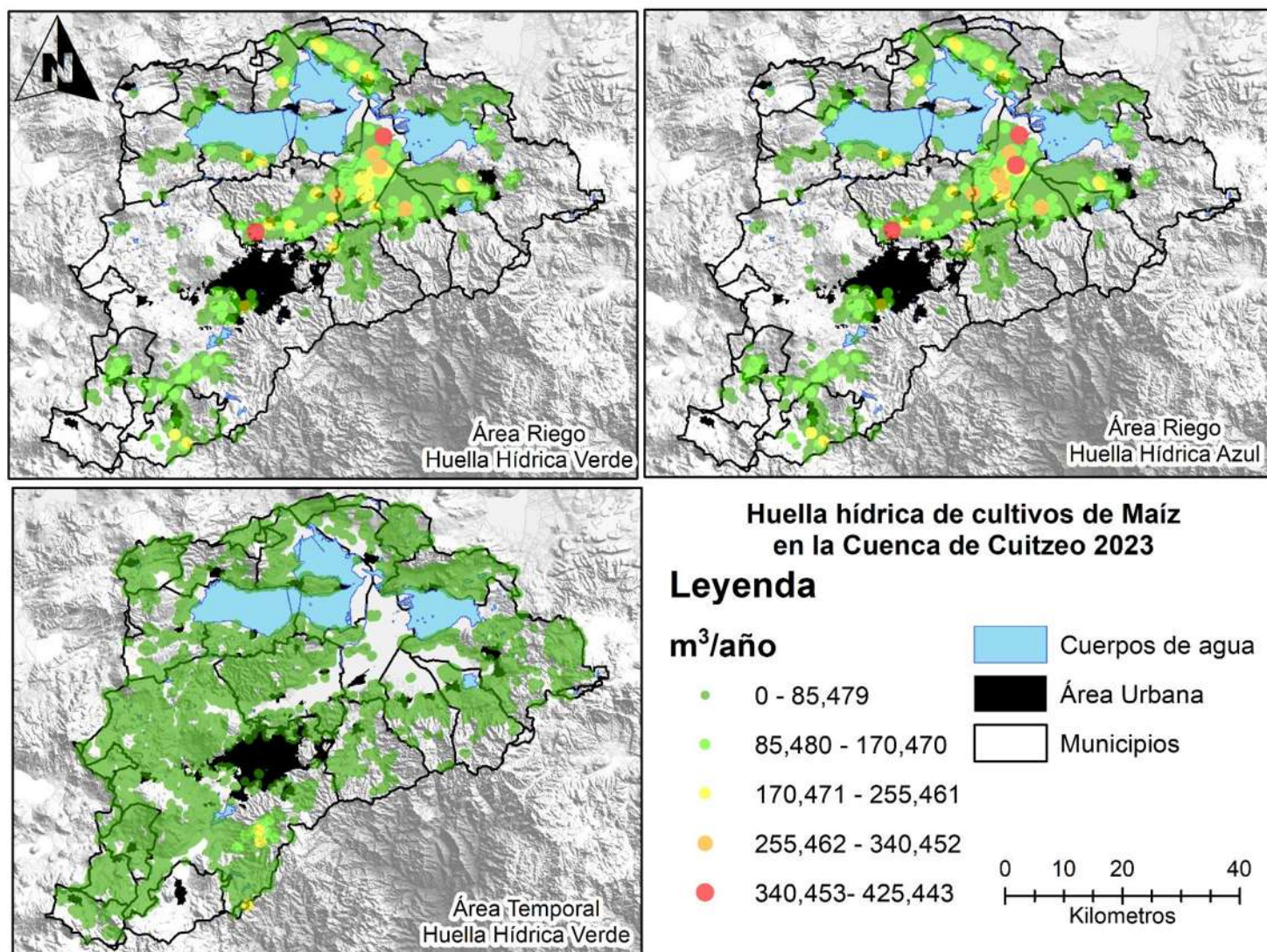
Fuente; elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución.

La distribución espacial de la huella hídrica verde del maíz de temporal muestra que el primer rango (0–85,479 m³/año) es el predominante, con 16,208 parcelas, las cuales se encuentran distribuidas en toda la cuenca, indicando que la mayor parte de la producción presenta valores bajos de huella hídrica (Fig. 41).

El segundo rango (85,480–170,470 m³/año) incluye 12 parcelas, localizadas únicamente en el municipio de Morelia, lo que refleja una concentración puntual de valores intermedios.

Finalmente, el tercer rango (170,471–255,461 m³/año) presenta solo 3 parcelas, de las cuales una se localiza en Madero y dos en Morelia, mostrando que los valores más altos de huella hídrica verde son escasos y se concentran en estos municipios.

Figura 41.- Distribución de Huella Hídrica de cultivos de maíz en la Cuenca de Cuitzeo



Fuente: elaboración propia con datos de SIAP (2024a).

Huella hídrica verde de riego de Sorgo

La Huella Hídrica Verde del sorgo de riego se concentra principalmente en el primer rango (0–47,303 m³/ha/año), donde se ubican 1,536 parcelas que abarcan la mayor parte del área analizada (Tabla 21).

Los rangos superiores presentan menos parcelas: 63 en el segundo rango, 16 en el tercero, 4 en el cuarto y 1 en el rango más alto. En total se registran 1,620 parcelas con una media general de 19,669.62 m³/año, lo que indica que la mayoría de los valores de huella hídrica verde se mantienen en niveles bajos dentro del área de estudio.

Tabla 21.- Descripción de la huella hídrica verde (m³/año) del Sorgo de riego por intervalos de clasificación.

Huella Hídrica verde de Sorgo de riego								
Rango m ³ /año		Parcelas		m ³ /año				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	47,303	1,536	2,677.99	25,171,341.00	476.00	47,202.00	16387.5918	9,919.87
47,304	94,133	63	421.68	3,980,277.00	47,410.00	93,502.00	63179	12,623.39
94,134	140,962	16	195.25	1,831,599.00	94,355.00	136,640.00	114,474.94	16,308.87
140,963	187,792	4	69.22	653,444.00	145,295.00	178,381.00	163,361.00	14,374.71
187,793	234,622	1	23.99	228,127.00	228,127.00	228,127.00	228,127.00	0.00
Total		1,620	3,388.13	31,864,788.00	476.00	228127	19669.62	18,789.44

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución del SIAP (2024a).

La distribución espacial de la HHV del sorgo de riego muestra que el intervalo uno concentra la mayor cantidad de parcelas (1,536), distribuidas en gran parte de la cuenca, aunque no se presentan en los municipios de Pátzcuaro, Huiramba, Tzintzuntzan, Quiroga, Huaniqueo, Morelos, Moroleón, Yuriria e Hidalgo (Fig. 42).

En el intervalo dos se identifican 63 parcelas, con una distribución similar al primer intervalo, aunque tampoco se encuentran en Acuitzio, Charo, Queréndaro, Salvatierra y Uriangato. Sin embargo, el intervalo tres presenta 16 parcelas, localizadas en Huandacareo, Uriangato, Cuitzeo, Santa Ana Maya, Álvaro Obregón, Tarímbaro y Zinapécuaro.

En el intervalo cuatro solo se registran 4 parcelas, ubicadas en Chucándiro, Cuitzeo, Tarímbaro y Álvaro Obregón, mientras que el intervalo 5 presenta una sola parcela,

localizada en Santa Ana Maya. Esto indica que los valores más altos de huella hídrica verde son escasos y se concentran en pocos municipios.

Huella hídrica azul de riego de Sorgo

La Huella Hídrica Azul (HHA) del sorgo de riego se concentra principalmente en el primer rango (0–47,303 m³/año), donde se ubican 1,534 parcelas, que representan la mayor parte del área analizada (Tabla 22).

Los rangos superiores presentan menos parcelas: 62 en el segundo rango, 18 en el tercero, 5 en el cuarto y 1 en el rango más alto. En total se registran 1,620 parcelas con una media general de 20,108.03 m³/año, lo que indica que la mayor parte de la HHA se mantiene en niveles bajos dentro de la zona de estudio.

Tabla 22.- Descripción de la huella hídrica azul (m³/año) del Sorgo de riego por intervalos de clasificación.

Huella Hídrica azul de Sorgo de riego								
Rango m ³ /año		Parcelas		m ³ /año				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	47,303	1,534	2,670.80	25,635,184.90	474.00	47,117.20	16,711.33	10,078.44
47,304	94,133	62	399.46	3,872,952.99	48,019.80	93,587.40	62,466.98	11,633.00
94,134	140,962	18	208.69	2,022,368.80	94,348.80	139,952.00	112,353.82	17,015.42
140,963	187,792	5	85.19	809,884.00	143,058.00	183,055.00	161,976.80	15,962.66
187,793	234,622	1	23.99	234,622.00	234,622.00	234,622.00	234,622.00	0.00
Total		1,620	3,388.13	32,575,012.69	474.00	234,622.00	20,108.03	19,236.23

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución del SIAP (2024a).

El intervalo uno concentra la mayor cantidad de parcelas (1,536), distribuidas en gran parte de la cuenca, aunque no se presentan en Pátzcuaro, Huiramba, Tzintzuntzan, Quiroga, Huaniqueo, Morelos, Moroleón, Yuriria e Hidalgo.

El intervalo dos incluye 63 parcelas, con una distribución similar al intervalo anterior, pero sin presencia en Acuitzio, Charo, Queréndaro, Zinapécuaro, Acámbaro, Salvatierra y Uriangato.

El intervalo tres presenta 18 parcelas, localizadas principalmente en Tarímbaro, Álvaro Obregón, Cuitzeo, Huandacareo, Uriangato y Santa Ana Maya.

El intervalo cuatro registra cinco parcelas, ubicadas en Chucándiro, Cuitzeo, Tarímbaro, Álvaro Obregón y Zinapécuaro, mientras que el intervalo cinco presenta una sola parcela, localizada en Santa Ana Maya, mostrando que los valores más altos de huella hídrica se concentran en pocos municipios.

Huella hídrica verde de temporal de Sorgo

La huella hídrica verde del sorgo de temporal se concentra en toda la cuenca desde el primer intervalo (0-47,303 m³/año), presentándose 2,842 parcelas, que representan el área mayor analizada (Tabla 23).

Sin embargo, solo se encuentra una parcela concentrándose en el segundo rango con 65,553.90 m³/año. Entre ambos rangos se puede sumar 2843 parcelas en toda la cuenca. Sin embargo, en intervalos superiores no se encuentra ninguna parcela.

Tabla 23.- Descripción de la huella hídrica verde (m³/año) del Sorgo de temporal por intervalos de clasificación.

