



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS DOCTORAL

***EL NEXO AGUA-ALIMENTOS EN EL VALLE DE
TULANCINGO, HIDALGO***

PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA

M.C. Georgina Itandehui Avila Castañeda

Directora

Dra. Alma Delia Román Gutiérrez

Codirectora

Dra. Elena María Otazo Sánchez

Comité tutorial

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval

Dra. Silvia Chamizo Checa

Dr. Eric Galindo Castillo

Dr. Ramón Razo Zarate

Dra. Gabriela Marisol Vázquez Cuevas

Mineral de la Reforma, febrero de 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 11 de febrero de 2026

Número de control: ICBI-D/0220/2026
Asunto: Autorización de impresión de tesis.

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

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado a la **M.C. Georgina Itandehui Ávila Castañeda**, alumna del Doctorado en Ciencias Ambientales (Tradicional) con número de cuenta 483030, autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado "El Nexa agua-alimentos en el Valle de Tulancingo, Hidalgo", en virtud de que se han efectuado las revisiones y correcciones pertinentes.

A continuación, se registran las firmas de conformidad de los integrantes del comité revisor.

PRESIDENTE	Dra. Elena María Otazo Sánchez
SECRETARIO	Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval
1 ^{er} VOCAL	Dra. Alma Delia Román Gutiérrez
2 ^{do} VOCAL	Dr. Ramón Razo Zárate
3 ^{er} VOCAL	Dr. Eric Galindo Castillo
1 ^{er} SUPLENTE	Dra. Gabriela Marisol Vázquez Cuevas
2 ^{do} SUPLENTE	Dra. Silvia Chamizo Checa

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

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

GVRCAGR



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx



Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron a la realización de este logro académico:

A mi Directora Dra. Ama Delia Román Gutiérrez, por siempre guiarme y brindarme su confianza, amistad y consejos para superarme tanto profesional como personalmente, pero, sobre todo, por proporcionarme sabidurías para llegar a ser una sobresaliente investigadora. Muchas gracias Doc.

A mi Codirectora Dra. Elena María Otaño Sánchez, por confiar en mí desde el inicio y darme la oportunidad de formar parte del equipo Nexo. Por la paciencia, conocimientos y hospitalidad que siempre me ofreció para lograr un buen trabajo de investigación. Gracias Doc.

A mi Comité tutorial: Dra. Silvia Chamizo Checa, por proporcionarme sus conocimientos y asesoría para lograr un trabajo de investigación de calidad científica. Dr. Ramón Razo Zarate, por su apoyo y atinadas recomendaciones en todos los seminarios y siempre brindarnos una sonrisa y amabilidad ante cualquier duda. Dr. Eric Galindo Castillo, por sus invaluable conocimientos en I.F.G. y siempre obsequiarnos de su tiempo y paciencia para asesorarnos y guiarnos académicamente. Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval, por su amabilidad y observaciones puntuales para lograr enriquecer el trabajo de investigación. Dra. Gabriela Marisol Vázquez Cuevas, por confiar en el proyecto de investigación y proporcionarme recomendaciones para enriquecer la presentación.

A mis colegas y amigos "Team Nexo", especialmente a Adriano, quien siempre tuvo el entusiasmo y disposición de apoyarme en todos los retos hídricos y de investigación que nos enfrentamos. Mil gracias.

A mis compañeros del Doctorado en Ciencias Ambientales y Doctorado en Química de Alimentos por todas las horas congelantes en la Torre compartiendo historias, conocimientos y habilidades.

A toda mi familia, tanto la que me une por sangre, como a los que he elegido con el corazón: especialmente a mis hermanos y sobrinos. Gracias por sus saberes, por las alegrías compartidas, por su apoyo constante y por el amor incondicional que me han brindado en cada paso de este nuevo reto académico. Su presencia ha sido mi fortaleza y mi mayor inspiración. ¡Lo logramos familia!

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, al Doctorado en Ciencias Ambientales 00312, por proporcionar las herramientas y el entorno académico necesarios para dicha investigación. A los compañeros de la Torre de Posgrado, por brindarme siempre con cordialidad su apoyo técnico para el desarrollo de esta investigación.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por otorgarme la beca doctoral 289499, la cual brindó los recursos económicos fundamentales para llevar a cabo este proyecto de investigación.



Dedicatoria

A mis padres, por ser mi raíz y mi refugio.

*Gracias por enseñarme que los sueños se construyen con
esfuerzo, humildad y perseverancia.*

Este logro también es suyo, reflejo de todo lo que me han dado.

*A tío Huachito [♥] siempre están presentes todas tus enseñanzas,
risas y consejos... ¡Hasta la victoria siempre!*

*A Dani Nicté-Há [✽] tu amor permanece eterno
en mi corazón y en cada meta alcanzada.*

*A mí,
por la valentía de emprender este camino,
por creer en mi vocación y
transformar los desafíos en aprendizaje.*

CONTENIDO

RESUMEN..... 1

ABSTRACT..... 2

I. INTRODUCCIÓN..... 3

II. MARCO TEÓRICO 5

 2.1. Escasez hídrica y alimentaria 5

 2.2. Evolución y desarrollo del Nexo agua-alimentos..... 8

 2.2.1. Concepto Nexo agua-alimentos 8

 2.2.2. Desarrollo del Nexo agua-alimentos 9

 2.3. Modelado hídrico y herramientas para evaluar el Nexo agua-alimentos 13

 2.4. Sustentabilidad hídrica y alimentaria del Nexo agua-alimentos 17

III. ANTECEDENTES 20

 3.1. Investigaciones destacadas en la aplicación del Nexo agua-alimentos por zona geográfica 20

 3.2. Inseguridad hídrica y alimentaria en la zona de estudio..... 27

IV. OBJETIVOS..... 30

 Objetivo general 30

 Objetivos específicos 30

V. METODOLOGÍA..... 31

 5.1. Caracterización del área de estudio 31

 5.1.1. Localización 31

 5.1.2. Parámetros climatológicos y edáficos 32

 5.1.3. Hidrología 35

 5.1.4. Aspectos agrícolas y pecuarios..... 36

 5.1.5. Situación socioeconómica e industrial 40

 5.2. Modelación hidrológica del valle de Tulancingo 41

 5.2.1. Modelo conceptual. Año base 2013 41

 5.2.2. Datos de entrada para modelaje en WEAP..... 43

 5.2.3. Modelo matemático. Año base 2013 48



5.2.4. Balance hídrico.....	49
5.2.5. Demanda de agua subterránea y superficial	53
5.2.6. Calibración y validación del modelo matemático	53
5.2.7. Escenarios en condiciones transitorias	57
5.3. Indicadores de estrés hídrico	63
5.3.1. Índice de Falkenmark.....	63
5.3.2. Nivel de estrés hídrico mediante el Indicador 6.4.2. de los ODS	64
5.3.3. Indicador WaSSI (Índice de estrés de suministro de agua)	64
5.3.4. Indicador SWaSSI (Índice de estrés hídrico sectorial agrícola)	65
5.4. Indicadores de sustentabilidad para el Nexa agua-alimentos.....	65
5.4.1. Indicador consumo de agua.....	65
5.4.2. Indicador productividad del agua.....	66
5.4.3. Indicador productividad económica del agua agrícola.....	66
5.4.4. Indicador disponibilidad de alimentos	66
5.4.5. Índice Nexa agua-alimentos.....	67
5.4.6. Indicadores para el bienestar humano y ecológico: Nexa agua-alimentos	68
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	72
6.1. Situación agrícola y socioeconómica del valle de Tulancingo.....	72
6.2. Evaluación integral del sistema hídrico mediante modelación	75
6.2.1. Demanda de agua subterránea y superficial. Año base 2013	75
6.2.2. Balance hídrico en el valle de Tulancingo para el año base 2013.....	78
6.2.4. Recarga del acuífero y resultados del Año base (2013)	80
6.2.5. Calibración y validación del modelo.....	81
6.2.6. Escenarios en condiciones transitorias.....	84
6.2.7. Efectos acumulativos del agua subterránea en el valle de Tulancingo	96
6.3. Estrés hídrico en el valle de Tulancingo.....	99
6.3.1. Estimación de Recarga natural.....	99
6.3.2. Índice de Falkenmark en el valle de Tulancingo.....	100
6.3.3. Indicador 6.4.2. de los ODS en el valle de Tulancingo.....	102
6.3.4. Índice de estrés de suministro de agua (WaSSI) en el valle de Tulancingo	105
6.3.5. Índice de estrés hídrico sectorial agrícola (SWaSSI) en el valle de Tulancingo	108
6.4. Indicadores de sustentabilidad del Nexa agua-alimentos en el valle de Tulancingo.....	110



6.4.1. Consumo de agua.....	110
6.4.2. Productividad del agua.....	111
6.4.3. Productividad económica del agua agrícola.....	113
6.4.4. Disponibilidad de alimentos.....	115
6.4.5. Índice del Nexo agua-alimentos en el valle de Tulancingo.....	116
6.4.6. Resultados de indicadores para el bienestar ecológico y humano	117
6.4.7. Indicadores de sustentabilidad con enfoque Nexo agua-alimentos a nivel regional.....	121
6.4.8. Indicadores de sustentabilidad en el Nexo agua-alimentos y su relación con los ODS	124
VII. PERSPECTIVAS Y RECOMENDACIONES DE LA ZONA DE ESTUDIO	127
VIII. CONCLUSIONES	129
IX. REFERENCIAS.....	134
X. ANEXOS.....	146



INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. EVOLUCIÓN DE LA ESCASEZ ALIMENTARIA A NIVEL GLOBAL.....	7
FIGURA 2. DIAGRAMA DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS	9
FIGURA 3. EVOLUCIÓN DEL ENFOQUE NEXO	11
FIGURA 4. AMPLIACIONES DEL ENFOQUE NEXO.....	13
FIGURA 5. TIPOS DE ANÁLISIS Y HERRAMIENTAS PARA EVALUAR EL NEXO	14
FIGURA 6. PUBLICACIONES CIENTÍFICAS REFERENTES AL NEXO (2012-2026).....	21
FIGURA 7. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE PUBLICACIONES CIENTÍFICAS DEL NEXO (2012-2026).....	21
FIGURA 8. ÁREAS TEMÁTICAS ENFOCADAS AL NEXO Y REDES GLOBALES DE COLABORACIÓN	22
FIGURA 9. ANÁLISIS DE CONTENIDO EXPLORATORIO DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS	23
FIGURA 10. NIVELES DE SEQUÍA EN EL VALLE DE TULANCINGO AÑO 2024	28
FIGURA 11. LOCALIZACIÓN Y ELEVACIONES DEL VALLE DE TULANCINGO	32
FIGURA 12. POLÍGONOS DE THIESEN Y ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DEL VALLE DE TULANCINGO.....	33
FIGURA 13. VALORES PROMEDIO DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DEL VALLE (1998- 2017)	34
FIGURA 14. ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN DEL VALLE DE TULANCINGO	34
FIGURA 15. RED HIDROLÓGICA DEL VALLE DE TULANCINGO.....	35
FIGURA 16. ACUÍFERO DEL VALLE DE TULANCINGO.....	36
FIGURA 17. PROPORCIÓN DE CULTIVOS EN SUPERFICIE TOTAL DEL VALLE DE TULANCINGO	37
FIGURA 18. PRODUCCIÓN AGRÍCOLA: CUAUTEPEC, TULANCINGO, ACAXOCHITLÁN Y METEPEC (2010-2021).....	38
FIGURA 19. PRODUCCIÓN AGRÍCOLA: SANTIAGO TULANTEPEC, ACATLÁN Y SINGUILUCAN (2010-2021)	39
FIGURA 20. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE INDUSTRIAS EN EL VALLE DE TULANCINGO.....	40
FIGURA 21. GEOPROCESOS PARA DELIMITAR LAS SUBCUENCAS DEL VALLE DE TULANCINGO.....	44
FIGURA 22. DIAGRAMA EN WEAP DEL MODELO CONCEPTUAL DEL VALLE DE TULANCINGO	48
FIGURA 23. INTERPOLACIONES DEL VALLE DE TULANCINGO MEDIANTE KRIGING (2013)	49
FIGURA 24. UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA 26807 DEL VALLE DE TULANCINGO	54
FIGURA 25. SUBCUENCA DE CALIBRACIÓN DEL VALLE DE TULANCINGO	54
FIGURA 26. VOLÚMENES HISTÓRICOS DE ESCURRIMIENTO DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA 26807	55
FIGURA 27. DIAGRAMA PRISMA PARA INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS	69
FIGURA 28. PRODUCCIÓN MUNICIPAL TOTAL AGRÍCOLA DEL VALLE DE TULANCINGO (2013).....	72
FIGURA 29. PRODUCCIÓN MUNICIPAL TOTAL PECUARIA DEL VALLE DE TULANCINGO (2013)	74
FIGURA 30. DIAGRAMA DE SANKEY DEL BALANCE HIDROLÓGICO DEL VALLE DE TULANCINGO: 2013 (HM ³ /AÑO).....	79
FIGURA 31. BALANCE HÍDRICO POR SUBCUENCA DEL VALLE DE TULANCINGO (MODELO MATEMÁTICO WEAP): 2013.....	80
FIGURA 32. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL VALLE DE TULANCINGO	82
FIGURA 33. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO	83
FIGURA 34. DIAGRAMA DE SANKEY DEL BALANCE HIDROLÓGICO: ESCENARIO BAU 2050 (HM ³ /AÑO).....	85