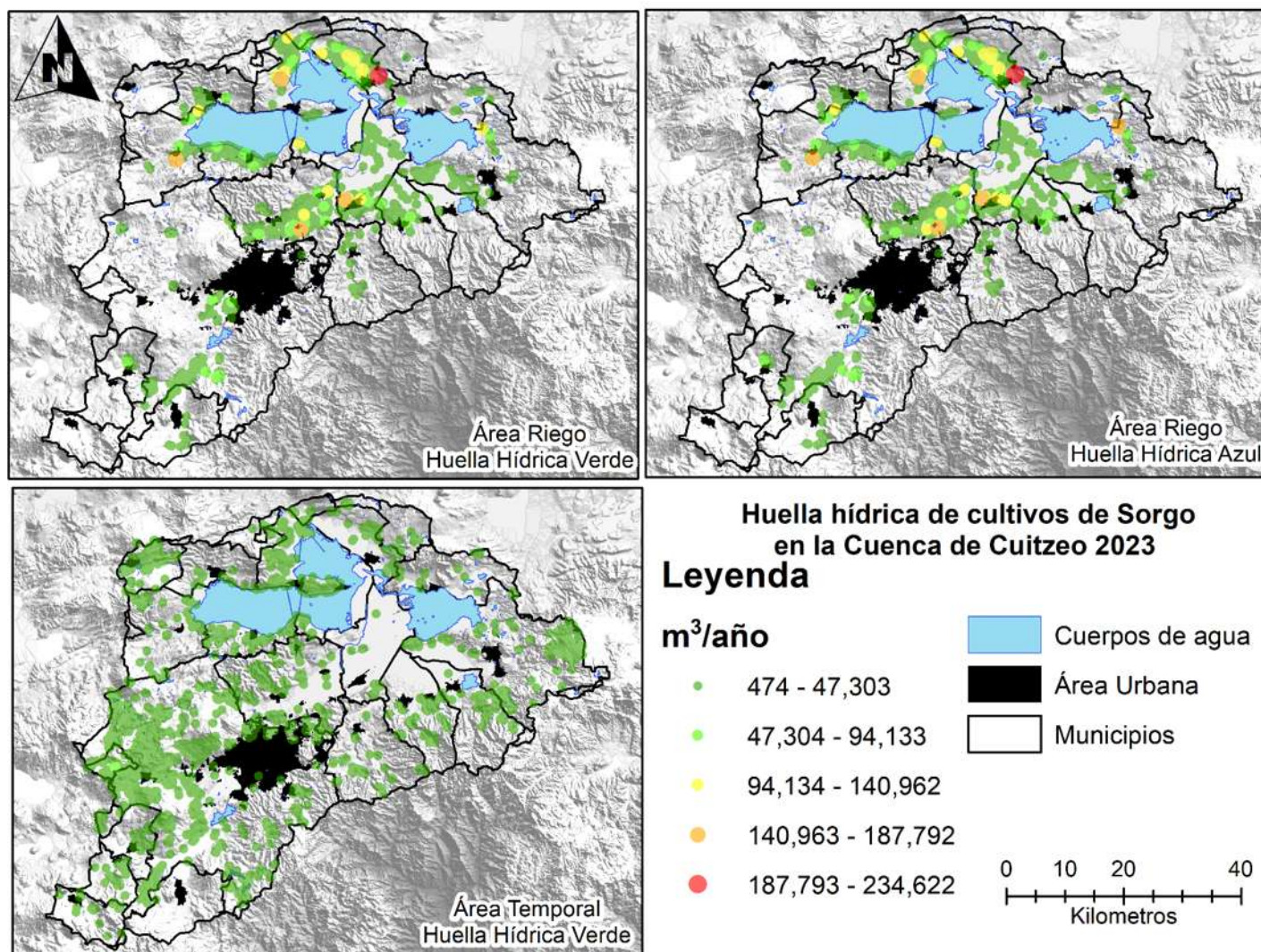
Huella Hídrica verde de Sorgo de temporal								
Rango m ³ /año		Parcelas		m ³ /año				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	47,303	2,842	6,266.20	13,156,633.12	50.42	46,971.31	4629.357186	5,100.99
47,304	94,133	1	28.66	65,553.90	65,553.90	65,553.90	65,553.90	0.00
94,134	140,962	0	0	0	0	0	0	0
140,963	187,792	0	0	0	0	0	0	0
187,793	234,622	0	0	0	0	0	0	0
Total		2,843	6,294.86	13,222,187.02	50.42	65,553.90	4,650.79	5,226.48

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución del SIAP (2024a).

Las parcelas analizadas dentro de la cuenca (2,843) para la huella hídrica del sorgo en el sistema temporal se concentran prácticamente en toda la cuenca. La gran mayoría se encuentra en Morelia, seguida por Zinapécuaro, Morelos, Santa Ana Maya y Tarímbaro principalmente (Fig. 42).

Solo se registra un punto en la parte sur de Quiroga teniendo una superficie de 28.66 ha con 65,553.90 m³/año, siendo de los valores más altos.

Figura 42.- Distribución de Huella Hídrica de cultivos de sorgo en la Cuenca de Cuitzeo



Fuente: elaboración propia con datos de SIAP (2024a).

Huella hídrica verde de riego de Frijol

La Huella Hídrica Verde del Frijol de riego se concentra principalmente en el primer rango (0–40,516 m³/ha/año), donde se registran 250 parcelas que abarcan la mayor parte del área analizada (Fig. 24).

Los rangos superiores presentan muy pocas parcelas: 23 en el segundo rango, 2 en el tercero y 1 en el rango más alto, mientras que uno de los rangos intermedios no presenta registros. En total se contabilizan 276 parcelas, con una media general de 20,207.63 m³/ha/año, lo que indica que la mayor parte de los valores de huella hídrica verde se mantienen en niveles bajos.

Tabla 24.- Descripción de la huella hídrica verde (m³/año) del Frijol de riego por intervalos de clasificación

Huella Hídrica verde de Frijol de riego								
Rango m³/año		Parcelas		m³/año				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	40,516	250	426.77	4,027,406.00	1,643.00	40,156.00	16109.624	9,449.10
40,517	79,367	23	121.51	1,157,574.00	41,263.00	77497	50329.30435	10,767.80
79,368	118,218	2	18.59	198,497.00	90,229.00	108,268.00	99,248.50	9,019.50
118,219	157,069	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
157,070	195,921	1	19.79	193,829.00	193,829.00	193,829.00	193,829.00	0.00
	Total	276	586.66	5,577,306.00	1,643.00	193829.00	20207.63044	18,342.23

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución del SIAP (2024a).

El rango uno concentra la mayor cantidad de parcelas (250), distribuidas principalmente en los municipios de Acuitzio, Morelia, Charo, Tarímbaro, Copándaro, Chucándiro, Huandacareo, Uriangato, Cuitzeo, Álvaro Obregón, Santa Ana Maya e Indaparapeo (Fig. 43).

En el rango dos se identifican 23 parcelas, localizadas en Chucándiro, Uriangato, Álvaro Obregón, Indaparapeo y Huandacareo.

El rango tres presenta solo dos parcelas, ubicadas en Santa Ana Maya y Álvaro Obregón. No se registran parcelas en el rango cuatro, mientras que en el rango cinco se identifica una sola parcela en Chucándiro, con una superficie de 19.79 ha, lo que indica que los valores más altos de huella hídrica verde son poco frecuentes y se concentran en pocos municipios.

Huella hídrica azul de riego de Frijol

La Huella Hídrica Azul del frijol de riego se concentra principalmente en el primer rango (0–40,516 m³/año), donde se registran 249 parcelas, representando la mayor parte del área analizada (Tabla 25).

Los rangos superiores presentan pocas parcelas: 23 en el segundo rango, 3 en el tercero y 1 en el rango más alto, mientras que uno de los rangos intermedios no presenta registros. En total se contabilizan 276 parcelas, con una media general de 20,517.69 m³/año, lo que indica que la mayoría de los valores de huella hídrica azul se mantienen en niveles bajos.

Tabla 25.- Descripción de la huella hídrica azul (m³/año) del Frijol de riego por intervalos de clasificación

Huella Hídrica azul de Frijol de riego								
Rango m³/año		Parcelas		m³/año				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	40,516	249	416.01	3,998,680.17	1,664.96	40,182.10	16,058.96	9,403.66
40,517	79,367	23	121.51	1,175,181.80	41,896.80	78,638.00	51,094.86	10,926.71
79,368	118,218	3	29.35	293,099.30	91,334.90	110,182.00	97699.76563	8,826.85
118,219	157,069	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
157,070	195,921	1	19.79	195,921.00	195,921.00	195,921.00	195,921.00	0.00
	Total	276	586.66	5,662,882.27	1,664.96	195,921.00	20,517.69	19,043.28

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución del SIAP (2024a).

El rango uno concentra la mayor cantidad de parcelas (249–250), distribuidas principalmente en Acuitzio, Morelia, Charo, Tarímbaro, Copándaro, Chucándiro, Huandacareo, Uriangato, Cuitzeo, Álvaro Obregón, Santa Ana Maya e Indaparapeo, donde se observa la mayor presencia del cultivo.

En el rango dos se identifican 23 parcelas, localizadas principalmente en Álvaro Obregón, seguido de Santa Ana Maya, y en menor medida en Indaparapeo, Chucándiro y Uriangato (Fig. 43).

El rango tres presenta 3 parcelas, ubicadas en Santa Ana Maya y Álvaro Obregón. No se registran parcelas en el rango cuatro, mientras que en el rango cinco se identifica una sola parcela con una superficie aproximada de 19.79 ha, lo que indica que los valores más altos de huella hídrica azul son poco frecuentes y se presentan de forma aislada.

Huella hídrica verde de temporal de Frijol

La Huella Hídrica verde del frijol de riego se concentra completamente en el primer rango (0–40,516 m³/año), donde se registran 277 parcelas que abarcan 596.98 ha, con una suma total de 1,527,180.13 m³/ha/año. En este rango los valores varían entre 473.87 y 38,800.11 m³/ha/año, con una media de 5,513.28 m³/ha/año (Tabla 26).

Los rangos superiores (40,517–195,921 m³/año) no presentan registros de parcelas, lo que indica que todos los valores de huella hídrica azul del frijol de riego dentro del área de estudio se concentran en niveles bajos. La desviación estándar de 5,723.67 refleja una variabilidad moderada dentro de este único intervalo registrado.

Tabla 26.- Descripción de la huella hídrica verde (m³/año) del Frijol de temporal por intervalos de clasificación

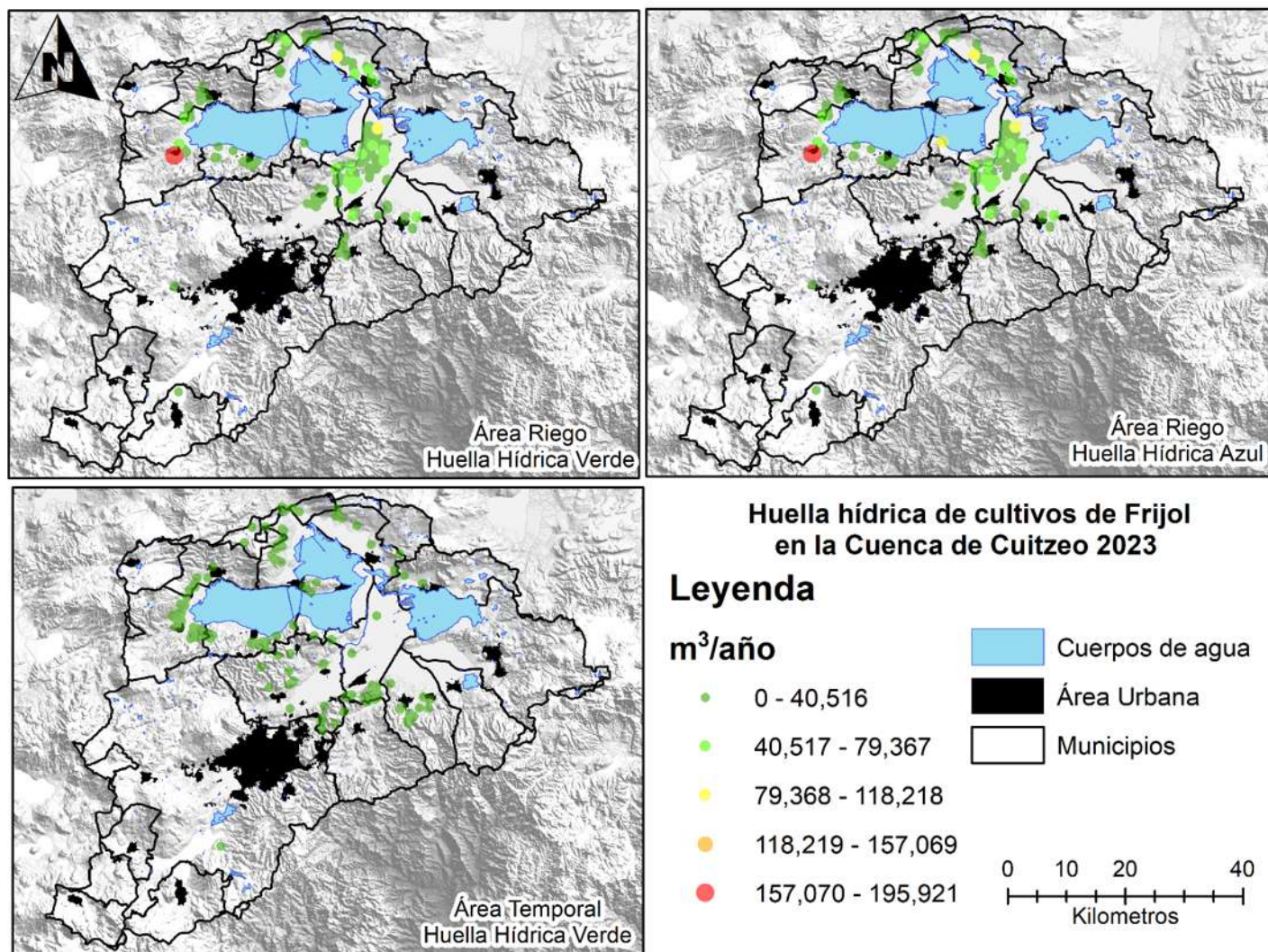
Huella Hídrica verde de Frijol de temporal								
Rango m³/año		Parcelas		m³/año				
Min	Max	No. Parcelas	Ha Parcelas	Suma	Min	Max	Media	Des. vest
0	40,516	277	596.98	1527180.13	473.87	38800.11	5513.28	5723.67
40,517	79,367	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
79,368	118,218	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
118,219	157,069	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
157,070	195,921	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Total	277	596.98	1527180.13	473.87	38800.11	5513.28	5723.67

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de CROPWAT 8.0 a partir de los valores obtenidos de los mapas de distribución del SIAP (2024a).