FIGURA 35. DIAGRAMA DE SANKEY DEL BALANCE HIDROLÓGICO: ESCENARIO DE REFERENCIA 2050 (HM³/AÑO) 86

FIGURA 36. DEMANDAS DE AGUA SUBTERRÁNEA CONSIDERANDO MEDIDAS DE MITIGACIÓN.....97

FIGURA 37. INDICADOR CONSUMO DE AGUA 2030 Y 2050 EN DIFERENTES ESCENARIOS VALLE DE TULANCINGO 111

FIGURA 38. INDICADOR PRODUCTIVIDAD DEL AGUA 2030 Y 2050 EN DIFERENTES ESCENARIOS VALLE DE TULANCINGO 112

FIGURA 39. INDICADOR PRODUCTIVIDAD ECONÓMICA DEL AGUA 2030 Y 2050 DEL VALLE DE TULANCINGO..... 114

FIGURA 40. INDICADOR DISPONIBILIDAD DE ALIMENTOS VALLE DE TULANCINGO: ESCENARIO REFERENCIA 2030 Y 205..... 116

FIGURA 41. ÍNDICE DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS DEL VALLE DE TULANCINGO..... 117

FIGURA 42. INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS Y SU RELACIÓN CON LOS ODS 125



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. INDICADORES PARA EVALUAR EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS.....	19
TABLA 2. ESTUDIOS RELEVANTES DE ÍNDICES E INDICADORES PARA EL NEXO AGUA-ALIMENTOS	24
TABLA 3. VARIABLES EMPLEADAS PARA MODELADO EN WEAP	43
TABLA 4. ASPECTOS SOCIODEMOGRÁFICOS DEL VALLE DE TULANCINGO (2013)	47
TABLA 5. COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA E INFILTRACIÓN PARA CADA SUBCUENCA EN PORCENTAJE.....	51
TABLA 6. COEFICIENTES DE CULTIVO Y RENDIMIENTOS MÁXIMOS DE CULTIVOS DEL VALLE DE TULANCINGO (2013).....	52
TABLA 7. VALORES DE KC PARA EL MAÍZ GRANO UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	56
TABLA 8. PROYECCIONES DE POBLACIÓN PARA LAS SUBCUENCAS DEL VALLE DE TULANCINGO.....	58
TABLA 9. TASAS DE CRECIMIENTO DEL SECTOR URBANO, INDUSTRIAL Y AGRÍCOLA EN CADA SUBCUENCA (%)	58
TABLA 10. PROYECCIONES DE PORCENTAJE DE USO DE SUELO UTILIZADOS EN WEAP (2020 Y 2030)	59
TABLA 11. PROYECCIONES DE PORCENTAJE DE USO DE SUELO UTILIZADOS EN WEAP (2040 Y 2050)	59
TABLA 12. PROYECCIONES DE VARIABLES CLIMÁTICAS EN ESCENARIO DE REFERENCIA SSP3-RCP7.....	60
TABLA 13. CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE FALKENMARK	63
TABLA 14. CLASIFICACIÓN DE ESTRÉS HÍDRICO SEGÚN INDICADOR 6.4.2. DE LOS ODS.....	64
TABLA 15. CLASIFICACIÓN DE ESTRÉS HÍDRICO SEGÚN INDICADOR WASSI	65
TABLA 16. INTENSIDAD DE IMPORTANCIA DE LOS INDICADORES DEL ÍNDICE DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS	67
TABLA 17. MATRIZ DE SAATY PARA EL ÍNDICE NEXO AGUA-ALIMENTOS	67
TABLA 18. NORMALIZACIÓN Y PONDERACIÓN DE MATRIZ DE SAATY PARA EL ÍNDICE NEXO AGUA-ALIMENTOS.....	68
TABLA 19. INDICADORES REGIONALES PARA DETERMINAR LA SUSTENTABILIDAD DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS	70
TABLA 20. PORCENTAJE DE SUPERFICIE AGRÍCOLA TEMPORAL: SUBCUENCAS VALLE DE TULANCINGO (2013).....	73
TABLA 21. PORCENTAJE DE SUPERFICIE AGRÍCOLA DE RIEGO: SUBCUENCAS DEL VALLE DE TULANCINGO (2013).....	73
TABLA 22. ÁREA Y DEMANDAS DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL POR SECTOR Y SUBCUENCA: (2013)	75
TABLA 23. ERROR ESTÁNDAR MEDIO DEL MODELO MATEMÁTICO DEL VALLE DE TULANCINGO	82
TABLA 24. VOLÚMENES DE ENTRADA Y SALIDA PARA 2030 Y 2050 EN TODOS LOS ESCENARIOS DE TRANSICIÓN	88
TABLA 25. VOLÚMENES DE SUMINISTRO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL POR ESCENARIO Y SUBCUENCA (HM ³).....	94
TABLA 26. EFECTOS ACUMULATIVOS EN VOLÚMENES DE AGUA SUBTERRÁNEA POR PERTURBACIONES: 2030 Y 2050.....	98
TABLA 27. ESTIMACIÓN DE RECARGA NATURAL PARA EL VALLE DE TULANCINGO (AÑO BASE 2013).....	99
TABLA 28. COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE FALKENMARK: CRECIMIENTO INERCIAL Y CAMBIO CLIMÁTICO 2013- 2050.....	100
TABLA 29. NIVEL DE ESTRÉS HÍDRICO SEGÚN INDICADOR 6.4.2. DE LOS ODS EN DIFERENTES ESCENARIOS	104
TABLA 30. NIVEL DE ESTRÉS HÍDRICO SEGÚN INDICADOR 6.4.2. SIN CONSIDERAR CAUDAL ECOLÓGICO.....	105
TABLA 31. ÍNDICE WASSI VALLE DE TULANCINGO BAJO DIFERENTES ESCENARIOS: SECTOR URBANO E INDUSTRIAL.....	107
TABLA 32. ÍNDICE SWASSI DEL VALLE DE TULANCINGO EN DIFERENTES ESCENARIOS.	109
TABLA 33. INDICADORES REPORTADOS PARA EVALUAR LA SUSTENTABILIDAD DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS.....	118
TABLA 34. VENTAJAS Y LIMITANTES DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS	122



ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AHP	Proceso de jerarquía analítica
AT	Agricultura de temporal
AR	Agricultura de riego
BAU	Escenario de crecimiento inercial (Business As Usual, por sus siglas en inglés)
Ce	Coefficiente de escorrentía
Ci	Coefficiente de infiltración
COESPO	Consejo Estatal de Población
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Consejo Nacional de Población
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social
DA	Disponibilidad de alimentos
DDR	Distrito de riego
DENUE	Directorio Nacional Estadístico de Unidades Económicas
DMA	Disponibilidad media anual de agua
Et _o	Evapotranspiración
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
Ha	Hectárea
hm ³	Hectómetros cúbicos
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
Kc	Coefficiente de cultivo
L.B.	Línea base
M1-M12	Medidas de mitigación
MAPE	Error Porcentual Absoluto Medio
MDE	Mapa digital de elevación
mm	Milímetros



msnm	Metros sobre el nivel del mar
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONG	Organización No Gubernamental
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SIATL	Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SIGACUA	Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SWaSSI	Índice de estrés hídrico sectorial agrícola
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales
UNCCD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación
USD	Dólares estadounidenses
WaSSI	Índice de estrés de suministro de agua
WEAP	Water Evaluation and Planning System
WEF	Nexo agua-energía-alimentos
WEV	Productividad económica del agua agrícola
ZU	Zona urbana



RESUMEN

El agua y los alimentos son esenciales para la vida y el desarrollo socioeconómico. Frente a su creciente demanda y escasez global, el enfoque Nexo agua-alimentos propone una gestión integrada que reconoce su interdependencia, reduce conflictos en el uso del agua y optimiza sinergias productivas mediante modelos e indicadores que evalúan impactos ambientales, económicos y sociales.

En este contexto, la investigación evalúa el Nexo agua-alimentos en el Valle de Tulancingo, mediante escenarios proyectados a 2050 en el software WEAP, con el propósito de proponer estrategias sustentables de adaptación y mitigación que fortalezcan la toma de decisiones y el diseño de políticas públicas. El análisis evidenció que el valle destina más del 65% del territorio a la agricultura, destacando el maíz grano blanco. El agua constituye el eje del sistema productivo; aunque existen fuentes superficiales, el acuífero de Tulancingo es la principal fuente de abastecimiento, y el 79% del volumen extraído se destina al sector agropecuario.

El modelo hidrológico desarrollado basado en datos oficiales y calibrado con información de 2013, mostró una fuerte dependencia del agua subterránea (81.8%) y una evapotranspiración que representa el 74% de las salidas del sistema, lo que revela vulnerabilidad ante la variabilidad climática.

Los escenarios predictivos proyectan un déficit acumulado de 187 hm³ para 2050 si continúan las tendencias actuales. No obstante, la implementación conjunta de las medidas de mitigación propuestas, principalmente el aumento de la eficiencia del riego agrícola y mejoras en los sectores urbano e industrial, podría generar un superávit de 252 hm³. Los indicadores del índice del Nexo agua-alimentos demostraron ser herramientas clave para evaluar productividad, rentabilidad y sostenibilidad, alineándose con 10 ODS. En conjunto, el estudio subraya que el futuro hídrico del valle dependerá más de la gestión integral y multisectorial que de la disponibilidad natural del recurso.

De este modo se contribuye a una gestión sustentable, replicable en otras regiones con condiciones similares, orientado hacia la mitigación de la escasez hídrica y la promoción del desarrollo sustentable.



ABSTRACT

Water and food are essential for life and socioeconomic development. Faced with their growing demand and global scarcity, the Water-Food Nexus approach proposes integrated management that recognizes their interdependence, reduces conflicts in water use, and optimizes productive synergies through models and indicators that assess environmental, economic, and social impacts.

In this context, the research evaluates the water-food nexus in the Tulancingo Valley using scenarios projected to 2050 in the WEAP software, with the aim of proposing sustainable adaptation and mitigation strategies that strengthen decision-making and public policy design. The analysis revealed that the valley dedicates more than 65% of its territory to agriculture, with white corn being the most prominent crop. Water is central to the production system; although surface water sources exist, the Tulancingo aquifer is the primary source of supply, and 79% of the extracted volume is used by the agricultural sector.

The hydrological model developed based on official data and calibrated with information from 2013, showed a strong dependence on groundwater (81.8%) and evapotranspiration that represents 74% of the system's outputs, revealing vulnerability to climate variability.

Predictive scenarios project a cumulative deficit of 187 hm³ by 2050 if current trends continue. However, the joint implementation of the proposed mitigation measures, primarily increased agricultural irrigation efficiency and improvements in the urban and industrial sectors, could generate a surplus of 252 hm³. The Water-Food Nexus Index indicators proved to be key tools for assessing productivity, profitability, and sustainability, aligning with 10 Sustainable Development Goals (SDGs). Overall, the study underscores that the valley's water future will depend more on integrated, multi-sectoral management than on the natural availability of the resource.

This contributes to sustainable management, replicable in other regions with similar conditions, aimed at mitigating water scarcity and promoting sustainable development.



I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para la vida, se consume directamente, se utiliza en la agricultura, la industria y en la producción de energía, por ello tiene una importancia crucial tanto a nivel biológico como socioeconómico (Ahmad *et al.*, 2024; Hirko, Du Plessis, & Bosman, 2025). A su vez, los alimentos se pueden considerar el otro recurso primordial no sólo para la vida humana, sino también para asegurar un equilibrio social, cultural, económico y ambiental.

Sin embargo, se estima que, del total del agua dulce disponible en el mundo, únicamente el 30% corresponde a agua subterránea almacenada en acuíferos, los cuales se encuentran distribuidos geográficamente de forma desigual, por lo que la disponibilidad varía en función de la geología, el clima y la extracción humana (Iagua, 2025). A su vez, la fragmentación del recurso hídrico en 276 cuencas y 300 acuíferos transfronterizos pone en riesgo la disponibilidad y dificulta una gestión sostenible e integrada (World Bank Group, 2022). Es así que para 2050 se prevé que la demanda de este recurso aumente en un 55% (Gai *et al.*, 2022).

En el caso de los alimentos, existe una prevalencia de la subalimentación, la cual es una condición en la que una persona no consume suficientes nutrientes para mantener una salud óptima y una actividad física normal. Reportándose países en donde más del 35% de la población padece de subalimentación crónica (FAO, 2025). Asimismo, se prevé que para el 2050, la demanda de los alimentos aumente en un 70% (Wang, Xie, Qi, He, & Bo, 2022)

Toda esta problemática y desafíos a mitigar, se deben principalmente a diferentes factores como: un acelerado crecimiento poblacional; un constante cambio climático con presencia de sequías extremas, aumento en las temperaturas tanto del área continental, como marina, inundaciones, entre otros. Asimismo, la expansión de la urbanización y sobre todo las actividades antropogénicas como el consumo excesivo del agua y la energía, la forma en que nos desplazamos, lo que consumimos y lo que derrochamos. Todo ello, ha modificado el entorno de múltiples maneras y han generado un grado de inseguridad alimentaria en todas las regiones del mundo.

De igual forma, los cambios culturales y económicos como la desigualdad han afectado negativamente la demanda de estos recursos y, en consecuencia, el impacto al medio ambiente es cada día más acelerado y adverso (Molajou *et al.*, 2021).



En este sentido, se ha buscado un enfoque que gestione de forma integral el cambio climático, la eminente demanda y el uso de los recursos (Loeb, 2016), sin comprometer los de las futuras generaciones.

Siendo el enfoque Nexo agua-alimentos el que logra minimizar o eliminar las sinergias y maximizar las compensaciones entre el agua y los alimentos, debido a la inevitable interdependencia, interrelación e interacción de los dos recursos. “Un ejemplo de estas interrelaciones son las sequías extremas provocadas por el cambio climático, que pueden dar lugar a importantes problemas de seguridad alimentaria e hídrica, debido a la intensificación del estrés en el suministro de agua” (Zhang, et al., 2018, citado en Avila-Castañeda et al., 2023 p. 30).

Asimismo, para abordar este enfoque de manera integral, es esencial utilizar modelos predictivos, herramientas metodológicas e indicadores o índices, debido a que estos instrumentos permiten evaluar, comparar y controlar los impactos sobre el medio ambiente, pero también se pueden emplear para analizar aspectos humanos o económicos (Hatjiathanassiadou et al., 2023).

En este sentido, la tesis propone un modelo para cuantificar el Nexo agua-alimentos en el valle de Tulancingo, Hidalgo considerando la demanda creciente de los dos recursos y las perturbaciones por el cambio climático, que conllevan a la sobreexplotación del agua subterránea y por lo tanto generan un grado de escasez hídrica en la zona.

Este estudio es un aporte metodológico, debido a que el modelo se puede aplicar en otras regiones con condiciones socio ambientales similares. De igual forma, las medidas de mitigación propuestas de forma sectorizada brindan la oportunidad de considerar estrategias puntuales, una mejor gestión de los recursos mediante la toma de decisiones a corto y largo plazo. A su vez, mediante el uso de los indicadores de sustentabilidad con enfoque de Nexo, se puede lograr un desarrollo sustentable y finalmente un bienestar ecológico y social en el valle de Tulancingo.



II. MARCO TEÓRICO

2.1. Escasez hídrica y alimentaria

Se estima que la demanda de agua dulce a nivel global es de 4.6 billones de m³ anuales (Aqua, 2021) debido a que alrededor de 2,500 millones de personas en el mundo dependen directamente de las extracciones de agua subterránea para su supervivencia y desarrollo económico (World Bank Group, 2022).

Además, los hábitos de consumo también se han modificado después de la pandemia de COVID-19, debido a que se emplea más agua para satisfacer las nuevas necesidades de saneamiento e higiene (Li et al., 2025), factores que ponen en riesgo la disponibilidad y sostenibilidad del recurso de forma global.

Paralelamente, la población mundial crece rápidamente demandando más agua, lo que ocasiona un déficit entre la demanda prevista y la oferta disponible, previéndose que para el año 2050 aumente la demanda de este recurso en un 55% (Ahmad et al., 2025; Sangaré et al., 2025; Sibale et al., 2025; World Bank Group, 2022; Montojo, 2020).

Cabe destacar que, actualmente, aproximadamente el 70 % del agua dulce disponible se destina a actividades agropecuarias (World Bank Group, 2022), lo que anticipa una reducción significativa en la disponibilidad del recurso para otros sectores estratégicos si no se adoptan medidas de gestión eficientes y sostenibles (Golfam and Ashofteh, 2025b; Sibale et al., 2025).

Aunado a lo anterior, la escasez hídrica se ha intensificado con las constantes alteraciones climáticas, las cuales modifican los ciclos hidrológicos y dificultan la predicción de los patrones de precipitación. Como manifestación de esta tendencia, se observa un incremento tanto en la frecuencia como en la intensidad de fenómenos extremos, como las inundaciones y las sequías.

Estos fenómenos a su vez constituyen factores desencadenantes de conflictos a escala global, debido a que la mayoría de los países han sobre explotado los recursos hídricos disponibles, causando desequilibrios en los ámbitos ambiental, social y económico (Hirko et al., 2025). Un caso ilustrativo es el del Corredor Seco, donde aproximadamente 1.2 millones de personas requieren asistencia alimentaria como consecuencia de cinco años consecutivos de sequías prolongadas, olas de calor intensas y precipitaciones erráticas (UNCCD, 2023).



En este contexto, se reconocen una serie de desafíos hídricos, que actualmente se ven reflejados en aproximadamente el 40% de la población mundial con inseguridad hídrica, estimándose que para el 2050, las regiones más afectadas serán el Norte de África y el Oriente Medio, con aproximadamente el 83% de la población en condiciones de estrés hídrico extremadamente alto (Kuzma et al., 2023), es decir, emplearán más del 80% del suministro de agua renovable disponible para llevar a cabo todas sus actividades.

Específicamente en México, las sequías han afectado de manera particular a las comunidades agrícolas dependientes exclusivamente de la precipitación. Tal es el caso del ciclo agrícola 2020–2021, donde el 79% de las hectáreas cultivadas dependían exclusivamente de la lluvia (SIAP, 2022), y en el mismo periodo, aproximadamente el 70% del territorio nacional se vio amenazado por condiciones de sequía extrema o severa (CONAGUA, 2021).

Es así que la escasez de agua es una preocupación creciente considerándose uno de los principales desafíos globales a mitigar (Ahmad et al., 2024) que se acelera cada día y, que enfrenta la humanidad (Wang, Xie, Qi, He, & Bo, 2022). Por ello es de suma importancia lograr una gobernanza eficaz del agua a través de una adecuada contabilidad de esta para determinar la correcta demanda y disponibilidad del recurso (Vardon et al., 2025).

Respecto a la escasez alimentaria, el tema de la alimentación percibido como un problema-solución, lo podemos encontrar de manera inicial en 1945 al fundarse la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), cuya misión primordial es promover las condiciones alimentarias mundiales para lograr la erradicación del hambre en el mundo (Figura 1).

Posteriormente en 1961 se crea el Código Alimentario en donde se elaboran todas las normas, códigos de comportamiento y recomendaciones en cuanto a la producción, procesamiento, comercialización, etiquetado, distribución y consumo de alimentos. Todo ello con el fin de garantizar la seguridad alimentaria y la protección de la salud de los consumidores.

Así en 1974 en la Cumbre Mundial de la Alimentación nace el concepto “seguridad alimentaria”, el cual señala que existe seguridad alimentaria cuando “a nivel de individuo, hogar, nación y de forma global, todas las personas en todo momento tienen acceso físico y económico a suficiente alimento seguro y nutritivo para satisfacer sus necesidades alimenticias con el objeto de



llevar una vida activa y sana” (FAO, 1996). En 1980 este se resignifica añadiéndole dos aspectos a los alimentos: el físico y el económico. Es así que en 1996 se llega al concepto que sigue rigiendo actualmente, donde se consideran cuatro pilares: la disponibilidad, el acceso, la utilización y la estabilidad de los alimentos.