La huella hídrica verde del frijol de temporal se presenta únicamente en el rango uno, lo que indica que todos los valores registrados corresponden a niveles bajos dentro del área de estudio (Fig. 43).

Espacialmente, las parcelas se concentran principalmente en los municipios de Chucándiro, Cuitzeo, Indaparapeo, Santa Ana Maya y Tarímbaro. En menor medida también se identificaron parcelas en Uriangato, Moroleón, Acámbaro, Álvaro Obregón y Morelia, mostrando una distribución localizada dentro de la cuenca.

Figura 43.- Distribución de Huella Hídrica de cultivos de frijol en la Cuenca de Cuitzeo



Fuente: elaboración propia con datos de SIAP (2024a).

Análisis de la huella hídrica Azul con el agua concesionada

De acuerdo con los datos del REPDA se tienen un total de 1,042 títulos que son entregados principalmente a personas físicas (productores o usuarios individuales), morales (organismos o empresas), asociaciones de usuarios o unidades de riego, organismos públicos, ejidos o comunidades, etc. Por lo que al analizarlos con relación al número de parcelas totales (16,467 ha) analizados dentro de la cuenca de Cuitzeo, se observa una diferencia significativa. Sin embargo, el volumen del total concesionado de la cuenca (182.22 hm³/año) representa el 45% del agua de riego registrado, tomando como 100% del volumen total de la huella hídrica azul siendo 401.03 hm³/año (Tabla 27). Se puede observar que se otorgan más títulos concesionados en subterráneos, pero con poca cantidad y viceversa se otorga mayor volumen en menos títulos en concesiones superficiales.

Tabla 27.- Títulos y volumen del REPDA

	Títulos REPDA	% Títulos REPDA	Vol REPDA	% REPDA	Vol.
Superficial	221	21.21	80.78	44.33	
Subterránea	821	78.79	101.44	55.67	
Total	1,042	100	182.22	100	

Fuente: elaborado a partir de datos del REPDA. Volumen representado en hm³/año

El maíz ocupa el primer lugar del consumo hídrico teniendo el 77% del total, registrando la mayor extensión agrícola (13,869 parcelas) en 28,837.04 ha (Tabla 28). En segundo lugar, el cultivo de aguacate se distribuye en 5,427.83 ha en 702 parcelas. Su consumo de la Huella hídrica azul es de 53.88 hm³/año representando el 13.4% del consumo hídrico total.

A pesar de contar con una superficie considerablemente menor que el maíz, el aguacate presenta una demanda hídrica superior dentro del sistema agrícola debido a los requerimientos hídricos asociados a cultivos perennes.

El sorgo presenta 1,620 parcelas con 3,388.13 ha, registrando una huella hídrica de 32.58 hm³/año, representando el 8.1% del total dentro de la cuenca.

El frijol presenta la menor participación dentro del consumo hídrico total de los cultivos analizados. Este cultivo se distribuye en 276 parcelas, ocupando una superficie de 586.66 ha, lo que representa apenas 1.5 % de la superficie agrícola total considerada en el estudio. La huella hídrica azul equivale a 5.66 hm³/año correspondiente a 1.4% del consumo total. Esta baja huella puede deberse a la reducida superficie cultivada dentro de la cuenca.

Tabla 28. - *Huella hídrica azul agrícola por cultivo en la cuenca*

Cultivo	No. Parcelas	Sup. de parcelas	m³/año	Volumen en hm³/año
Aguacate	702	5,427.83	53,882,075.52	53.88
Maíz	13,869	28,837.04	308,905,219.85	308.91
Sorgo	1,620	3,388.13	32,575,012.69	32.58
Frijol	276	586.66	5,662,882.27	5.66
Total	16,467	38,239.66	401,025,190.33	401.03

Fuente: elaborada a partir de datos del SIAP. Volumen de hm³/año calculado dividiendo por 1,000,000

Discusión

La distribución espacial de la superficie agrícola en la Cuenca de Cuitzeo evidencia modelos territoriales notablemente distintos entre las dos modalidades de producción como la de riego y la de temporal. Con una superficie total de 811.18 km² destinada a la agricultura principalmente, la cuenca presenta una diferenciación de 47.2% bajo riego (382.49 km² y 52.8% de temporal (428.69 km²). Este contraste productivo no se distribuye de manera uniforme en el territorio, pues cada tipo de cultivo ocupa una ubicación geográfica distinta, lo que trae consigo repercusiones específicas sobre la viabilidad hídrica de la cuenca. Lo anterior se da en un escenario nacional donde la agricultura representa cerca del 76% del total de agua aprovechable y se contabilizan 115 mantos acuíferos en condición de sobreexplotación en el país (DOF, 2023a, 2023b).

La Cuenca de Cuitzeo al ser una cuenca endorreica de origen volcánico, muestra un paisaje muy heterogéneo: hacia el norte y el centro se extienden planicies aluviales con fácil acceso tanto a aguas subterráneas como superficiales; en cambio, al sur y al poniente predominan laderas de inclinación media a pronunciada, asociadas a suelos menos fértiles que dependen fundamentalmente de las lluvias. A ello se suma una transformación en el cambio de uso de suelo que resulta sumamente alarmante (Cabrera et al., 2010; Cram et al., 2010; Mendoza et al., 2002; Pimienta-Ramírez, 2024; Pimienta-Ramírez et al., 2025). Esta dualidad geomorfológica explica la distribución de los sistemas de producción.

Los municipios que presentan una mayor superficie de riego se concentran en la porción norte y oriente de la cuenca, destacando Álvaro Obregón con (63.63 km² de riego), Tarímbaro (46.49 km²), Morelia (46.46 km²) y Zinapécuaro (37.48 km²). Estos municipios ocupan los valles aluviales del Río Grande de Morelia y sus afluentes y forman parte del sistema hidrológico Lerma-Chapala donde estudios recientes han documentado el impacto significativo del uso del agua para riego agrícola (Fuerte-Velázquez, 2022; Fuerte-Velázquez y Gómez-Tagle, 2023). Por el contrario, la agricultura de temporal domina en los municipios de la franja sur y poniente con Morelia que destaca por tener mayor extensión en superficie municipal (173.70 km²), Zinapécuaro (30.36 km²), Acámbaro (25.26 km²), Tarímbaro (25.00 km²) y Cuitzeo (24.06 km²).

La distribución territorial es consistente con lo documentado por Gallardo et al. (2005), como indican estos autores, los terrenos en pendiente de la cuenca (clasificados como Acrisoles) manifiestan una fuerte erosión y una escasa capacidad para retener la humedad. Esto lo que los hace más aptos para el temporal con prácticas de conservación,

mientras que los suelos de valle (Vertisoles y Phaeozems) han sido tradicionalmente destinados a la agricultura de riego por su mayor fertilidad y productividad.

El cultivo de aguacate en el sistema de riego, con 54.28 km², se ha concentrado en municipios de ladera como Acuitzio (18.03 km²) y Morelia (17.08 km²) principalmente. A pesar de ocupar una extensión reducida en términos absolutos, su localización en áreas de infiltración de mantos freáticos y su condición de cultivo permanente generan una carga desmedida sobre el recurso hídrico azul. Según Gómez-Tagle et al. (2018) El aguacate requiere cinco veces más extracción de agua que un pino, mientras que su aprovechamiento de la lluvia es catorce veces menor al que logran los pinos. También se ha demostrado que el aguacate gasta el doble de agua en regadío que de secano (Fuerte-Velázquez, 2022; Gómez-Tagle; et al., 2022). Esto sugiere que la presencia de aguacate en las laderas de Acuitzio y Morelia agravan el déficit hídrico debido a la sobreexplotación que puede afectar principalmente a manantiales y caudales base, especialmente durante el estiaje, cuando la demanda se mantiene sin reposición de lluvia.

El sistema de temporal presenta 428.69 km², está dominado principalmente por maíz (79.4% del total) presente principalmente en Morelia (134.74 km²), Acámbaro (24.53 km²), Tarímbaro (21.90 km²) y Zinapécuaro (20.38 km²). La huella hídrica verde de ellos depende exclusivamente de la precipitación, pero los suelos de ladera (Acrisoles) presenta una alta erosión y baja capacidad de retención de humedad, como lo documenta Gallardo et al. (2005). Esto se ve afectado principalmente por el cambio climático que se vive actualmente. Estudios recientes han mostrado que en regiones semiáridas de México muestran una reducción de la precipitación y un aumento de las temperaturas, que incrementan la evapotranspiración y la demanda de riego en años secos (IPCC, 2023; López-López et al., 2025). Los sistemas de temporal enfrentan un riesgo creciente de estrés hídrico, lo cual reduce su productividad y contribuye a la erosión y sedimentación del Lago de Cuitzeo. Sin embargo, el sorgo de temporal aparece principalmente en Morelia (33.7 km²) y en menor medida en Cuitzeo (6.18 km²), Zinapécuaro (2.77 km²), Morelos (2.75 km²) y Tarímbaro (2.59 km²) y al ser resistente a las sequías lo convierte en un cultivo muy bueno en regiones áridas. Sin embargo, su superficie es aún más marginal en comparación con el maíz.

La huella hídrica tanto azul como verde de los cultivos agrícolas a partir de su distribución en la Cuenca de Cuitzeo revela dos importantes problemas centrales:

- La huella azul dominada principalmente por maíz (Alvaro Obregon, Tarímbaro, Indaparapeo y Zinapécuaro) y aguacate (Acuitzio y Morelia) del tipo de sistema de riego, puede ser que estos dos cultivos superen la capacidad de carga del acuífero. La actualización tecnológica de las infraestructuras de riego, como la medición del rendimiento operativo en equipos de aspersión, contribuiría a aliviar el estrés ejercido sobre el recurso hídrico. Sin embargo, para lograrlo hace falta una gestión integrada que tome como punto de referencia lo estipulado en las asignaciones del REPDA (Beltrán-Félix et al., 2025).
- La huella verde dominada principalmente por el maíz de temporal en Morelia, Acámbaro, Tarímbaro y Zinapécuaro pueden tener un impacto en la erosión y pérdida del suelo que compromete la sustentabilidad a largo plazo. Para evitar ello, se podría hacer uso de microorganismos beneficiosos y el uso de compostas obtenidas de desechos orgánicos que pueden ayudar a mejorar la retención de humedad y reducir la erosión.

Los análisis obtenidos a través del procesamiento cartográfico y su integración con los registros oficiales de concesiones del REPDA, permiten dimensionar la magnitud del desajuste hídrico, que enfrenta la Cuenca de Cuitzeo. Los volúmenes de agua azul para los cultivos analizados requieren de 401.03 hm³ anual, mientras que el volumen autorizado a través de los títulos de concesión del REPDA es tan solo de 182.22 hm³ anuales. La diferencia resultante, equivalente a 218 hm³, indica que la demanda supera en más de un 120% lo asignado legalmente. Esta disparidad constituye un indicador claro de presión sobre el recurso, especialmente en un sistema endorreico como es la Cuenca de Cuitzeo, donde cualquier excedente de extracción repercute directamente en el almacenamiento del lago y la recarga del acuífero subyacente. Investigaciones recientes en cuencas agrícolas mexicanas han demostrado que el estrés hídrico puede evaluarse mediante indicadores como el Valor Económico de la Huella Hídrica (HHvalor), que integra tanto los requerimientos hídricos de los cultivos como su valor económico intrínseco, estimando impactos económicos superiores a los 798 millones de pesos asociados al déficit de agua en la producción agrícola (López-López et al., 2025).

En cuanto a la huella hídrica del maíz es la que representa mayor consumo debido a la cantidad de parcelas y hectáreas presenta dentro de la cuenca. La huella hídrica azul se estima su valor en 77% del total agrícola. El análisis del maíz muestra que la mayoría de

las parcelas se sitúan en un rango bajo de consumo ($85,479 \text{ m}^3/\text{año}$) y solo pocas parcelas presentan un máximo indicando diferencias de manejo y en tamaño de parcelas. En contraste, el maíz de temporal presenta el 99% de las parcelas dentro del rango más bajo ($93.57 \text{ hm}^3/\text{año}$) en 16,208 parcelas, reflejando las limitaciones impuestas por la disponibilidad de precipitación. En el ámbito nacional, el informe de la FAO GIEWS (2025) documenta que la producción de maíz de segundo ciclo por segundo año consecutivo se estima muy por debajo del promedio, con una contracción de siembras del 23% en Sinaloa debido a severas sequías que limitaron la disponibilidad de agua en los embalses (FAO, 2025b).