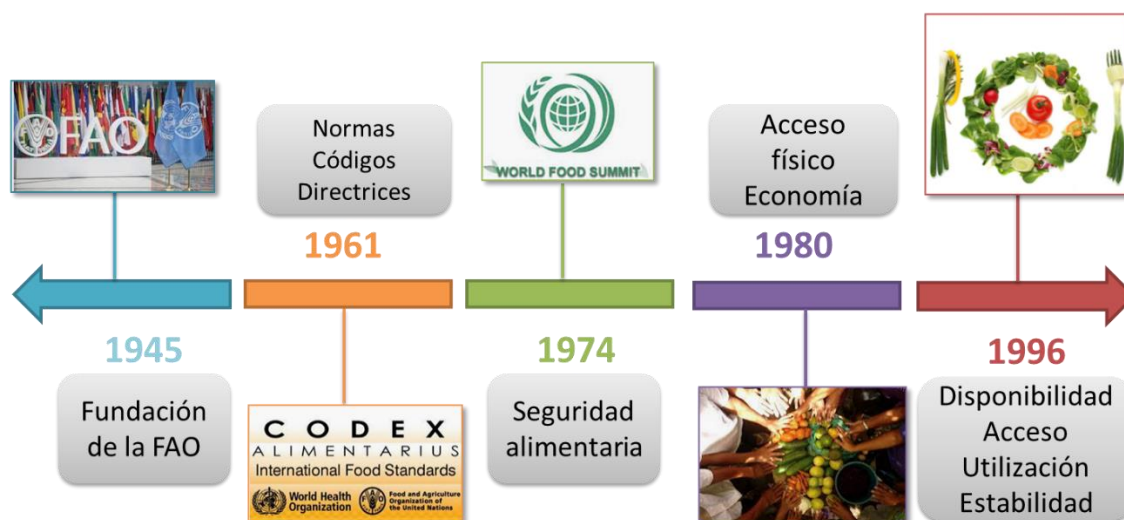


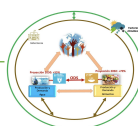
Figura 1. Evolución de la escasez alimentaria a nivel global

Fuente: Elaboración propia

En este sentido, la Cumbre Mundial de la Alimentación sin duda evidenció los resultados adversos para el mundo de continuar orientando la agricultura y la producción de alimentos en el sistema agroindustrial global, que a menudo está basado en la explotación de los recursos, la dependencia de monocultivos, uso de agroquímicos y la globalización de los mercados. Trayendo consecuencias adversas a nivel social, económico y ambiental.

Por ello, el concepto actualmente ha incorporado el papel que juega la participación ciudadana en la toma de decisiones de cómo se producen, distribuyen y consumen los alimentos. Asimismo, se ha integrado la importancia de generar sistemas alimentarios sustentables, sin comprometer los recursos de las futuras generaciones. Así como el reconocimiento de factores sociales y culturales, como desigualdades socioeconómicas y vulnerabilidad a aspectos climáticos o económicos (FAO, 2024).

Dichos aspectos han sido incorporados, debido a que se proyecta que para el año 2050, la demanda global de alimentos se incrementará entre un 65% y 70% (Ávila-Castañeda et al., 2024;



Bois, Boix y Montastruc, 2024; Grafton et al., 2015), lo que ejercerá una presión adicional sobre los recursos hídricos, especialmente en lo relativo a la producción agropecuaria. Esta tendencia anticipa un escenario de creciente tensión entre la disponibilidad de agua y las necesidades del sector alimentario, acentuando los desafíos asociados a la sostenibilidad del recurso.

Específicamente en el caso de México, en un estudio realizado por Aguilar-Estrada (2019), detectaron que aproximadamente el 78% de los hogares en México, es decir, 25.7 millones de hogares, presentan problemas en cuanto a la oferta de alimentos, ingreso, gasto, estabilidad y calidad de la dieta, resultando en un nivel de inseguridad alimentaria. Lo cual difiere del indicador de Coneval, el cual sólo mide el acceso a la alimentación y que para 2016 reportaba que el 60% de la población gozaba de seguridad alimentaria.

Por ello es de suma importancia lograr una adecuada gestión y conservación de los recursos mediante el análisis, evaluación e implementación de herramientas metodológicas y teóricas que logren un uso sustentable de los recursos, como es el caso del enfoque denominado Nexo agua-alimentos. Dicho enfoque lo aplicaron Grafton et al. (2015) en 19 países del norte de Asia, mediante el uso de la plataforma Sistema Mundial de Alimentos y Agua (GFWS), para conocer los riesgos, presiones y amenazas de la disponibilidad de alimentos hasta el año 2050. Estudio que empleó indicadores como crecimiento poblacional proyectado al 2050, las necesidades y suministro de alimentos y el uso del agua para la producción de alimentos.

2.2. Evolución y desarrollo del Nexo agua-alimentos

2.2.1. Concepto Nexo agua-alimentos

El Nexo agua-alimentos se puede entender como el estudio de las complejas interacciones, conexiones e interdependencia entre el agua y los alimentos. Pero además estos recursos dependen del medio ambiente y factores climáticos como temperatura, precipitación, radiación solar, humedad relativa, entre otros y se gestionan o regulan a través de una gobernanza y políticas públicas, ya sean eficientes o deficientes (Figura 2). Por ello la inclusión de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 y 2, los cuales hacen alusión al acceso y disponibilidad de agua limpia y saneamiento y erradicar el hambre en el mundo, para de esta forma lograr un acceso equitativo a los recursos, un desarrollo sustentable y la protección del medio ambiente.



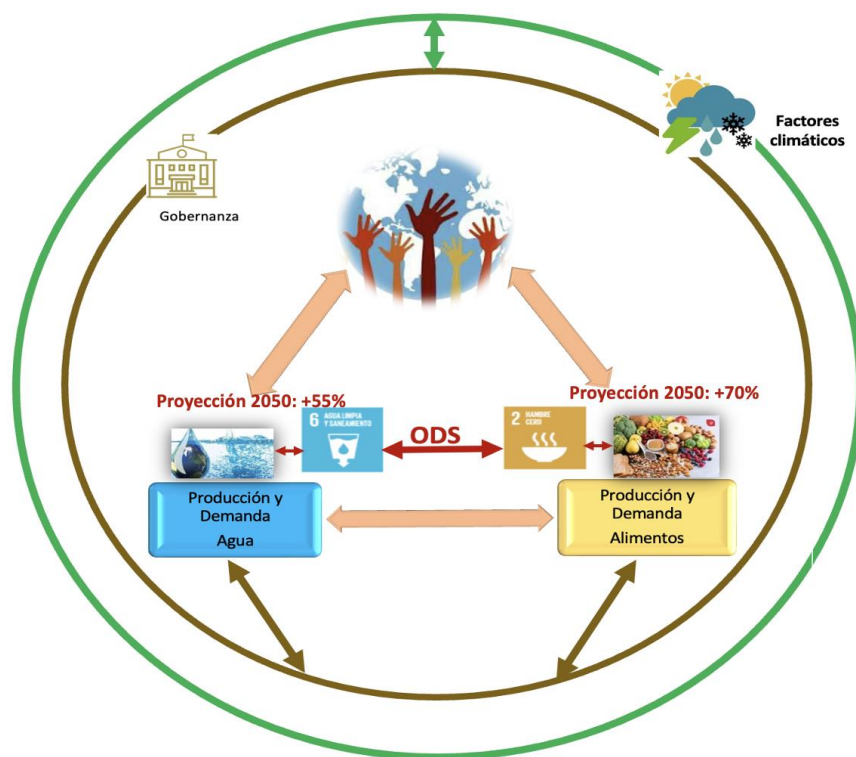


Figura 2. Diagrama del Nexo agua-alimentos

Fuente: Modificado de Avila-Castañeda, et al. (2023)

2.2.2. Desarrollo del Nexo agua-alimentos

El concepto Nexo se originó desde la Conferencia Nexus de Bonn en 2011, cuando el gobierno federal alemán organizó la Conferencia Internacional: “El nexo entre el agua, la energía y la seguridad alimentaria: soluciones para la economía verde” (Endo et al., 2015; Endo et al., 2017; Li et al., 2019), con la finalidad de mejorar y aumentar la seguridad y eficiencia del agua, la energía y los alimentos (Figura 3).

Posteriormente de 2012 a 2016 las investigaciones del nexo estuvieron influenciadas por élites empresariales como el Banco Mundial y el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (Dalla Fontana et al., 2021). Debido a que las investigaciones se enfocaron más a la gestión y seguridad hídrica para un crecimiento económico (Lazaro et al., 2022). En este mismo periodo se planteó lograr el principal objetivo de Future Earth 2025 (plataforma de transformaciones hacia la sostenibilidad), el cual plantea que todas las personas prosperen en un mundo sostenible y equitativo (Leck et al., 2015; Endo et al., 2017).



Cabe destacar que en 2013 el Instituto de Investigación para la Humanidad y la Naturaleza (RIHN, por sus siglas en inglés) crea el proyecto Water-energy-food nexus (WEFN) abordando dos objetivos principales: (a) comprender la complejidad del Nexo y (b) crear opciones de políticas y escenarios para resolver los problemas de nexos identificados bajo evidencia científica e incertidumbre, para maximizar la seguridad ambiental (Endo et al., 2015). En 2016 se desarrolló el Programa de Diálogos Regionales de Nexos Fase I donde se discutió el análisis del nexos basado en sistemas de nexos sostenibles y la aplicación del nexos con un enfoque de análisis de abajo hacia arriba (Chang et al., 2016).

Durante 2017 a 2018 el enfoque se encaminó a la vinculación e implementación eficiente del nexos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS2, ODS6 y ODS7 (Lazaro et al., 2022). En 2019 se enfoca hacia el ámbito político, convirtiéndose en objeto de investigación para diferentes disciplinas, resaltando la importancia de incluir cuestiones de gobernanza, integración de políticas y toma de decisiones en el análisis (Dalla Fontana et al., 2021; Lazaro et al., 2022; Simpson y Jewitt, 2019).

Por ejemplo, Li et al. (2019) documentan que algunos países asiáticos optaron por otorgar subsidios energéticos que ayudaran a expandir las áreas de riego y, así satisfacer las demandas crecientes de alimentos de su población, aunque esto significó un aumento sobresaliente en la escasez de agua subterránea. También se crearon políticas de desarrollo de biocombustibles que han generado un impacto negativo en el uso del suelo, compitiendo la producción de cultivos para la alimentación, con aquellos que producen combustibles.

En 2020 se propuso la aplicación del concepto a diferentes escalas como la economía circular, escala urbana, relación del nexos con los residuos y su relación con ciudades inteligentes (Lazaro et al., 2022).



En 2021 la Universidad Estatal de Pensilvania creó una herramienta denominada WEF-Nexus Discovery Map, en el cual se reunió un repositorio de datos con visualización geográfica en una herramienta web de fácil acceso. Para ello se empleó ArcGIS Online que permite a los usuarios en general conocer investigación, tecnologías emergentes, proyectos de implementación y guías de políticas basadas en WEF (Arenas et al., 2021). Por ejemplo, al hacer uso de los filtros, el usuario tiene acceso a trabajos categorizados de manera concisa, en los que se pueden extraer resultados que se ajusten mejor a las necesidades de investigación o concuerden con el contexto que se está analizando (Arenas et al., 2021).



Figura 3. Evolución del enfoque Nexo

Fuente: Modificado de Avila-Castañeda, et al. (2023)

En este mismo año también se consideró que el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ayudaría a tener una visualización más clara del Nexo basada en mapas, se podría hacer una comparación e identificación de puntos críticos y benéficos del Nexo y con ello, la posibilidad de explorar los impactos de las intervenciones y la transferencia de buenas prácticas y tecnología viable (Lin et al., 2019).

Como por ejemplo Liu y Zhao (2022) investigaron el estado de evolución y las características espaciales del nexo WEF en la cuenca del Río Amarillo en China, para la gestión



de los recursos y la orientación del desarrollo sostenible del sistema de la región. Almulla et al. (2020) emplearon un modelo basado en SIG con datos climáticos y características biofísicas (elevación, nivel freático y propiedades del suelo), el cual sirvió para determinar el requerimiento anual de agua de riego en todo el Sistema Acuífero del Sahara, señalando la importancia de emplear medidas de conservación del agua más allá de la mejora de la eficiencia y cómo este modelo se puede utilizar para explorar diferentes vías de desarrollo agrícola y cuantificar el impacto en los recursos hídricos y energéticos.

Del mismo modo, Haji et al. (2020) propusieron un enfoque novedoso para analizar los riesgos de producción en el nexo WEF de Qatar; generaron Indicadores de Riesgo Geoespaciales Compuestos que dividieron en: “factores de riesgos climáticos”, “factores de riesgo hídricos” y “factores de riesgo territoriales”. Y por medio del software ArcGIS y el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) generaron mapas de riesgo geoespacial que permitieron gestionar el riesgo en cada nodo o sistema de producción evaluado.

En 2022 las investigaciones se van centrando en la evaluación del nexo y su sostenibilidad, en su relación con la resiliencia y en darle un enfoque transdisciplinario e interdisciplinario (Botai et al., 2021; Bian y Liu, 2022; Hogeboom et al., 2021; Meneguzzo et al., 2019). De igual forma, dicho enfoque interdisciplinario origina una serie de ampliaciones al Nexo original (Figura 4) y la aplicación del concepto a diferentes escalas como: economía circular; escala urbana; vinculación del nexo con los residuos; el medio ambiente; resiliencia y ciudades inteligentes (Lazaro et al., 2022).

Finalmente, del 2023 a la fecha, se inició con la aplicación del enfoque Nexo a través de indicadores e índices hídricos, energéticos, alimentarios, entre muchas otras variantes de recursos.

Por ejemplo, el nexo tierra-agua-energía-alimentos (Land-WEF) surge al considerarse la tierra como elemento principal para la generación de alimentos, pero también de la creciente degradación y escasez de tierra fértil para cultivar y cubrir las necesidades alimenticias de una población mundial en aumento (Wolde, et al., 2022). Asimismo, se han desarrollado estudios para analizar la relación del Nexo con los residuos (Waste-WEF), el cual implica también el análisis del comportamiento y hábitos alimenticios de los habitantes de la ciudad, debido a que éstos son



la fuente de demanda más importante dentro del Nexo y de donde se van a generar la mayoría de los residuos (Li et al., 2019).

De igual forma, Lazaro et al. (2022), señalan que se han detectado nexos donde su objetivo principal es la búsqueda de sinergias entre los diferentes recursos, para lograr una mitigación de las compensaciones, como por ejemplo el nexo gobernanza-agua-energía-alimentos (Governance-WEF), agua-energía-alimentos-trabajo-capital (Labor-Capital-WEF) y agua-energía-tierra-clima (WELC), tal como se detallan en la Figura 4.

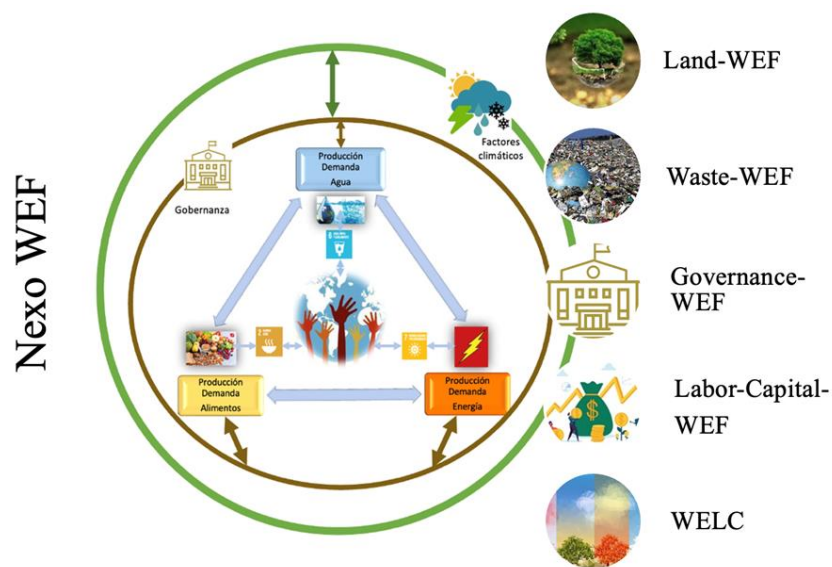


Figura 4. Ampliaciones del enfoque Nexo

Fuente: Avila-Castañeda, et al. (2023)

Cabe destacar, que también surge la inquietud de involucrar a las partes interesadas, debido a que a lo largo de la evolución del Nexo, se identificó que el grado de participación de estas sigue siendo limitado o se incorporan más comúnmente en la investigación como usuarios finales (Hoolohan et al., 2019), por lo que es de vital importancia lograr la interacción de todas las partes e incluir la dinámica social y política, para ofrecer un mejor desarrollo en la investigación y aplicación del Nexo (Gai et al., 2022).

2.3. Modelado hídrico y herramientas para evaluar el Nexo agua-alimentos

Para el análisis, evaluación e implementación del Nexo es necesario la elección de modelos conceptuales apropiados, algoritmos razonables y conjuntos de datos completos, debido a que esto ayudará a cuantificar con precisión el nexo y abordará las compensaciones asociadas (Chang et



al., 2016). A su vez, Corona-López et al. (2021) resaltan la importancia de contar con softwares que ayuden a evaluar cuantitativamente el Nexo a través de la generación de escenarios futuros, una aplicación global y específicamente lograr su aplicación en estudios de caso a nivel regional, para lograr políticas encaminadas a un desarrollo sustentable y al uso eficiente de los recursos.

En este sentido, se debe considerar que los métodos más adecuados para evaluar el Nexo van a variar en respuesta a la escala y las prioridades de investigación de un sistema de nexo específico (Zhang et al., 2018). Para ello se han empleado diferentes softwares o herramientas de modelación, índices e indicadores, así como diversas metodologías, tal como se detallan en la Figura 5.

Dichas herramientas han ayudado a medir el Nexo y con ello evaluarlo en un contexto real, para determinar si este puede ser sostenible y generar estrategias de gestión pertinentes para cada área de estudio (Correa-Porcel et al., 2021; Purwanto et al., 2021).

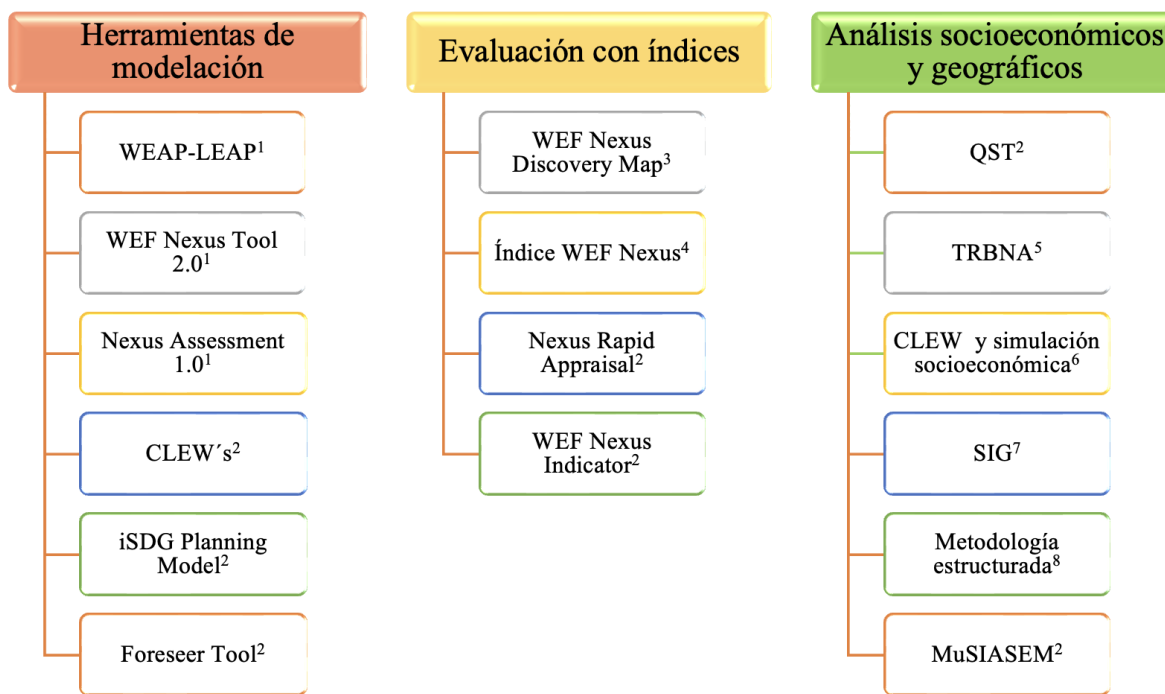


Figura 5. Tipos de análisis y herramientas para evaluar el Nexo

Fuente: Avila-Castañeda et al. (2023). QST: Análisis de políticas y narrativas sobre gobernanza, TRBNA: Cuenca fluvial transfronteriza, SIG: Sistemas de Información Geográfica, MuSIASEM: Contabilidad integrada multiescala del metabolismo social y de los ecosistemas. ¹ Fernandes Torres *et al.*, 2019; ² Borge-Diez *et al.*, 2022; ³ Arenas *et al.*, 2021; ⁴ Simpson *et al.*, 2022; ⁵ Lazaro, *et al.*, 2022; ⁶ Chang *et al.*, 2016; ⁷ Almulla *et al.* 2020; Susnik, 2022; ⁸ Botai *et al.*, 2021.



En este contexto, destacan diversos estudios como el realizado por Yupanqui et al. (2025), los cuales desarrollaron el “Nexus security index”, el cual propone el uso de diversos indicadores como: 1) indicador general de riesgo hídrico, 2) indicador de desastres y cambio climático y, 3) índice de seguridad alimentaria mundial, para así desarrollar el índice de seguridad del nexo.

Otras investigaciones incorporan el modelado hidrológico como herramienta analítica para la formulación de medidas de mitigación orientadas a optimizar la gestión integral de los recursos hídricos y fortalecer la seguridad hídrica. Es el caso de Ahmad et al. (2024) los cuales emplean escenarios para determinar tanto la escasez, como la disminución del suministro de agua en Pakistán para proponer estrategias de gestión de los recursos hídricos.

Golfam and Ashofteh (2025b) a través de escenarios analizan la demanda de agua para riego agropecuario en la cuenca Marun de Irán y con ellos proponen 11 estrategias para un uso eficiente del recurso. Mahmoodzadeh et al. (2025) mediante modelado hídrico analizan la cuenca transfronteriza del río Tigris-Éufrates para determinar la sostenibilidad del suministro y la demanda de agua para proponer un Índice de sostenibilidad y un análisis de riesgos. Lima-Quispe et al. (2025) emplean el modelaje hídrico en el lago Titicaca para simular y conocer el comportamiento del ciclo hidrológico y las repercusiones del consumo neto de riego. Sangaré et al. (2025) pronostican la disponibilidad de agua del río Níger mediante escenarios de tratamiento y reutilización de aguas residuales tratadas.

A su vez, la variabilidad climática fomenta que se empleen predicciones y alertas ante los cambios meteorológicos imprevistos. Por ello, varios estudios destacan el impacto del cambio climático en los sistemas hidrológicos, como es el caso de Calizaya et al. (2025) que desarrollaron modelaje hídrico en la Cuenca del Lago Moa en Bolivia para conocer la disponibilidad de agua ante posibles escenarios de cambio climático y con ello proponer a futuro medidas de mitigación para asegurar el desarrollo sostenible y la conservación de los recursos naturales de poblaciones rurales.