El cultivo de aguacate de riego ocupa una superficie relativamente reducida con una huella hídrica azul de $53.88 \text{ hm}^3/\text{año}$ y una huella verde de $53.90 \text{ hm}^3/\text{año}$. Los rangos superiores evidencian una presión hídrica desproporcionada crítica para la recarga de acuíferos. Estudios recientes, han analizado los efectos de la expansión del aguacate en Michoacán mediante imágenes satelitales LANDSAT y datos GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), indican un incremento del 168% en la superficie destinada al aguacate y una reducción del 59% en la cobertura forestal entre 1993 y 2023, con una correlación significativa ($r = 0.81$) entre la disminución del almacenamiento total de agua, la deforestación y la expansión del cultivo (Rodríguez-García et al., 2026). Los autores estimaron que en 2020 el aguacate requirió aproximadamente 5,500 millones de m^3 de agua, cifra que supera el volumen total de escurrimiento y recarga estimado en 3,406.49 millones de m^3 . Esto implica que el cultivo demandó al menos el 70% del agua dulce disponible en la región, lo que plantea serias dudas sobre su sostenibilidad y evidencia que la producción de dicho cultivo propicia una presión insostenible sobre los recursos hídricos regionales.

Por otro lado, el sorgo es el tercer cultivo de importancia aportando una huella azul de 31.58 hm^3 y verde de 31.86 hm^3 anuales, distribuidas en 1,620 parcelas que suman 3,388.13 hectáreas. Los rangos más bajos concentran la mayoría de las parcelas y solo unos cuantos tienen un rango superior que llegan a los $234,622 \text{ m}^3$ de huella azul. El cuarto cultivo que tiene una huella hídrica más baja en comparación con los otros cultivos es el frijol. En sistema de riego muestra una huella azul de 5.66 hm^3 anuales y una huella verde de 5.58 hm^3 anuales, distribuidas en 276 parcelas que suman 586.66 hectáreas.

Los hallazgos de esta investigación delinean un escenario de insostenibilidad hídrica que demanda acciones coordinadas se subraya la necesidad de implementar estrategias

que permitan una gestión más eficiente del recurso hídrico, considerando tanto la demanda de los cultivos como la disponibilidad real del agua. Estas pueden ser: Zonificación agrícola con criterios hídricos: Los mapas de distribución y huella hídrica permiten definir zonas aptas para riego restringido, zonas de exclusión y zonas de fomento al temporal con prácticas de conservación. Contando con datos de instituciones gubernamentales como el SIAP, CONAGUA, SADER, RAN, entre otros que pueden aportar conocimiento e investigación para un mejor manejo sostenible del recurso hídrico.

Tecnificación del riego con monitoreo: se requiere una modernización de los sistemas de riego acompañada de un monitoreo para evitar un déficit. Se requiere cambiar y actualizar las tecnologías de riego desde aspersión y precisión, así como un cambio hacia cultivos más eficientes en el uso del agua.

Prácticas agrícolas actualizadas: investigaciones recientes sobre la aplicación de microorganismos benéficos y compost enriquecido con silicio como *Azotobacter Chroococcum* en diversos cultivos han demostrado que estas estrategias contribuyen a la fijación biológica de nitrógeno y a la producción de compuestos análogos a fitohormonas, los cuales favorecen la supresión de poblaciones bacterianas (Wani et al., 2013). Asimismo, el uso del hongo entomopatógeno *Metarhizium anisopliae* ha mostrado valores significativamente elevados en el biocontrol de plagas, promoviendo un mayor desarrollo y floración de los cultivos. Estos ejemplos evidencian el potencial de dichas prácticas para optimizar el manejo de los sistemas productivos, al tiempo que contribuyen a la conservación de los recursos hídricos (Liu et al., 2022).

Conclusiones

El análisis de la huella hídrica agrícola en la cuenca del Lago de Cuitzeo revela una situación de insostenibilidad estructural caracterizada por un déficit hídrico de 218.81 hm³ anuales, derivado del contraste entre la demanda real de los cultivos (401.03 hm³/año) y el volumen concesionado en el REPDA (182.22 hm³/año). Esta discrepancia, que supera en más del 120% la disponibilidad legal, evidencia la existencia generalizada de extracciones no regularizadas que invariablemente contribuyen a una presión insostenible sobre el acuífero y los caudales superficiales.

El maíz es el principal responsable de esta presión, al concentrar el 77% de la huella azul total (308.91 hm³/año). Su producción en los valles de Álvaro Obregón, Tarímbaro y Zinapécuaro demanda volúmenes que duplican la capacidad de recarga, mientras que el maíz de temporal, con una huella verde de 93.57 hm³/año, enfrenta una vulnerabilidad creciente ante sequías que han reducido rendimientos hasta en un 28% en años críticos.

El aguacate, aunque ocupa solo 9% de la superficie agrícola, genera el impacto más significativo. Con parcelas que alcanzan consumos extremos de 1.93 millones de m³/año y una huella total de 107.78 hm³/año, su expansión en laderas de Acuitzio y Morelia (zonas críticas para la recarga) ha demostrado demandar hasta 70% del agua dulce disponible en la región, con una correlación directa entre deforestación, disminución del almacenamiento hídrico y conflictos sociales por el acceso al agua.

En contraste, el sorgo de temporal emerge como un cultivo con potencial para contribuir positivamente a la sustentabilidad, al presentar baja huella hídrica y alta resiliencia en zonas de precipitación limitada como Yuriria.

Las implicaciones del déficit hídrico son diversas y complejas: no solo compromete la producción agrícola futura, sino que amenaza el abastecimiento para los habitantes urbanos de Morelia, capital y principal urbe del estado lo que acelera la desecación del Lago de Cuitzeo y perpetúa conflictos por el agua. La gestión de la cuenca requiere urgentemente: regularizar extracciones mediante monitoreo satelital, establecer zonificación que restrinja cultivos de alto impacto en laderas tecnificar el riego con controles que eviten el efecto rebote, y fomentar cultivos resilientes como el sorgo. Sin estas acciones, la cuenca se encamina hacia una crisis ecológica irreversible.

Recomendaciones

Con base en los resultados se podría desarrollar una plataforma en tiempo real para medir la huella hídrica (verde y azul) desde escala de parcela a comunidad, municipio, cuenca, estado etc. Esto podría realizarse mediante la infraestructura de datos públicos de CONAGUA, INEGI, SIAP, RAN, IMTA, entre otros. Su integración mediante tecnologías modernas como APIs, satélites e inteligencia artificial podrían permitir una programación de riego precisa, mejorando la eficacia hídrica y productividad agrícola.

El uso de los datos climáticos podría ser obtenidos desde la nube tanto de NASA POWER y del Servicio Meteorológico Nacional de CONAGUA. Los datos geoespaciales podrían utilizarse del geoportal de INEGI y los cierres agrícolas anuales y mensuales, así como rendimiento, superficie sembrada, valor de producción y fechas de siembra/cosecha mediante el SIAP, vinculando cada polígono con el del RAN con un padrón de cultivos. Este padrón tendría que pedirse a cada agricultor para conocer la especie que se sembrara y en que temporada, para obtener como resultado final un gasto hídrico por cultivo.

Un grupo de expertos, catedráticos o científicos podría desarrollar una base de parámetros conforme a la FAO-56 (coeficientes Kc, profundidad radicular, agotamiento crítico y factor de respuesta al rendimiento). Con el fin, de utilizar estos datos y alimentar al programa ya sea CROPWAT 8.0 o uno similar que pueda calcular la huella hídrica verde o azul. También se requerirá un grupo similar para solucionar el problema de los vacíos en series climáticas utilizando métodos científicos rigurosos y poder ser validados con NASA POWER o con otro sistema satelital.

La tecnología sugerida incluye backend con Python (FastAPI, Pandas, GeoPandas), frontend con React y Flutter, base de datos PostgreSQL/PostGIS, y servicios en la nube (AWS México para cumplir la ley de residencia de datos). También se podría utilizar QGIS, software libre potente para análisis geoespaciales, edición vectorial y raster, e integración de IA.

DISCUSIÓN GENERAL

La cuenca de Cuitzeo se encuentra dentro del sistema hidrológico Lerma-Chapala, el cual constituye un caso paradigmático de las tensiones entre la política hídrica, la disponibilidad real del recurso y las limitaciones técnicas para su medición y gestión. El análisis integrado de las concesiones hídricas, la calidad de la información climática y la distribución espacial de los cultivos revela una crisis estructural que no puede ser abordada de manera separada, sino de una manera conjunta. Los primeros problemas que se observó fue la tendencia creciente de títulos concesionados entre 2020 y 2023, el cual, lejos de reflejar una mejora en la equidad hídrica, parece responder más a presiones sectoriales y a estrategias de Gestión Integrada de Recursos Hídricos impulsadas por CONAGUA (DOF, 2020a, 2020b, 2023a, 2023b). Sin embargo, esta masificación de concesiones contrasta con la escasez que existía en un inicio, cuando los tramites eran complejos y dependían de mandatos presidenciales (Gómez-Arias y Moctezuma, 2020). Por lo tanto, el aumento de las concesiones otorgadas podría estar indicando una mayor presión sobre el recurso más que una verdadera regulación.

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos de las administraciones que le competen a la gestión hídrica, varias cuencas sufren estrés hídrico y a Cuenca de Cuitzeo no es una excepción (Amador et al., 2011; Gómez, 2013)., quedando evidenciado por los registros federales que muestran el déficit hídrico tanto superficial como subterráneo (DOF, 2020a, 2020b, 2023a, 2023b). Actualmente, muchas investigaciones confirman que la disparidad entre disponibilidad y concesión es generalizada principalmente en el centro de la república mexicana, con impactos directos sobre la recarga de acuíferos (Pacheco-Treviño y Manzano-Camarillo, 2024). Esta situación podría estar agravada porque la asignación de concesiones no se ajusta a la variabilidad interanual de los escurrimientos, ya que la disponibilidad se ha estado evaluando cada tres años. También, otro factor son los títulos de agua superficial y subterránea otorgados con vigencia de cinco a treinta años sin considerar adecuadamente los ciclos de sequía o lluvia intensa (CONAGUA, 2024b), fenómenos que serán más extremos por el cambio climático (IPCC, 2023).

No obstante, para comprender y anticipar a estos eventos extremos se requiere de información climática confiable, y ahí emerge una segunda problemática muy crítica: la falta de datos de calidad en las estaciones meteorológicas. Como ejemplo tenemos la Cuenca de Cuitzeo, donde solo 26.47% de las estaciones analizadas presentaron valores completos para el año 2023 y apenas el 3.53% mostraron una diferencia menor al 25% frente a los

datos satelitales. Por el contrario, el 50% de las estaciones exhibieron discrepancias significativas con la información de NASA POWER (Valencia-Gonzalez et al., 2022). Esta diferencia no solo se presenta en la región, sino que se ha documentado en otras partes del mundo (Carrara et al., 2023; Deichmann y Eklundh, 1991). La temperatura al igual que muchos artículos publicados resultó ser una variable muy estable y predecible. Sin embargo, la precipitación es una variable que tiene una dificultad de poder modelar debido a su alta variabilidad espacial y temporal (Carrara et al., 2023; Marzouk, 2021). Por otro lado, otro factor que se considera pudo influir en las diferencias de las métricas de error (MAE y MAPE) es la resolución de 10 km de NASA POWER, ya que es insuficiente para captar microclimas generados por la topografía accidentada de la cuenca (NASA, 2025), la cual abarca desde valles aluviales hasta laderas volcánicas (Amador et al., 2011; Cram et al., 2010; Mendoza et al., 2002). Por lo tanto, la falta de estaciones con un alto control de calidad de sus datos y la dependencia de datos satelitales sin una validación adecuada pueden llegar a introducir incertidumbres que pueden afectar directamente en la toma de decisiones en la gestión hídrica, el otorgamiento de concesiones y planificación agrícola adecuada.

Ahora bien, la planificación agrícola es el tercer desajuste hídrico dentro de la Cuenca de Cuitzeo. La distribución espacial de los cultivos en la cuenca muestra una clara dualidad: 47.2% de la superficie agrícola (382.49 km²) está bajo riego y 52.8% (428.69 km²) es de temporal. Los municipios del norte y oriente (Álvaro Obregón, Tarímbaro, Morelia, Zinapécuaro) concentran el riego en valles aluviales con suelos fértiles (Vertisoles y Phaeozems), mientras que las laderas del sur y poniente (Acuitzio, parte de Morelia) se dedican al temporal, con suelos erosionables (Acrisoles) y cultivos como maíz y sorgo (Gallardo et al., 2005). Sin embargo, el cultivo de aguacate, aunque ocupa solo 54.28 km² bajo riego, se ha ido expandiéndose en zonas de ladera como Acuitzio y Morelia, áreas críticas para la recarga de acuíferos. Se ha demostrado que este cultivo perenne puede llegar a consumir hasta 5 veces más agua que un pino y puede llegar a captar 14 veces menos precipitación (Gómez-Tagle et al., 2018) y en condiciones de riego puede duplicar su consumo respecto al secano (Fuerte-Velázquez, 2022; Fuerte-Velázquez y Gómez-Tagle, 2023; Gómez-Tagle et al., 2022). Estudios recientes con imágenes LANDSAT y datos GRACE indican que entre 1993 y 2023 la superficie de aguacate aumentó un 168%, mientras que la cobertura forestal se redujo un 59%, con una correlación significativa ($r = 0.81$) entre esa expansión y la disminución del almacenamiento total de agua (Rodríguez-García et al., 2026). Estos autores estimaron que en 2020 el aguacate requirió

aproximadamente 5,500 millones de m³ de agua, superando el escurrimiento y recarga estimados (3,406.49 millones de m³), lo que evidencia una presión insostenible.

La consecuencia de este modelo agrícola se refleja en el desajuste cuantitativo entre la demanda real de agua azul para los cultivos (401.03 hm³ anuales) y el volumen autorizado por las concesiones del REPDA (182.22 hm³ anuales). La diferencia de 218 hm³ representa un exceso de demanda del 120% sobre lo legalmente asignado. Este déficit no es solo numérico: implica que la extracción supera la recarga, afectando directamente el almacenamiento del lago endorreico y los acuíferos subyacentes. Además, indicadores como el Valor Económico de la Huella Hídrica (HHvalor) han estimado impactos económicos superiores a los 798 millones de pesos asociados al déficit de agua en la producción agrícola de la región (López-López et al., 2025). Por otra parte, la comparación entre los volúmenes concesionados y efectivos en muchos casos se registra con el mismo valor, el cual podría deberse a deficiencias metodológicas, desconocer el volumen efectivo, falta de medición, falta de mantenimiento en sus equipos, entre otras causas, pudiendo ocultar extracciones no cuantificadas (OCDE, 2013; Pacheco-Vega, 2020). Por otro lado, a nivel municipal, Morelia centraliza la mayoría de los títulos, dándole prioridad al uso público urbano sobre el agrícola, a pesar que la agricultura es la principal actividad económica, pero al ser capital del estado debe de proveer una gran cantidad de agua a todos sus habitantes (Carlón et al., 2009). Esta centralización reproduce patrones de sobreexplotación documentados en el centro de México (Díaz et al., 2013) y evidencia que los marcos legales rígidos no incorporan ajustes dinámicos ante la escasez.

Bajo este concepto de la información deficiente, concesiones desajustadas y agricultura de alto consumo, la sustentabilidad hídrica dentro de la Cuenca de Cuitzeo se está volviendo inviable si no se adoptan medidas integrales. La tecnificación del riego, acompañada de monitoreo en tiempo real, podría reducir la presión sobre el agua azul, pero requiere una actualización de las concesiones que contemple la eficiencia real de los sistemas (Beltrán-Félix et al., 2025). Asimismo, la zonificación agrícola con conocimiento de cultivos sembrados y sus tiempos de cosecha tomando criterios hídricos basados en mapas de huella hídrica y disponibilidad, se podría delimitar áreas de exclusión o de riego restringido. También, la adopción de prácticas amigables al medio ambiente podría ayudar como la aplicación de *Azotobacter chroococcum* para fijación biológica de nitrógeno y el uso del hongo *Metarhizium anisopliae* para biocontrol han demostrado mejorar la retención de humedad y reducir la erosión en suelos de temporal (Liu et al., 2022; Wani et al., 2013).

Sin embargo, ninguna de estas soluciones técnicas será efectiva sin una gobernanza adaptativa que integre la mejora de las redes climáticas (combinando datos satelitales con mediciones in situ calibradas) y una repartición hídrica que priorice la recarga de acuíferos y el derecho humano al agua por encima de la rentabilidad de cultivos de alto valor como el aguacate. En síntesis, la Cuenca de Cuitzeo enfrenta un desafío sistémico donde la falta de datos, la sobreconcesión y el modelo agrícola se retroalimentan, y solo un enfoque de gestión integral de recursos hídricos, basado en evidencia científica actualizada, podrá revertir la trayectoria actual de insostenibilidad.

CONCLUSIONES GENERALES

La sustentabilidad hídrica en la Cuenca de Cuitzeo enfrenta una crisis estructural determinada por la interacción entre concesiones sobredimensionadas, información climática deficiente y una huella hídrica agrícola insostenible. El sistema de concesiones autoriza volúmenes que superan en 120% la disponibilidad real del recurso, generando un déficit anual de 218 hm³ que profundiza la sobreexplotación de acuíferos y el estrés del lago endorreico. Esta diferencia se intensifica debido a que el cálculo del recurso disponible se efectúa únicamente cada tres años, sin considerar las fluctuaciones naturales que ocurren año con año en los caudales, ni tampoco los periodos de estiaje recurrente.

Paralelamente, la falta de estaciones meteorológicas confiables impide cuantificar con precisión la precipitación y la recarga real. Solo el 26% de las estaciones presentaron datos completos para 2023, y la variable pluviométrica mostró los mayores errores de estimación frente a datos satelitales. Esta incertidumbre limita la capacidad de ajustar dinámicamente las concesiones y de planificar la agricultura de temporal.

La huella hídrica azul del aguacate y el maíz de riego concentra la presión sobre los acuíferos, especialmente en zonas de recarga como las laderas de Acuitzio y Morelia. El aguacate, con una expansión del 168% en tres décadas, consume volúmenes que superan el escurrimiento regional (Rodriguez-Garcia et al., 2026). Por lo tanto, una gestión integral requiere: (a) actualizar las concesiones con monitoreo satelital validado y frecuencia anual; (b) tecnificar el riego con medición de volúmenes efectivos; y (c) zonificar el territorio para excluir cultivos de alta huella azul de las áreas de recarga. Sin estas acciones, el déficit hídrico se profundizará irreversiblemente.

RECOMENDACIONES GENERALES

Debería existir una mejora sustancial en muchas instituciones gubernamentales para obtener datos confiables y con un mínimo de errores y poder realizar investigaciones más precisar, certeras y más rápidas. Es por tanto prioridad que instituciones como CONAGUA revise y corrija sus datos georreferenciados sobre aprovechamiento de agua superficial y subterránea, asegurando que cada punto se ubique en las coordenadas correctas en el SINA 3.0. También, otras dependencias directas de CONAGUA como el REPDA, presenta múltiples errores: ubicación geográfica incorrecta, fallas ortográficas, valores inconsistentes y códigos de titular que no coinciden con la base geoespacial. Además, campos como fecha de emisión, tipo de uso, volumen utilizado, gasto máximo, clasificación SCIAN y fecha de corte suelen estar vacíos o desactualizados.

Una mejora esencial es medir el volumen real consumido cada año, evitando que se reporte automáticamente el volumen concesionado, práctica que genera incertidumbre sobre el consumo verdadero. También debe haber coherencia entre el número de título georreferenciado del SINA 3.0 y el portal donde se encuentran los títulos registrados en REPDA, pues actualmente difieren y obligan a búsquedas manuales. Asimismo, existen usos del agua no contemplados en la Ley de Aguas Nacionales (como usos múltiples) que requieren ser incorporados y definidos claramente. Se exige reducir los plazos de actualización de datos, que actualmente tardan hasta tres años y aún contienen errores.

Para subsanar vacíos en series climáticas, se propone usar combinaciones de regresión, diferencia porcentual e inteligencia artificial, especialmente en precipitación por su naturaleza caótica, siempre que los métodos tengan validez científica y respaldo de expertos. CONAGUA debería establecer un protocolo estandarizado de validación climática entre diferentes fuentes.

Una vez solucionando estos problemas, estos insumos podrían utilizarse para desarrollar una plataforma para medir la huella hídrica verde y azul desde distintas escalas. Usando datos públicos de las instituciones gubernamentales, se pueden integrar a APIs, satélites o IA, para lograr un conocimiento del balance hídrico hasta programación de riego precisa.

Con la ayuda de expertos, académicos y apoyo gubernamental se podría realizar una red de conocimiento del gasto hídrico para así poder gestionar mejor el agua y ser un ejemplo a nivel mundial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO.
- Amador, G., A., Granados, E., M., y Mendoza, M. E. (2011). Three approaches to the assessment of spatio-temporal distribution of the water balance: the case of the Cuitzeo basin, Michoacán, Mexico. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*.(76), 34-55. <http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/29873>
- AMHPAC. (2022). *Asociación Mexicana de Horticultura Protegida*. Retrieved 05 de noviembre from <https://amhpac.org/es/index.php/en/>
- Aparicio, M., F., J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de superficie* (1ra. ed.). Limusa. <https://www.hidrosm.com/2020/12/libro-fundamentos-de-hidrologia-de.html>
- Arora, N. K. (2018). Environmental Sustainability—necessary for survival. *Environmental Sustainability*, 1(1), 1-2. <https://doi.org/10.1007/s42398-018-0013-3>
- Arora, N. K., y Mishra, J. (2020). COVID-19 and importance of environmental sustainability. *Environmental Sustainability*, 3(2), 117-119. <https://doi.org/10.1007/s42398-020-00107-z>
- ASF. (2025). *Informe General Ejecutivo: Cuenta Publica 2023*. Auditoria Superior de la Federación. <https://www.asf.gob.mx/Section/58 Informes de auditoria>
- Bahn, R., El Labban, S., y Hwalla, N. (2019). Impacts of shifting to healthier food consumption patterns on environmental sustainability in MENA countries. *Sustainability Science*, 14(4), 1131-1146. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0600-3>
- BancoMundial. (2023). *El agua en la Agricultura*. Retrieved julio from <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture>
- Beltrán-Félix, J. A., Sifuentes-Ibarra, E., Lopez-Valenzuela, B. E., Ruiz-Perez, V., Ruelas Islas, J. d. R., y Ayala-Armenta, Q. A. (2025). Dos Modelos de Aspersores en el Rendimiento, Calidad y Eficiencia del Uso del Agua del Cultivo de Papa (*Solanum tuberosum* L.). *Terra Latinoamericana*, 43. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792025000100121
- Berberian, A. G., Gonzalez, D. J. X., y Cushing, L. J. (2022). Racial Disparities in Climate Change-Related Health Effects in the United States. *Curr Environ Health Rep*, 9(3), 451-464. <https://doi.org/10.1007/s40572-022-00360-w>
- Bertalanffy, V., Ludwig. (1969). *General system theory; Foundations, development, applications*. University of Alberta.
- Bobrowski, M., Weidinger, J., y Schickhoff, U. (2021). Is New Always Better? Frontiers in Global Climate Datasets for Modeling Treeline Species in the Himalayas. *Atmosphere*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/atmos12050543>
- Bolaños, C. S., y Betancur, V. T. (2018). Estado del arte sobre el cambio climático y las aguas subterráneas, ejemplo en Colombia. *Revista Politécnica*, 14(26), 52-64. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v14n26a5>
- Bracho, P., D., G. (2021). *Estimación de la oferta hídrica y propuesta de gestión del recurso hídrico en la microcuenca hidrográfica del río El Ángel* [Tesis Postgrado, Universidad Técnica del Norte]. El Ángel. Carchi. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10999>
- Cabrera, G. A., Medina, O. L. E., y Alcalá, D. J. M. (2010). Suelos. In H. S. Cram, S. L. Galicia, y A. I. Israde (Eds.), *Atlas de la Cuenca del Lago Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental* (Vol. I, pp. 24). UNAM, Instituto de Geografía.