Hirko et al. (2025) destacan la importancia de generar escenarios con variabilidad climática en Etiopía, para proponer soluciones sostenibles en la gestión y asignación del agua, adaptadas a regiones con estrés hídrico que enfrentan crecientes crisis ambientales y de demanda. Ansari et al. (2023) emplean técnicas de modelado para determinar los efectos del cambio climático en el sector



agropecuario de Indonesia. Kalashnikova, Niyazov y Nurbatsina (2024) realizan modelado hidrológico en cuencas montañosas de Asia Central para determinar una adecuada gestión del agua en ríos que se ubican en elevaciones mayores a los 3000 msnm.

En este sentido al emplear técnicas de modelado se logra monitorear parámetros de planificación para evaluar las interferencias del cambio climático, se desarrollan estrategias que pueden ser empleadas por los gobiernos, organizaciones y empresas que buscan optimizar el uso del agua, realizar simulaciones y prever el comportamiento de sistemas hídricos bajo diferentes condiciones climáticas (Ansari et al., 2023; Sangaré et al., 2025), se promueven inversiones en tecnologías innovadoras dirigidas a optimizar el uso del agua en la agricultura que favorezcan la recarga y recuperación de acuíferos (Ahmad et al., 2025). Logrando la toma de decisiones informadas sobre la gestión sustentable del agua, pero también para conservar y proteger los recursos, fortaleciendo así la seguridad hídrica y alimentaria a escala global.

En este sentido, la herramienta de evaluación Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP) ha sido diseñada para la planificación y gestión de recursos hídricos, permitiendo a los usuarios modelar sistemas de agua, evaluar diferentes escenarios de gestión y analizar el impacto de decisiones sobre el suministro y la demanda de agua (Ríos et al., 2024).

WEAP permite integrar diferentes sistemas como el agua, los alimentos y el clima, siendo esto una gran ventaja en el estudio del Nexo agua-alimentos, debido a que una de sus principales funciones es desarrollar el balance hídrico de una cuenca o subcuenca calculando la disponibilidad de agua en función de la demanda, las condiciones climáticas y el uso del suelo (Sieber, 2015).

Para generar los modelos se requieren pocos datos de entrada y al ser una plataforma de acceso abierto, cuenta con una interfaz amigable con el usuario que permite monitorear los parámetros de planificación, para evaluar las interferencias del cambio climático y de esta forma, proteger a la población, entre otros aspectos que intervienen en los sistemas (Fernandes-Torres et al., 2019).

En este sentido es una herramienta útil que pueden emplear los gobiernos, organizaciones y empresas que buscan optimizar el uso del agua, realizar simulaciones y prever el comportamiento de sistemas hídricos bajo diferentes condiciones climáticas (Sieber, 2015).



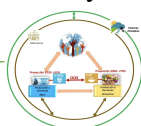
2.4. Sustentabilidad hídrica y alimentaria del Nexo agua-alimentos

El término sustentabilidad se define como “el balance entre la satisfacción de las necesidades humanas y la capacidad de la naturaleza de proveer bienes y servicios para este propósito sin sufrir degradación” (UICN, 1997, p. 4), destacando que este tipo de enfoque es la clave para poder evaluar el Nexo agua-alimentos de forma integral.

En México se ha empleado el Programa 21 de la División de Desarrollo Sustentable, así como las metodologías y criterios propuestos por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) para el diseño y evaluación de la sustentabilidad existente en México, en donde se emplean indicadores económicos, socioculturales y ambientales (López-López y Cruz-Mejía, 2019). Sin embargo, dichas evaluaciones abordan la problemática considerando sólo un aspecto social, ambiental o económico y no de forma conjunta, debido a que, en el caso de México, la sostenibilidad y, por ende, el bienestar humano y ecológico, están intrínsecamente ligados a complejos desafíos de gobernanza (De Las Heras Gutiérrez et al., 2019). Por lo tanto, el desarrollo de herramientas de análisis y evaluación con una perspectiva integral y regional es crucial para lograr una gestión más efectiva de los recursos.

En este sentido, destacan los indicadores de sustentabilidad, los cuales se han empleado en estudios sobre el Nexo, específicamente Nexo agua-energía-alimentos, funcionando como una herramienta eficaz para comprender las interrelaciones e interdependencias entre los dos recursos, pero también en su relación con el medio ambiente y el cumplimiento de las metas propuestas de los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) para el 2030 (Arcoverde Balué et al., 2023). Todos estos estudios tienen la finalidad de resaltar la inestabilidad e incertidumbre de evaluar un fenómeno complejo y multidisciplinario como la sustentabilidad del Nexo, proponer políticas específicas coherentes enfocadas ya sea a la eminente escasez o al uso de recursos globales (Arthur et al., 2019).

En este contexto, visualizar la sustentabilidad basada en el Nexo agua-alimentos, refleja la naturaleza holística de este enfoque. Subraya la interdependencia crítica entre el uso eficiente del agua y la seguridad alimentaria, reconociendo que la gestión de un recurso tiene efectos directos en el otro. Además, este marco conceptual destaca la urgencia de mitigar los impactos ambientales negativos derivados de las actividades antropogénicas. Para ello, integra consideraciones esenciales como la protección de la biodiversidad y el uso eficiente de los recursos, mientras busca



simultáneamente garantizar la seguridad alimentaria, fomentar el desarrollo rural o urbano y, desarrolla procesos de gobernanza que atiendan a esta interdependencia de los recursos, principios fundamentales de la sustentabilidad (Brouwer, 2022).

Para evaluar la sustentabilidad a nivel integral, donde sus componentes sean interdependientes y, por lo tanto, reúna todas las características del enfoque Nexo, destaca la metodología denominada Barómetro de la sustentabilidad. Dicha metodología fue desarrollada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) como una herramienta para evaluar la sustentabilidad, poder comprenderla, medirla y difundirla a la sociedad, así como analizar las interacciones e interdependencias que existen entre el ser humano y el medio ambiente (Rodríguez Cote, 2021).

Asimismo, basa su fundamento teórico considerando que tanto el ecosistema como las personas están ligadas e integradas mutuamente y que el bienestar de uno es definitorio para el bienestar del otro (Prescott-Allen, 1997, citado en Rodríguez Cote, 2021).

Robati y Rezaei (2022) destacan que la sustentabilidad al ser una ciencia interdisciplinaria compleja, requiere el uso de métodos integrales que sean flexibles en la selección y aplicación de indicadores a diversas escalas. En su estudio emplearon el modelo barométrico y el radar de sustentabilidad para evaluar la sustentabilidad urbana en nueve regiones de Teherán.

En este sentido, analizar el contexto social y económico del Nexo agua-alimentos ayuda a crear un entorno de mayor apoyo para la implementación de la estrategia a seguir, debido a que se consideran factores importantes para lograr un Nexo sustentable (Chang, Li, Yao, Zhang, & Yu, 2016).

Es así que introducir cuestiones sociales y de justicia a los desafíos técnicos que enfrenta el Nexo, desarrolla la capacidad para la transformación sustentable (Hoolohan, McLachlan, & Larkin, 2019). Pero también ayuda a la cooperación regional, los entornos geopolíticos y el desarrollo de mercados regionales (Adom, Nsabimana and Reid, 2022). En este sentido, en la Tabla 1 se señalan una serie de índices, herramientas y enfoques que han ayudado a evaluar la sostenibilidad del Nexo.



Tabla 1. Indicadores para evaluar el Desarrollo sostenible del Nexo agua-alimentos

Modelo	Descripción	Referencia
Índice de Bienestar Económico Sostenible (ISEW)	Proporciona el impacto de los recursos utilizados. Evalúa la sostenibilidad de sectores específicos (Ej. alimentos orgánicos)	(Lazaro, Bellezoni, Puppim de Oliveira, Jacobi, & Giatti, 2022)
Sustainability tool	Modelos de mitigación energética y climática.	(Borge-Diez, Garcia-Moya, & Rosales-Asensio, 2022)
Índice de sostenibilidad de los sistemas agrícolas y sus impactos ambientales	Uso de Sistemas de Información Geográfica para relacionar las actividades antropogénicas con los impactos ambientales.	(Haji, <i>et al.</i> , 2020)
Tipo de enfoque: ascendente o descendente	Método de abajo hacia arriba: cuantifica las huellas de recursos de productos individuales y analiza procesos y tecnologías clave cruciales para reducir las huellas de los productos. Método de arriba hacia abajo: parte del “panorama general” del desempeño del sector al modelar las existencias y flujos de recursos de los sistemas WF en una economía, y luego desglosa los potenciales de reducción de la huella de los sectores individuales y los usos finales.	(Chang <i>et al.</i> , 2016)
Elementos de seguridad en tres niveles	Alimentaria: (i) Disponibilidad de alimentos; (ii) el acceso a los alimentos, incluida la asequibilidad, la distribución, la cantidad suficiente y segura y la preferencia (por ejemplo, culturalmente apropiada); (iii) utilización: valor nutricional, valor social y cultural e inocuidad de los alimentos (iv) estabilidad alimentaria sostenida/a largo plazo.	(Leck, Conway, Bradshaw, & Rees, 2015)
	Hídrica: Acceso al agua; la seguridad del agua; y asequibilidad del agua.	
	Energética: (i) Continuidad del suministro de energía en relación con la demanda, (ii) disponibilidad física del suministro y (iii) suministro adecuado para satisfacer la demanda a un precio determinado.	



III. ANTECEDENTES

3.1. Investigaciones destacadas en la aplicación del Nexo agua-alimentos por zona geográfica

Uno de los objetivos primordiales del enfoque Nexo es lograr minimizar o eliminar las sinergias y maximizar las compensaciones entre los recursos a evaluar, debido a la inevitable interdependencia que existe entre ellos. Un ejemplo de estas conexiones son las sequías extremas provocadas por los cambios climáticos, que pueden dar lugar a importantes problemas de seguridad alimentaria y energética, debido a la intensificación del estrés en el suministro de agua (Zhang, Chen, Li, Ding, & Fu, 2018).

Por ello, diversos centros de investigación como la Universidad de Oxford y el Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias han tenido una relevante participación en el estudio del Nexo (Chen et al., 2019). De igual forma la FAO reportó interés en el tema (Wang et al., 2022). Y se ha expuesto que diversos gobiernos, Agencias de las Naciones Unidas, las Organizaciones No Gubernamentales (ONG), empresas privadas, agencias nacionales e Institutos y Universidades en Europa, también se han dedicado a estudiar el Nexo (Endo et al., 2017).

En este sentido al realizar un análisis bibliométrico del tema ingresando la sintaxis “wáter-food-nexus” se detectaron en el motor de búsqueda Web of Science 3,471 publicaciones a nivel global referente al estudio, análisis o evaluación del Nexo. Las primeras seis investigaciones se reportaron en 2012, debido a que el enfoque Nexo comenzó su campo emergente a partir de 2011, por ello todos los artículos son posteriores a este año, como se detalla en la Figura 6. A partir del 2016-2017 se observa un crecimiento constante año con año. La máxima producción se presenta en 2021 con 465 publicaciones. Y en 2026 al segundo mes se han reportado 26 publicaciones, reflejando un interés científico considerable (Figura 6).

Dicho análisis refleja que existe una tendencia creciente de estudios publicados, así como un interés e inquietud científica referente al tema.



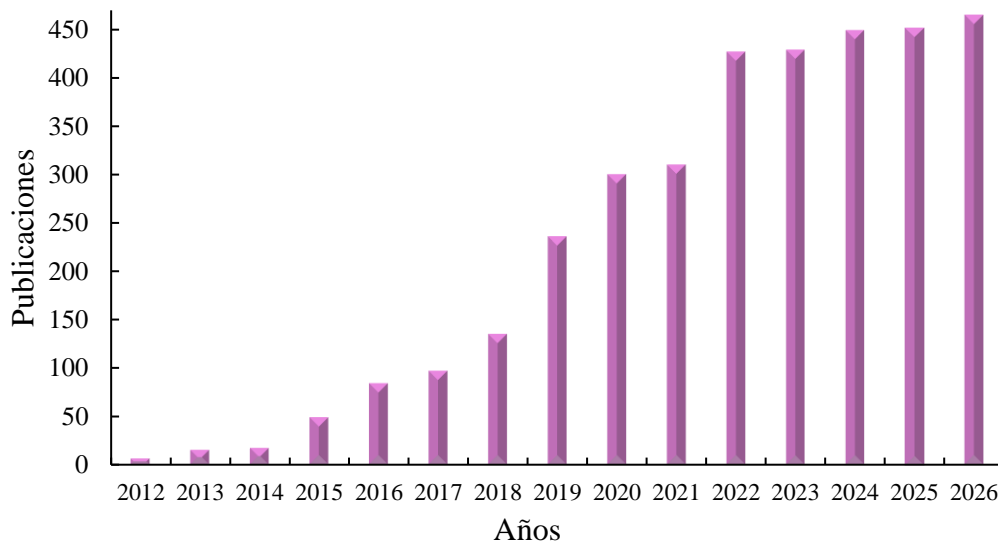


Figura 6. Publicaciones científicas referentes al Nexo (2012-2026)

Fuente: Elaboración propia con datos de Webofscience.com (acceso el 11 de febrero de 2026)

Los países donde ha tomado mayor auge las investigaciones, son: China, Estados Unidos de América, Italia, Brasil, México, Sudáfrica y España. Dicho auge se detalla en la Figura 7 bajo las diferentes tonalidades de azul, siendo el azul intenso los países con mayor producción de publicaciones científicas. A su vez, el grado de citación entre autores sobresale entre Estados Unidos y China, tal como se detalla en la Figura 7, representadas por las líneas rojas.

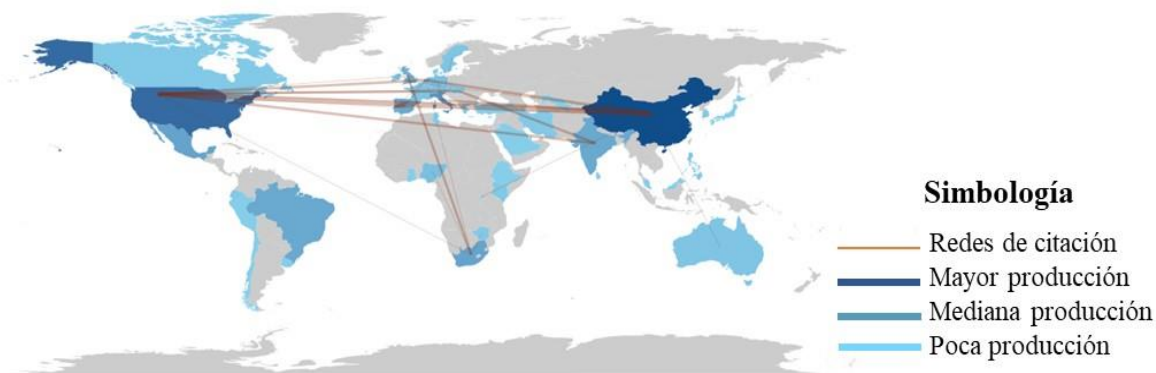


Figura 7. Distribución geográfica de publicaciones científicas del Nexo (2012-2026)

Fuente: Elaboración propia con datos de Webofscience.com (acceso el 11 de febrero de 2026)



Las áreas temáticas enfocadas a dichos análisis son particularmente ciencias ambientales (28.7%), ciencias sociales (12.0%), energía (11.4%), ingeniería (9.8%) y ciencias agrícolas (7.8%), tal como se detalla en la Figura 8. A su vez, se detectaron las redes de colaboración globales entre los diferentes autores que abordan la temática y se detectó existe una conexión entre estos a nivel global. A nivel continental, sobresale Europa con una colaboración entre autores de diferentes países del 49.5%, como el caso de algunos autores españoles, destacando Marques y colaboradores que participan con investigadores de Italia como Bastianoni, los cuales se pueden identificar en la red color rojo de la Figura 8.

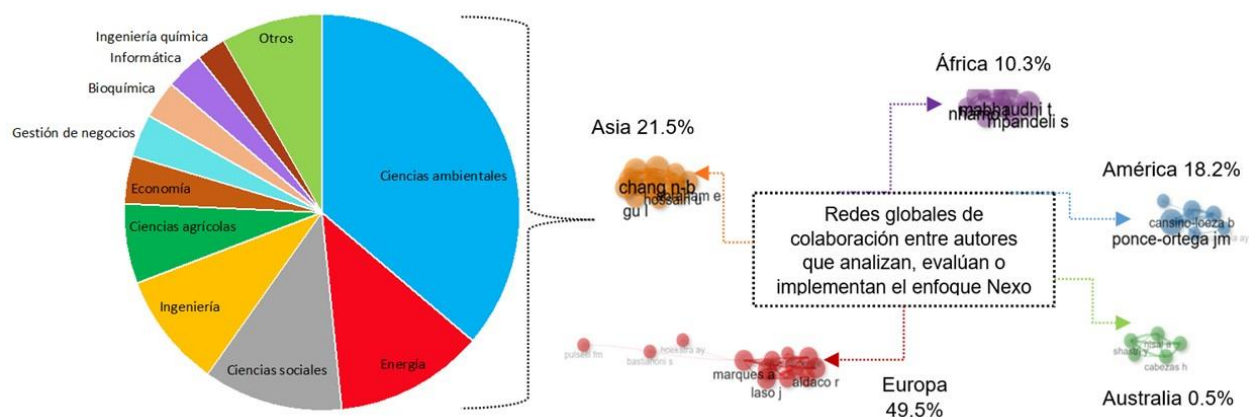


Figura 8. Áreas temáticas enfocadas al Nexo y redes globales de colaboración

Fuente: Scopus y webofscience.com (acceso el 24 de enero de 2023). Elaboración propia.

Al realizar un análisis de contenido exploratorio empleando el software Bibliometrix, se determinó que las palabras que mostraron mayor frecuencia de mención fueron wáter (n=338 veces), nexus (n=319), energy (n=226), sustainability (n=214), food (n=202), WEF (n=147), resources (n=144), sustainable (n=119), lo cual confirma la marcada relación que existe entre los recursos a evaluar y lograr un desarrollo sustentable, pilares fundamentales en el enfoque de Nexo (Figura 9).



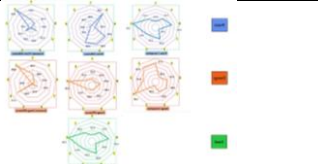
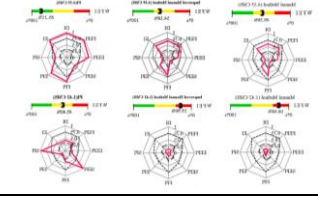

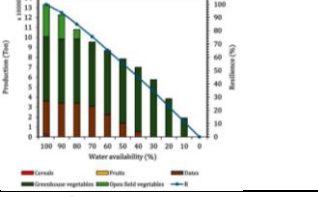
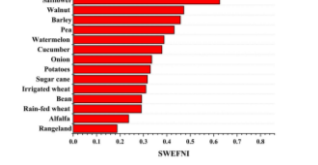
Figura 9. Análisis de contenido exploratorio del Nexo agua-alimentos

En concordancia con lo anterior, en la Tabla 2 se visualizan estudios destacados que han ayudado a medir y evaluar el Nexo. Resaltando que en cada caso se implementaron herramientas, metodologías e indicadores diferentes para el análisis, debido a que el enfoque de Nexo se emplea para evaluar contextos específicos y para dar soluciones a problemas más puntuales.

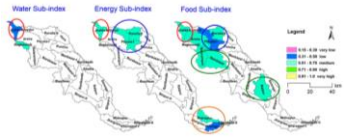
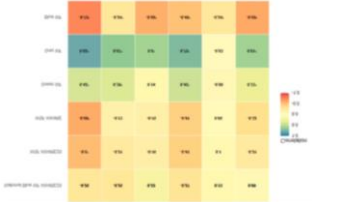

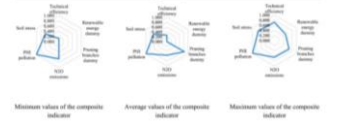
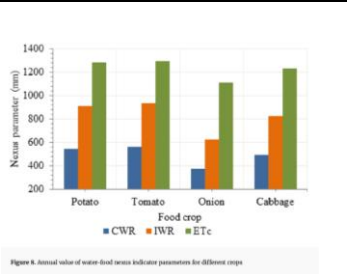

De igual forma, Wolde et al. (2022) utilizaron el Proceso de Jerarquía Analítica para generar un índice compuesto que ayudara a cuantificar el nexo tierra-energía-alimentos (ILWEF). Estimándose que el ILWEF para la zona de estudio fue de 0.083, lo cual representó una baja sostenibilidad del uso y gestión eficiente de los cuatro recursos, debido a que se encuentra muy lejos del valor 1 que representa la mejor sostenibilidad del sistema.

Li et al. (2019) evaluaron en la Ciudad de Shenzhen, China, el grado de sinergia que existe entre el agua, la energía y los alimentos, es decir, la intensidad que surge de la relación entre los parámetros de orden conectados, resultando el subsistema de alimentos el más alto (0.36). En el caso del subsistema energía, el parámetro demanda total de energía resultó ser el que tiene mayor sinergia relacionándolo con los demás parámetros. Y a pesar de que el subsistema agua reportó el grado de sinergia más bajo entre sus parámetros, se determinó que este recurso es el más fundamental en el nexo, debido a que tiene gran peso en la producción de alimentos y energía. Comprobándose que el subsistema agua influye de manera crucial en los demás subsistemas, particularmente en su parámetro cantidad de suministro de agua.