- Camacho, G., H., y Casados, J. (2017). *Regulación de los servicios de agua potable y saneamiento en México* (IMTA, Ed. 1ra. ed.). https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/regulacion-servicios/files/assets/common/downloads/publication.pdf
- CAMCPA, R. (2026). *Consejos de Cuenca*. CONAGUA. Retrieved abril from
- Carlón, A. T., Mendoza, M. E., López, G. E. M., y Morales, M. L. M. (2009). Hydrogeographical Regionalisation: An Approach for Evaluating the Effects of Land Cover Change in Watersheds. A Case Study in the Cuitzeo Lake Watershed, Central Mexico. *Water Resources Management*, 23(12), 2587-2603. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9398-6>
- Carrara, E. R., Lopes, P. S., Reis, A. C. Z., Silva, J. X., Dias, L. C. d. C. M., Schultz, É. B.,...Peixoto, M. G. C. D. (2023). NASA POWER satellite meteorological system is a good tool for obtaining estimates of the temperature-humidity index under Brazilian conditions compared to INMET weather stations data. *International Journal of Biometeorology*, 67(7), 1273-1277. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02493-5>
- Carrión, R. (2015). *Manual de capacitación: medición del agua de riego* (1ra. ed.). Unidad para el Cambio Rural.
- CEIICH. (2025). *Documento de incidencia. La gestión del agua en México: retos y oportunidades*. Retrieved 01 de agosto from <https://ceiich.unam.mx/documento-de-incidencia-la-gestion-del-agua-en-mexico-retos-y-oportunidades/>
- Challenger, A., Córdova, A., Lazos Chavero, E., Equihua, M., y Maass, M. (2018). La opinión experta evalúa la política ambiental mexicana: Hacia la gestión de socioecosistemas. *Gestión y Política Pública*, 27, 431-473. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792018000200431&nrm=iso
- Cifuentes, M., R., Rodríguez, C. I., Ruíz de Galarreta, V. A., y Gabellone, N. A. (2022). Dinámica hídrica y balance hidrológico en la cuenca del embalse Lago del Fuerte, Tandil. *Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales; Cuadernos del Curiham*, 28(4-2022), 15-24. <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.178>
- Common, M., y Stagl, S. (2008). *Introducción a la economía ecológica*. Cambridge University Press. https://aulavirtual4.unl.edu.ar/pluginfile.php/7014/mod_resource/content/1/Common%20y%20Stagl%20-%20Introducci%C3%B3n%20a%20la%20Economia%20Ecol%C3%B3gica.pdf
- CONAGUA. (2013). *Distritos de riego*. CONAGUA. <https://www.cmdrs.gob.mx/sites/default/files/cmdrs/sesion/2018/09/14/1468/materiales/5-conagua.pdf>
- CONAGUA. (2014). *Manual de Integración, estructura organica y funcioinamiento*. CONAGUA. <https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Manual%20de%20Integracion,EOyF.pdf>
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México* (2018 ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas del Agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf
- CONAGUA. (2020a). *AGUAS SUBTERRÁNEAS / Acuíferos*. Retrieved 20 de octubre from <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/michoacan/michoacan.html>

- CONAGUA. (2020b). *Consejos de Cuenca*. CONAGUA. Retrieved Enero 2023 from <https://www.gob.mx/conagua/documentos/consejos-de-cuenca>
- CONAGUA. (2024a). *Aguas Subterráneas*. Retrieved Enero 2024 from <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/LibreAlumbramiento.html#:~:text=La%20sobreexplotaci%C3%B3n%20ha%20generado%20diversos,los%20costos%20de%20extracci%C3%B3n%2C%20el>
- CONAGUA. (2024b). *Consulta a la base de datos del REPDA*. Retrieved Mayo del 2024 from <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>
- CONAGUA. (2024c). *Consulta a la base de datos del REPDA*. Retrieved 05 de noviembre from <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>
- CONAGUA. (2024d). *Instrumentos de Gestión del Agua*. Retrieved septiembre from [https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/instrumentos-de-gestion-del-agua#:~:text=La%20Comisi%C3%B3n%20Nacional%20del%20Agua%20\(Conagua\)%20es%20un%20%C3%B3rgano%20administrativo,administraci%C3%B3n%20sustentable%20y%20garantizar%20la](https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/instrumentos-de-gestion-del-agua#:~:text=La%20Comisi%C3%B3n%20Nacional%20del%20Agua%20(Conagua)%20es%20un%20%C3%B3rgano%20administrativo,administraci%C3%B3n%20sustentable%20y%20garantizar%20la)
- CONAGUA. (2024e). *SINA 3.0*. Retrieved junio from <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=repda>
- CONAGUA. (2025a). *Información Estadística Climatológica*. Gobierno de México. Retrieved julio from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- CONAGUA. (2025b). *Normales Climatológicas por Estado*. Gobierno de México. Retrieved Julio from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>
- CONAGUA. (2025c). *Rumbo a la Construcción del Programa Nacional Hídrico*. Gobierno de México. Retrieved 11 de agosto from <https://app.conagua.gob.mx/forospnh/>
- Costanza, R., Cumberland, J., y Daly, H. (1999). *Una Introducción a la Economía Ecológica* (C. E. Continental, Ed. primera. ed.).
- Cram, H. S., UNAM, I. d. G., Galicia, S. L., Israde, A. I., Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, D. d., UMich, G. y. M., y López, M. C. (2010). *Atlas de la Cuenca del lago de Cuitzeo: Análisis de su Geografía y entorno socioambiental* (primera ed.). <https://doi.org/10.22201/ciga.9786070218309p.2010>
- Davis, K. F., Rulli, M. C., Seveso, A., y D'Odorico, P. (2017). Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution. *Nature Geoscience*, 10(12), 919-924. <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0004-5>
- Deichmann, U., y Eklundh, L. (1991). *Global digital datasets for land degradation studies*. Global Environment Monitoring System, United Nations Environment Programme, [1991]. <https://web.nypl.org/research/research-catalog/bib/hb990078024240203941>
- Díaz, C. R. E., Bravo, P. L. C., Alatorre, C. L. C., y Sánchez, F. E. (2013). Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Investigaciones Geográficas*(82), 93-103. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112013000300007&lng=es&nrm=iso
- DOF. (1992). *Ley de Aguas Nacionales*. Retrieved 07/23 from <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>
- DOF. (2015). *NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Retrieved Mayo 2023 from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0
- DOF. (2020a). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que*

- forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved Mayo from <https://sidof.segob.gob.mx/notas/5600593>
- DOF. (2020b). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved Mayo from https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600849&fecha=21/09/2020#gsc.tab=0
- DOF. (2020c). *Programa Nacional Hídrico 2020-2024*. Retrieved Marzo, 2024 from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020#gsc.tab=0
- DOF. (2023a). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved Mayo from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5708074&fecha=09/11/2023#gsc.tab=0
- DOF. (2023b). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved Mayo from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5712948&fecha=28/12/2023#gsc.tab=0
- DOF. (2023c). *DECRETO por el que se establecen facilidades administrativas para la renovación de títulos de concesiones o asignaciones de aguas nacionales, para los usos que se indican*. Retrieved Agosto from https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5682767&fecha=14/03/2023#gsc.tab=0
- Duque-Sarango, D., Cajamarca-Rivadeneira, R., Wemple, B. C., y Delgado-Fernández, M. E. (2019). Estimación del balance hídrico de una cuenca Andina tropical. *La Granja*, 29, 59-69. <https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.05>
- El-Shafei, A., A., y Mattar, M., A.;. (2022). Irrigation Scheduling and Production of Wheat with Different Water Quantities in Surface and Drip Irrigation: Field Experiments and Modelling Using CROPWAT and SALTMED. *Agronomy*, 12(1488). <https://doi.org/10.3390/agronomy12071488>
- Er, H., Tutar, H., Angin, I., Muratoglu, A., Rahimi, M., y Farooq, M. (2025). Water footprint assessment under deficit irrigation: a comparative analysis of field data and CROPWAT model agreement in semi-arid regions. *Irrigation Science*, 44(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s00271-025-01051-8>
- Espinoza, R., Mayra, Berenice., y Murillo, B., Guillermina. (2020). La dotación de agua y sus retos en la administración del sur de Morelia, Michoacán, México 2019-2020. *Impluvium*, 12, 61-67. <http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero12.pdf>
- FAO. (2014). *Bioenergía y seguridad alimentaria. Producción de cultivos*. FAO.
- FAO. (2021). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point*. (SOLAW 2021) (Vol. 1). FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>
- FAO. (2022). *Uso agrícola del agua*. Retrieved 04 de noviembre from <https://www.fao.org/3/y3918s/y3918s03.htm#TopOfPage>

- FAO. (2024). CropWat. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>
- FAO. (2025a). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Retrieved Marzo 2025 from <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/642/es/>
- FAO. (2025b). SMIA - Sistema mundial de información y alerta. FAO. <https://cb.apps.fao.org/country.jsp?code=MEX&lang=es>
- Fernández, D., M. (2020). *Estudio y desarrollo de modelo de eficiencia hídrica de riego basado en agricultura 4.0* Universidad Andrés Bello]. Santiago de Chile. <https://repositorio.unab.cl/items/27b1a799-b80f-4d91-a861-672959bebf9f>
- Fernández, N., Suárez, C. A., y Pérez, E. A. (2007). Modelación y Simulación Dinámica para la Gestión de Caudales en la Cuenca Alta del Río Pamplonita -Un Balance Hídrico de Consumo-. *Bistua*, 5, 80-96. https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/publicaciones/bistua_revista_ciencias_basica/2007/12082010/rev_bistua_vol5_num2_art8.pdf
- Ferrer, H. K. L. (2024). *Estimación de la recarga vertical mediante modelación hidrológica en el acuífero Costera de Veracruz* Universidad Nacional Autónoma de México]. CDMX. <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/75424a5a-1e27-4550-84c3-75ebf5dab4f2/content>
- Fick, S., E., y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fierke, J., Joelson, N. Z., Loguercio, G. A., Putzenlechner, B., Simon, A., Wyss, D.,...Walentowski, H. (2024). Assessing uncertainty in bioclimatic modelling: a comparison of two high-resolution climate datasets in northern Patagonia. *Regional Environmental Change*, 24(3), 110. <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02278-5>
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A. C. (2023). *Agua en el Planeta*. <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>
- Fuerte-Velázquez, D., Janeth. (2022). *Evaluación de la huella hídrica en la producción de aguacate y fresa en municipios de la Subcuenca de Cointzio. Un análisis de vulnerabilidad hídrica* [Doctorado, UMSNH]. Morelia. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/6785/FEVAQ-D-2022-0091.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Fuerte-Velázquez, D. J., y Gómez-Tagle, C., Alberto. (2023). ¿Cuanta agua se requiere para producir 1kg de aguacate?; Un análisis desde la huella hídrica. *C+Téc*. <https://ctecicti.com/index.php/CTec/article/view/145>
- Funtowicz, O., Silvio, y Ravetz, R., Jerome. (2000). *La Ciencia posnormal: Ciencia con la gente* (Icaria, Ed. Primera ed.).
- Gallardo, J. F., Bravo, M., Prat, C., Medina, L., Fragoso, L., Serrato, B.,...Etchevers, J. D. (2005). Recuperación de agrosistemas degradados en la cuenca del lago de Cuitzeo (Michoacán, México): I. Manejo de suelos. II SIMPOSIO NACIONAL SOBRE CONTROL DE LA DEGRADACIÓN DE SUELOS, Universidad Autónoma de Madrid.
- García-Sánchez, E., I., Vargas-Canales, J., M., Palacios-Rangel, M., I., y Aguilar-Ávila, J. (2018). Sistema de innovación como marco analítico de la agricultura protegida en la región centro de México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 15. <https://doi.org/https://doi.org/10.11144/javeriana.cdr15-81.sima>
- García, E. (1964). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. UNAM. <http://www.igg.unam.mx/geoigg/biblioteca/archivos/memoria/20190917100949.pdf>
- García, R. (2006). *Sistemas complejos: Conceptos, métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria* (Gedisa, Ed. Primera ed.).

- Garduño, M., Víctor, Hugo., Ávila, O., Jorge, Alejandro., Giordano, N., Hernández, M., Víctor, Manuel., Sámano, N., Ana., y Díaz, S., José, Edmundo. (2014). Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta planificación del territorio. <https://en15dias.com/wp-content/uploads/2022/06/estudio.pdf>
- Golfam, P. (2024). Estimation of Crop Irrigation Water Demand Using Climatic Data and Cropwat Model. *Water Resources and Climate Change*, 1(1), 48-58. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.11311.1001>
- Gómez-Arias, W. A., y Moctezuma, A. (2020). Los millonarios del agua. *Argumentos. Estudios Críticos de la Sociedad*, 2(93), 26. <https://doi.org/10.24275/uamxoc-dcsh/argumentos/202093-01>
- Gómez-Tagle, A., Morales-Chávez, R., Quiroz, F., García, Y., y Todelo-Lopez, L. (2018). *Hydrological impact of the green gold (avocado culture) in central Mexico; rainfall partition and water use comparison with native forests* Conferencia Conjunta de bosques y Agua 2018, Valdivia, Chile. https://www.researchgate.net/publication/329060308_Hydrological_impact_of_green_gold_avocado_culture_in_central_Mexico_rainfall_partition_and_water_use_comparison_with_native_forests
- Gómez-Tagle, A. F., Gómez-Tagle, A. J., F.-V. D., Barajas-Alcalá, A. G., Quiroz-Rivera, F., Alarcón-Cámaras, P. E., y Guerrero-García-Rojas, H. (2022). Huella hídrica azul y verde de la producción agroindustrial de aguacate en el centro de México. *Sostenibilidad*, 14(9664). <https://doi.org/10.3390/su14159664>
- Gómez, R., E. (2013). Valoración de las componentes del balance hídrico usando información estadística y geográfica: la cuenca del Valle de México. *Realidad, datos y espacio, revista internacional de estadística y geografía*, 4, 98. https://rde.inegi.org.mx/RDE_10/Doctos/RDE_10_opt.pdf
- González, V. F. J., Vázquez, H. E., Aguilar, A. E., y Arriaga, M. J. A. (2022). *Prespectivas del agua en México propuestas hacia la seguridad hídrica* (Red del Agua UNAM ed.). UNAM. https://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/Perspectivas_AguainMexico2022.pdf
- Gudynas, E. (2011). desarrollo y sustentabilidad ambiental: diversidad de posturas, tensiones persistentes. In R. Matarán, Alberto; y C. López, Fernando. (Eds.), *La tierra no es muda: diálogos entre el desarrollo sostenible y el postdesarrollo* (pp. 69-96). Universidad de Granada. <https://gudynas.com/publicaciones/GudynasUsosIdeasSustentabilidadGranada11.pdf>
- Hassan, S., y Rana, A. (2024). Blue and green water footprint assessment of rice crop in high altitude temperate zone of Kashmir, India. *Journal of Agrometeorology*, 26(2), 228-232. <https://doi.org/10.54386/jam.v26i2.2569>
- Hemareddy, T., Patil, R. H., Bheemashankar, B., Mohammed, R., Saif, Mahesh, H., Amith, G.,...Devappa. (2025). Sustainable water resource management under changing climate in north interior Karnataka: Insights from CROPWAT modelling on soybean. *Plant Science Today*, 12(2). <https://doi.org/10.14719/pst.7354>
- Hernández, S. A., Alcaraz, V. J. V., y Ortiz-Paniagua, C. F. (2025). Efectos del cambio climático en la agricultura regional. Caso de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i6.3246>
- Hoekstra, A. Y. (2003). *Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade*. https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/www/Programs/Virtual_Water/VirtualWater_Proceedings_IHE.pdf

- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., y Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan. <https://doi.org/10.4324/9781849775526>
- Hogeboom, R. J., Knook, L., y Hoekstra, A. Y. (2018). The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. *Advances in water resources*, 113, 285-294. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.01.028>
- Iacuzzi, N., Tortorici, N., Mosca, C., Bondì, C., Sarno, M., y Tuttolomondo, T. (2025). Crop Water Requirement Estimated with Data-Driven Models Improves the Reliability of CROPWAT 8.0 and the Water Footprint of Processing Tomato Grown in a Hot-Arid Environment. *Agronomy*, 15(7), 1533. <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/7/1533>
- IMCO. (2023). *Modernizar la regulación de aguas en México*. Instituto Mexicano para la Competitividad. Retrieved Mayo from <https://imco.org.mx/frente-al-cambio-climatico-urge-la-modernizacion-de-la-regulacion-de-aguas-en-mexico/>
- IMCO. (2025). *Aguas en México, ¿Escases o mala gestión?* Retrieved 08 Agosto from <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/>
- IMTA. (2019). *¿Qué es una cuenca?* Retrieved enero 2023 from <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>
- INEGI. (2018). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional*. INEGI. Retrieved abril from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>
- INEGI. (2020a). *Climas 1902-2011*. INEGI. Retrieved abril from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463769361>
- INEGI. (2020b). *Información Demográfica y Social*. Retrieved Diciembre from https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#datos_abiertos
- INEGI. (2024a). *Subterránea*. Retrieved 20 de octubre from <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/cuerpos.aspx?tema=T>
- INEGI. (2024b). *Usos del agua en México*. INEGI. Retrieved abril from https://cuentame.inegi.org.mx/explora/geografia/usos_del_agua/
- INEGI. (2025a). *Carta edafológica Escala 1:250 000 Serie III F1410*. INEGI. Retrieved abril from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551155905>
- INEGI. (2025b). *Distribución y usos del agua*. Retrieved 20 de agosto from https://cuentame.inegi.org.mx/explora/geografia/usos_del_agua/
- INEGI. (2026). *Mapa Digital de México*. INEGI. Retrieved abril from
- IPCC. (2023). *AR6 Synthesis Report*. Retrieved Julio from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- IPLAEM. (2019). *Lago de Cuitzeo*. Retrieved Mayo 2023 from <https://cpladem.michoacan.gob.mx/wp-content/uploads/2019/10/Lago-de-Cuitzeo-ejecutiva.pdf>
- Jia, X., y Duić, N. (2021). Advanced methods and technologies towards environmental sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(3), 709-710. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02024-z>
- Kakwani, N., y Kalbar, P. (2020). Review of Circular Economy in urban water sector: Challenges and opportunities in India. *Environmental Management*, 271(1). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111010>
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W.,...Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4(1), 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Kulariya, S. S., Rawat, S., James, A., y Gil, S. (2024). Analysing the Temporal Variation of \(\text{ET}_0\)) and Water Requirement of Mustard (*Brassica juncea* L.) Over Different

- Agroclimatic Zones of Uttar Pradesh by Using CROPWAT. 2024, 14, 54-66. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i94392>
- Kumari, E., y Rawat, S. (2025). Assessment of Blue and Green Water Footprint of Rice Crop for Prayagraj Region. *International Journal of Environment and Climate Change*, 15(10), 143-153. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2025/v15i105051>
- Leff, E. (1994). *Ecología y capital: racionalidad ambiental, democracia participativa y desarrollo sustentable* (Septima ed.). Siglo Veintiuno.
- Leventon, J., Abson, D. J., y Lang, D. J. (2021). Leverage points for sustainability transformations: nine guiding questions for sustainability science and practice. *Sustainability Science*, 16(3), 721-726. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-00961-8>
- Liu, Y., Yang, Y., y Wang, B. (2022). Entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* play roles of maize (*Zea mays*) growth promoter. *Scientific Reports*, 12(1), 15706. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19899-7>
- Loew, A., Bell, W., Brocca, L., Bulgin, C. E., Burdanowitz, J., Calbet, X.,...Verhoelst, T. (2017). Validation practices for satellite-based Earth observation data across communities. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 779-817. <https://doi.org/10.1002/2017RG000562>
- López-López, C., Exebio-García, A. A., Flores-Velázquez, J., Bolaños-González, M. A., y Rubiños-Panta, J. E. (2025). Evaluación Asociativa del Impacto Económico del Estrés Hídrico en la Producción Agrícola del Noreste de México Mediante Indicadores. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2077>
- López, G., Erna, Martha. (2006). *Patrones de Cambio de Uso del Terreno en la Cuenca del Lago de Cuitzeo* [Universidad Nacional Autónoma de México]. Mexico, D.F. https://repositorio.unam.mx/contenidos/patrones-de-cambio-de-uso-del-terreno-en-la-cuenca-de-cuitzeo-96164?c=pQ8wXB&d=false&q=Patrones%20de%20cambio%20de%20uso%20del%20terreno%20en%20la%20Cuenca%20de%20Cuitzeo&i=1&v=0&t=search_0&as=0
- Mahmoud, D. H., y Elnoby, A. K. (2022). A Comparative Study of the Most Important Vegetable Crops Production in Protected Agriculture and Sustainable Land. *Alexandria Science Exchange Journal*, 43(1), 363-377. <https://doi.org/10.21608/asejaqjsae.2022.224702>
- Mancosu, N., Snyder, R. L., Kyriakakis, G., y Spano, D. (2015). Water Scarcity and Future Challenges for Food Production. *Water*, 7(3), 975-992. <https://doi.org/10.3390/w7030975>
- Marínez, S. J. N., Cuéllar, R. L. G., Yerena, Y. J. I., Pérez, M. T. C., y Gárate, E. H. A. (2023). Comparación de bases de datos climáticos en la modelación de distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 14(79). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1350>
- Martínez, A., Juan. (1995). *Curso básico de economía ecológica* (primera, Ed.). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Oficina Regional para América Latina y el Caribe; PNUMA. <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=3383>
- Marzouk, O. A. (2021). Assessment of global warming in Al Buraimi, sultanate of Oman based on statistical analysis of NASA POWER data over 39 years, and testing the reliability of NASA POWER against meteorological measurements. *Heliyon*, 7(3), e06625. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06625>
- Mass, M. (2019). Los sistemas socioecológicos (SSE) desde el enfoque socioecosistémico (SES) In V. Ávila F., S. y M. Perevochtchikova (Eds.), *Sistemas socio-ecológicos: marcos analíticos y estudios de caso en Oaxaca, México* (pp. 334). Universidad

- Nacional Autónoma de México, DGAPA, Instituto de Investigaciones Económicas. <https://doi.org/10.22201/iiec.9786073013109e.2019>
- Meadows, H., Donella, J., Meadows, L. D., Randers, J., y Behrens III, W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books. https://collections.dartmouth.edu/xcdas-derivative/meadows/pdf/meadows_ltg-001.pdf?disposition=inline
- Mendoza, A. O. A., Bustos, T. Y. A., Rangel-Peraza, J. G., y Gabriel, L. J. (2025). Análisis de Calidad del Agua Subterránea de Sinaloa México. *Revista Veritas de Difusión Científica*, 6(1), 2098-2116. <https://doi.org/10.61616/rvdc.v6i1.501>
- Mendoza, M., Bocco, G., López, G., Erna, y Miguel, B. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 49, 92-117. <https://doi.org/10.14350/rig.30448>
- Mizyed, A., Mogheir, Y., y Hamada, M. (2025). Assessment of blue and green agricultural water footprint in the Gaza Strip, Palestine. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 21(2), 326-334. <https://doi.org/10.1093/inteam/vjae010> %J Integrated Environmental Assessment and Management
- Monteiro, L. A., Sentelhas, P. C., y Pedra, G. U. (2018). Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. *International Journal of Climatology*, 38(3), 1571-1581. <https://doi.org/10.1002/joc.5282>
- Munda, G. (2004). Métodos y Procesos Multicriterio para la Evaluación Social de las Políticas Públicas. *revista iberoamericana de economía ecológica*, 1, 31-45. <https://raco.cat/index.php/Revibec/article/view/38279>
- Muratoglu, A., Bilgen, G. K., Angin, I., y Kodal, S. (2023). Performance analyses of effective rainfall estimation methods for accurate quantification of agricultural water footprint. *Water Research*, 238, 120011. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120011>
- NASA. (2025). *NASA Prediction of Worldwide Energy Resources*. Retrieved Julio from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Nuralievich, E. M., y Rahmonovich, M. Q. (2021). The Importance of Water Resources in the Development of Agriculture in Surkhandarya Region and Issues of their Effective Use. *International Journal of Culture and Modernity*, 9, 67-72. <https://ijcm.academicjournal.io/index.php/ijcm/article/view/80>
- OCDE. (2013). *Making Water Reform Happen in Mexico*, OECD Studies on Water, OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264187894-en>
- Ochoa-Noriega, C. A., Aznar-Sánchez, J. A., Velasco-Muñoz, J. F., y Álvarez-Bejar, A. (2020). The Use of Water in Agriculture in Mexico and Its Sustainable Management: A Bibliometric Review. *Agronomy*, 10(12), 1957. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121957>
- Olivera-Guerra, L., Merlin, O., y Er-Raki, S. (2020). Irrigation retrieval from Landsat optical/thermal data integrated into a crop water balance model: A case study over winter wheat fields in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111627. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111627>
- ONU. (1987). *Informe Brundtland*. Nueva York: ONU Retrieved from http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMA_D-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf
- ONU. (2024). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Retrieved 31/07 from <https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/page/objetivos-de-desarrollo-sostenible#:~:text=Los%2017%20Objetivos%20de%20Desarrollo,1%20de%20enero%20de%202016>.

- ONU. (2025). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. Retrieved Enero 2025 from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Ortiz, P., Carlos, Francisco., y Gómez-Tagle, R., Alberto, Francisco. (2011). Lectura socio-ambiental de la cuenca de cuitzeo, perspectiva desde indicadores de desarrollo sustentable: Presión–estado–respuesta. *Revista Nicolaita de Estudios Económicos*, VI. <https://rnee.umich.mx/index.php/rnee/article/view/167>
- Ostrom, E. (2000). *El gobierno de los comunes. La evolución de las instituciones de acción colectiva* (Primera ed.). Fondo de Cultura Económica.
- Pacheco-Treviño, S., y Manzano-Camarillo, M. G. F. (2024). Review of water scarcity assessments: Highlights of Mexico's water situation. *WIREs Water*, 11(4), e1721. <https://doi.org/10.1002/wat2.1721>
- Pacheco-Vega, R. (2020). Governing Urban Water Conflict through Watershed Councils—A Public Policy Analysis Approach and Critique. *Water*, 12(1849). <https://doi.org/10.3390/w12071849>
- Pasiani, R., Mangesho, J. F., y Limbu, P. T. S. (2025). Estimation of Crop Water Requirements and Irrigation Demand for Maize and Rice in Morogoro, Tanzania Using the CROPWAT 8.0 Model. *Tanzania Journal of Engineering and technology*, 44(4), 39-48. <https://doi.org/10.65085/2619-8789.1045>
- Pedraza-Pérez, A. C. (2018). *Vulnerabilidad del Agua Subterránea al poniente de la ciudad de Morelia, Michoacán* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Morelia, Michoacán. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/4409
- Pena-Arancibia, J., y Ahmad, M.-u.-D. (2020). *CMRSET (CSIRO MODIS ReScaled EvapoTranspiration) monthly actual evapotranspiration (ETa) estimates at 500 m resolution for the canal commands in the Indus Basin Irrigated System (IBIS) in Pakistan from March 2000 to December 2018* (Version v1) Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. <https://doi.org/10.25919/18h2-vf51>
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., y Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- Pereira, L. S., Paredes, P., y Jovanovic, N. (2020). Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, 241, 106357. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>
- Pérez-Villarreal, J. (2018). *Estudio Hidrogeológico del sistema acuífero unificado al poniente de Morelia, Michoacán* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Morelia, Michoacán. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/3807
- Pierri, N., y Foladori, G. (2001). *Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sostenible* (Primera ed.). Trabajo y Capital. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/235858/desacuerdos-sobre-el-desarrollo-sustentable.pdf>
- Pimienta-Ramírez, L., Elizabeth. (2024). *Cambio de cobertura y uso del terreno en la cuenca del lago de Cuitzeo: un análisis del periodo 2000-2020* UMSNH]. Morelia, Michoacán. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/18515
- Pimienta-Ramírez, L., López-Granados, E. M., y Reyes-Abrego, G. A. (2025). Análisis del cambio de uso del suelo agrícola en la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán México. *Ecosistemas*, 34(1), 2895. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2895>

- Pratt, L., Ortega J., M. (2019). *Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado* Banco Interamericano de Desarrollo.
- Ramírez, P. Y. (2024). *Gestión del agua y sostenibilidad de los acuíferos en el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León* [Colegio de la Frontera Norte]. Monterrey, N. L. <https://posgrado.colef.mx/wp-content/uploads/2024/09/TESIS-Ramirez-Pichardo-Yasmin-MAGIA-1.pdf>
- Reddy, M., Ganachari, A., y K., L. (2020). Estimating reference evapotranspiration using CROPWAT model at Raichur region Karnataka. *the Pharma Innovation*, 9, 226-231. https://www.researchgate.net/profile/Ambrish-Ganachari/publication/343006858_Estimating_reference_evapotranspiration_using_CROPWAT_model_at_Raichur_region_Karnataka/links/5f114c26299bf1e548bd4869/Estimating-reference-evapotranspiration-using-CROPWAT-model-at-Raichur-region-Karnataka.pdf
- Rincón-Gutiérrez, A., Ricker, M., y Mas, J.-F. (2024). Comparación entre siete capas climáticas digitales para identificar áreas con alta precipitación anual en México (al menos 1 500 mm en promedio). *Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía*, 113. <https://doi.org/10.14350/ig.60779>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F.,...Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rodriguez-Garcia, M. T., Pedrozo-Acuña, A., y Breña-Naranjo, J. A. (2026). Impact of avocado expansion on deforestation and water availability in Michoacan, Mexico. *Hydrology Research*, 57(1), 31-60. <https://doi.org/10.2166/nh.2025.058>
- Rolland, L., y Vega, C., Y. (2010). La gestión del agua en México. *polis*, 6. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-23332010000200006
- Rosa, L., Chiarelli, D. D., Rulli, M. C., Dell'Angelo, J., y D'Odorico, P. (2020). Global agricultural economic water scarcity. 6(18), eaaz6031. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz6031>
- SADER. (2017a). *Agricultura protegida, cosecha segura*. Retrieved 22 de octubre from <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/agricultura-protegida-cosecha-segura#:~:text=Los%20principales%20alimentos%20que%20se,valor%20de%20la%20producci%C3%B3n%20agr%C3%ADcola>.
- SADER. (2017b). *Tipos de estructura para la agricultura protegida*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural Retrieved 08 de octubre from <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/tipos-de-estructura-para-la-agricultura-protegida>
- Salazar, O., Chinchilla-Soto, C., Santos-Villalobos, S. d. I., Ayala, M., Benavides, L., Berriel, V.,...Heng, L. (2022). Water consumption by agriculture in Latin America and the Caribbean: impact of climate change and applications of nuclear and isotopic techniques. *International journal of agriculture and natural resources*, 49, 1-21. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v49i1.2342>
- Sanchez, C., I., Catalán, V., E., González, C., G., Estrada, A., J., y García, A., D. (2006). Indicadores comparativos del uso del agua en la agricultura. *Agricultura técnica en México*, 32. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172006000300009
- Schaubroeck, T., y Rugani, B. (2017). A Revision of What Life Cycle Sustainability Assessment Should Entail. *Industrial Ecology*, 21(16), 1464-1477. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/jiec.12653>
- Scott, C. A. (2011). The water-energy-climate nexus: Resources and policy outlook for aquifers in Mexico. 47(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2011WR010805>

- SEMARNAT. (2015a). *Cuencas Hidrológicas*. CONAGUA. Retrieved abril from http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/agua_hidrologicas.html
- SEMARNAT. (2015b). *Regiones Hidrológicas - Administrativas*. SEMARNAT. Retrieved abril from http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/agua_RHA.html
- SIAP. (2018). *En la agricultura, los sistemas de riego son utilizados para un aprovechamiento óptimo del agua*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Retrieved 08 de octubre from <https://www.gob.mx/siap/articulos/en-la-agricultura-los-sistemas-de-riego-son-utilizados-para-un-aprovechamiento-optimo-del-agua?idiom=es>
- SIAP. (2023). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Retrieved 07/2023 from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SIAP. (2024a). *Información Geoespacial*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera Retrieved 08 de octubre del 2024 from <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/informacion-geoespacial-32571>
- SIAP. (2024b). *Producción Agrícola*. Retrieved junio from <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- SIATL. (2026). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. INEGI. Retrieved Mayo from https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- SINA. (2021). *Grado de presión (Regional)*. Retrieved Enero 2023 from http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=gradoPresion
- SINA. (2022a). *Distritos y unidades de riego*. Retrieved 02 de noviembre from <https://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?p=14>
- SINA. (2022b). *Uso consultivo agrupado* CONAGUA. Retrieved abril from <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=usosAgua&ver=grafica&o=2&n=nacional>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M.,...Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. 347(6223), 1259855. <https://doi.org/doi:10.1126/science.1259855>
- Tiburcio, A., y Perevochtchikova, M. (2020). Propuesta de un marco de indicadores de agua urbana para la Ciudad de México, 2005-2018/Proposal for an urban water indicators framework for Mexico City, 2005-2018. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(6), 177-243. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-06-05>
- Valencia-Gonzalez, J. N., Arteaga-Ramírez, R., Vasquez-Peña, M. A., y Quevedo-Nolasco, A. (2022). Relleno de datos diarios faltantes en registros de series climatológicas temporales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(4). <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i4.2514>
- Vidal, Z. R. (2010). Clima. In H. S. Cram, S. L. Galicia, y A. I. Israde (Eds.), *Atlas de la Cuenca del Lago Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental* (Vol. I, pp. 24). UNAM, Instituto de Geografía.
- Villafán-Vidales, K. B., Arellanes-Cancino, Y., Rosalía, L. P., y Ayala-Ortiz, D. A. (2021). Situación socioambiental en el lago de Cuitzeo, Michoacán (México), desde la responsabilidad social. *Economía, sociedad y territorio*, 21, 599-629. <https://doi.org/10.22136/est20211694>
- Villani, G., Castaldi, P., Toscano, A., Stanghellini, C., Cinotti, T. S., Maia, R. F.,...Panizzi, S. (2018, 13-16 Nov. 2018). Soil Water Balance Model CRITERIA-ID in SWAMP Project: Proof of Concept. 2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT),
- Villanueva, D. J., Cerano, P., Julián, Estrada, Á., Juan, Morán, M., Roque, y Constante, G., Vicenta. (2010). Precipitación y gasto reconstruido en la cuenca baja del río Nazas. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 1(1).

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322010000100004&script=sci_arttext

- Viveros, R. (2025). *Los acuíferos de México en crisis: la sobreexplotación y la escasez atentan contra estos reservorios ocultos de agua*. Retrieved enero from <https://noticiasambientales.com/medio-ambiente/los-acuiferos-de-mexico-en-crisis-la-sobreexplotacion-y-la-escasez-atentan-contra-estos-reservorios-ocultos-de-agua/>
- Wani, S. A., Subhash;, C., y Tahir, A. (2013). Uso potencial de *Azotobacter Chroococcum* en la producción de cultivos: una visión general. *Current Agriculture Research Journal*, 1(1). <https://doi.org/10.12944/CARJ.1.1.04>
- Yetik, A., Kaan;, y Sen, B. (2022). Evaluation of the Impacts of Climate Change on Irrigation Requirements of Maize by CROPWAT Model. *Gesunde Pflanzen*, 75, 1297-1305. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00751-x>
- Yu, Q., y Cui, Y. (2022). Improvement and testing of ORYZA model water balance modules for alternate wetting and drying irrigation. *Agricultural Water Management*, 271, 107802. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107802>
- Zhuo, L., Mekonnen, M. M., y Hoekstra, A. Y. (2016). The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade: A study for China (1978–2008). *Water Research*, 94, 73-85. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.037>
- Zubelzu, S., Rodríguez-Sinobas, L., Sordo-Ward, A., Pérez-Durán, A., y Cisneros-Almazán, R. (2020). Multi-objective approach for determining optimal sustainable urban drainage systems combination at city scale. the case of San Luis Potosí (México). *Water*, 12(3), 835. <https://doi.org/10.3390/w12030835>

Gerardo Andrés Reyes Abrego

Evaluación de la sostenibilidad hídrica agrícola de 4 cultivos clave integrando concesiones climáticas ajustados y huella híd...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:599484808

Fecha de entrega

12 jun 2026, 7:43 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

12 jun 2026, 7:51 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Evaluación de la sostenibilidad hídrica agrícola de 4 cultivos clave integrando concesiones climát....pdf

Tamaño del archivo

11.1 MB

170 páginas

56.786 palabras

320.805 caracteres

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 6%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
49 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Doctorado en Desarrollo y Sustentabilidad (DODESU)	
Título del trabajo	Evaluación de la sostenibilidad hídrico agrícola de 4 cultivos clave integrando concesiones climáticas ajustados y huella hídrico en la Cuenca de Cuitzeo en el 2023	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Gerardo Andrés Reyes Abrego	9501775d@umich.mx
Director	Salvador García Espinosa	salvador.garcia.espinosa@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Juan Carlos Hidalgo Sanjurjo	doc.desarrollo.sustentabilidad@umich.mx

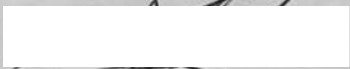
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (si/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Pos grado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (si/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	Si	Se uso para el Abstract
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	Si	Se hizo uso para aprender temas que se desconocía al ser una tesis multidisciplinaria y ampliar más el conocimiento
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	Si	Se uso para corregir problemas de carácter técnicos en programas como Arcgis, Excel Word, CropWat, Global Mapper, entre otros.

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Gerardo Andrés Reyes Abrego 
Lugar y fecha	16 de junio del 2006