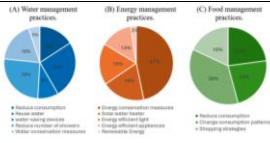
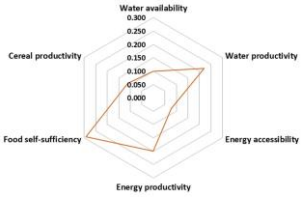
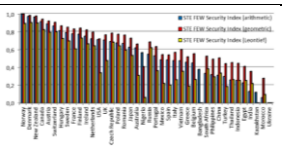



Tabla 2. Estudios relevantes de índices e indicadores para el Nexo agua-alimentos

Región	Nombre del índice y país	Representación gráfica	Datos requeridos	Fuente
Asia	Water-energy-food nexus sustainability index. País: Irán		<ol style="list-style-type: none"> 1. Consumo de agua (m³) 2. Productividad del agua (kg/m³) 3. Eficiencia económica del agua (\$/m³) 4. Disponibilidad de alimentos 	Pourfallah et al., 2025
	Indicators of the water-food-energy Nexus. País: Irán		<ol style="list-style-type: none"> 1. Suministro de agua superficial (m³/cultivo) 2. Productividad de agua superficial (Ton/m³) 3. Productividad económica de agua superficial (Ton/ \$) 4. Productividad alimentaria 5. Productividad económica de alimentos 	Bayat, et al, 2025
	Water stress index and regional agricultural water footprint intensity (AWFI). País: Irán		<ol style="list-style-type: none"> 1. Huella hídrica verde 2. Huella hídrica azul 3. Huella hídrica gris 4. Huella hídrica de cada cultivo 5. Intensidad de la huella hídrica agrícola regional 	Hatami et al., 2025
	Quantitative resilience index for the EWF nexus. País: Qatar		<ol style="list-style-type: none"> 1. Requerimientos agrícolas 2. Consumo de agua por sector (%) 3. Impacto económico y social 	Khourchid et al., 2024
	Soil-water-energy-food nexus index. País: Irán		<ol style="list-style-type: none"> 1. Energy and water consumption 2. Mass production with water and energy 3. Productividad económica del agua y la energía 4. Soil erosion and soil organic carbon 	Sharifi et al., 2023



	<p>WEF Nexus Index.</p> <p>País: India</p>		<ol style="list-style-type: none"> 1. Disponibilidad de agua (m³/sector) 2. Accesibilidad al agua (%) 3. Disponibilidad de alimentos 4. Accesibilidad a los alimentos 	<p>Mondal et al., 2023</p>
Europa	<p>Blue, green and grey water footprint of Mediterranean countries.</p> <p>Aplicación en Europa</p>		<ol style="list-style-type: none"> 1. Huella hídrica 2. Huella nacional de escasez de agua 3. Huella hídrica de los principales cultivos 4. Eficiencia económica del agua 	<p>Rhouma et al., 2025</p>
	<p>Water, food and energy security criteria.</p> <p>País: Finlandia</p>		<ol style="list-style-type: none"> 1. Estado del medio acuático 2. Salud y bienestar humanos 3. Sostenibilidad de los medios de vida 4. Estabilidad, funciones y responsabilidad de la sociedad 	<p>Marttunen, et al., 2019</p>
	<p>WEFE Nexus composite indicator.</p> <p>País: Grecia</p>		<ol style="list-style-type: none"> 1. Eficiencia técnica 2. Prácticas agrícolas sostenibles 	<p>Halytsia et al., 2024</p>
África	<p>Water-food nexus assessment indicators of agricultural food production.</p> <p>País: Etiopía</p>		<ol style="list-style-type: none"> 1. Consumo de agua por cultivo 2. Demanda de agua por cultivo. 3. Rendimiento total (toneladas/ha) 4. Huella hídrica total (m³/ton) 	<p>Dessale, 2025</p>
	<p>WEF interaction in a watershed.</p> <p>País: Camerún</p>		<ol style="list-style-type: none"> 1. Cantidad de agua utilizada para la producción (mm/ cultivo) 2. Productividad del agua (USD/ m³/cultivo) 	<p>Fetio et al., 2025</p>



	Household water–energy–food nexus conceptual framework. País: Jordania		<ol style="list-style-type: none"> 1. Concientización sobre la relación agua-alimentos 2. Medidas de ahorro de agua, energía y alimentos en los hogares 3. Asequibilidad al agua y los alimentos 4. Accesibilidad al agua y los alimentos 5. Calidad de agua 	Al-Zu'bi, et al., 2025
	Performance of WEF nexus indicators in South Africa. País: Sudáfrica		<ol style="list-style-type: none"> 1. Proporción de recursos de agua dulce disponibles per cápita (m³/persona) 2. Proporción de cultivos producidos por unidad de agua utilizada(US\$/m³) 3. Inseguridad alimentaria (%) 4. Producción agrícola sostenible por unidad de superficie (kg/ha) 	Nhamo et al., 2019
	Nexus security index. Aplicación global		<ol style="list-style-type: none"> 1. Accesibilidad a los alimentos 2. Disponibilidad de los alimentos 3. Accesibilidad al agua 4. Disponibilidad del agua 5. Capacidad de adaptación del agua 	Venghaus and Dieken, 2019
	WEF Nexus Index. Aplicación global		<p>Indicadores globales</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Pilar agua 2. Pilar energía 3. Pilar alimentos 	Simpson et al., 2022
América	WEF Nexus Security under rural practice scenarios. País: Brasil		<ol style="list-style-type: none"> 1. Seguridad hídrica 2. Seguridad alimentaria 	Dias-Turetta et al., 2025
	Índice nexo agua-suelo País: México		<ol style="list-style-type: none"> 1. Suministro de la demanda (m³/m²) 	Ríos-Sánchez, 2025



Lo anterior nos vislumbra un panorama para nuevas investigaciones donde se aplique el enfoque nexo para la producción de alimentos, con un uso eficiente del agua. Asimismo, estos resultados son una base para identificar y generar estrategias que formulen políticas más efectivas en beneficio de la sociedad.

Particularmente en México existen evaluaciones que emplean indicadores de sustentabilidad con un enfoque de Nexo a escalas estatales o nacionales (Cansino-Loeza et al., 2020), lo que dificulta la formulación de medidas específicas que consideren las particularidades de cada territorio. Esta limitación obstaculiza la integración de aspectos sociales, culturales y de biodiversidad regional, que van más allá de una simple delimitación geográfica o geopolítica.

A su vez, cabe destacar que tampoco existen estudios que evalúen el nexo agua-energía-alimentos, debido a que la obtención de datos energéticos a esta escala es sumamente compleja. Esto se debe a que la información sobre el consumo de energía a nivel local, especialmente en sectores como el industrial o el doméstico, no está tan desagregada como la del agua o los alimentos.

Sin embargo, destacan investigaciones referentes al Nexo agua-alimentos en el estado de Hidalgo, particularmente en el valle de Apan (Corona-López, 2021), en el valle de Mezquital (Chamizo-Checa, 2019). A su vez, en el valle Cuautitlán-Pachuca, se evaluó el Nexo agua-cambio de uso de suelo (Ríos-Sánchez, 2024).

3.2. Inseguridad hídrica y alimentaria en la zona de estudio

En el valle de Tulancingo al igual que a nivel global, se ha detectado la creciente demanda de agua dulce y alimentos, así como una serie de problemas ambientales resaltando: deficiencia económica y ambiental en el uso del agua y la energía para la producción de alimentos; y uso de aguas negras para el riego agrícola (Lugo y De la Cruz, 2018).

Asimismo, se ha detectado la contaminación del agua estimándose una generación de 24,785,248 m³/año de agua residual; contaminación del suelo, reportándose únicamente en el municipio de Tulancingo de Bravo la generación de aproximadamente 110 Ton/día de residuos sólidos urbanos, siendo el mayor problema de contaminación los gases que se emiten y los



lixiviados, existiendo un alto porcentaje de probabilidad de que la mayoría lleguen a los diferentes cuerpos de agua de la región (Guerrero, 2010).

Y específicamente, se ha reportado que el acuífero del valle de Tulancingo que satisface la demanda de agua potable de aproximadamente 250,000 personas, se encuentra contaminado y con altos índices de vulnerabilidad en el centro del valle, debido a actividades antropogénicas (Árcega et al., 2015).

La disponibilidad de agua subterránea en el 2015 se reportó en -20.0hm^3 ; la extracción en 74.5hm^3 y la recarga media en 103.0hm^3 (CONAGUA, 2024), lo cual afirma que en el acuífero de Tulancingo no existe una disponibilidad de agua para todas las actividades humanas, incluidas las domésticas, agrícolas e industriales.

Aunado a lo anterior, Lesser *et al.* (2019) mencionan que la profundidad del agua en la región de estudio, se reportó para el año 2006 en niveles que van desde 50 a 180 metros, encontrándose los más someros en el extremo norte de la zona en el municipio de Metepec y los más profundos en los extremos noroeste y sur en la Ciudad de Tulancingo y municipios que están en el centro del valle, lo cual representa un gasto de energía mayor para la extracción del agua en los municipios con mayor actividad antropogénica. En este sentido se observa que no se están aprovechando de forma adecuada los recursos y por lo tanto no existe una gestión adecuada de estos que ayude a generar un desarrollo sustentable en la zona.

Asimismo, se han reportado años con niveles de sequía extrema (D3) y excepcional (D4), en los siete municipios que comprenden el valle de Tulancingo, como por ejemplo el primer semestre del 2024 (Figura 10).

Municipio	15-ene-24	31-ene-24	15-feb-24	29-feb-24	15-mar-24	31-mar-24	15-abr-24	30-abr-24	15-may-24	31-may-24	15-jun-24	30-jun-24	15-jul-24
Acatlán	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3	D3	D3	D4	D4		
Acaxochitlán	D2	D2	D2	D2	D3	D3	D3	D3	D3	D4	D4	D1	D0
Cuautepec de Hinojosa	D2	D2	D2	D2	D3	D3	D3	D3	D3	D4	D4	D0	D0
Metepec	D2	D2	D2	D2	D3	D3	D3	D3	D3	D4	D4		
Santiago Tulantepec	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3	D3	D3	D3	D3		
Singuilucan	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3	D3	D3	D3	D0	D0
Tulancingo de Bravo	D2	D2	D2	D2	D3	D3	D3	D3	D3	D4	D4		D0

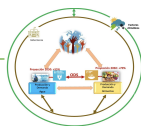
Figura 10. Niveles de sequía en el valle de Tulancingo año 2024

Fuente: Servicio meteorológico, 2025



Respecto a los problemas de seguridad alimentaria, el estado de Hidalgo cuenta con aproximadamente el 20% de los hogares con inseguridad alimentaria alta y muy alta y el 25% de la población tienen carencias por acceso a la alimentación (Aguilar-Estrada, 2019). A su vez, los municipios que representan al valle de Tulancingo cuentan con grados de inseguridad alimentaria (CONEVAL, 2025).

Cabe destacar que la zona del valle de Tulancingo pertenece a las cinco regiones estratégicas nacionales con potencial productivo de cebada, reportándose 1,983,732 hectáreas bajo estas condiciones agroclimáticas y edáficas favorables, obteniéndose rendimientos de hasta 3.29 toneladas/hectárea (SAGARPA, 2017) por lo que conocer las interdependencias del Nexo agua-alimentos, contribuirá a generar estrategias de producción favorables tanto económica, como social y ambientalmente.



IV. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Evaluar el Nexo agua-alimentos del valle de Tulancingo Hidalgo, mediante el uso de escenarios, para definir estrategias sustentables de adaptación en ambos recursos y con ello facilitar la toma de decisiones en la elaboración de políticas públicas.

4.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar la región del valle de Tulancingo a través de la integración de una base de datos con variables hídricas y alimentarias, para establecer las interrelaciones entre estos dos recursos.
2. Diseñar un modelo conceptual de la zona de estudio que incluya las características hídricas y alimentarias como base matemática, mediante la búsqueda de datos y elaboración de bases de datos, para determinar tanto la demanda como la disponibilidad de cada recurso en el valle de Tulancingo.
3. Realizar el balance hídrico del valle de Tulancingo mediante la herramienta de evaluación WEAP, para validar el modelo que demostrará se refleja la realidad de ciclo hidrológico del valle, considerando tanto la disponibilidad como la demanda hídrica y alimentaria.
4. Generar escenarios en la zona de estudio mediante WEAP, para analizar el comportamiento del Nexo agua-alimentos en el valle de Tulancingo del año 2013 a 2050.
5. Identificar y seleccionar indicadores de sustentabilidad a través de la combinación de metodologías sustentables, que permitan evaluar el Nexo agua-alimentos en la zona de estudio.
6. Proponer acciones mediante los resultados obtenidos de los escenarios del Nexo, para facilitar la toma de decisiones en políticas públicas del valle de Tulancingo.



V. METODOLOGÍA

5.1. *Caracterización del área de estudio*

5.1.1. *Localización*

El valle de Tulancingo se ubica en la región centro-oriental de México, en el sureste del estado de Hidalgo (20.0833°N, -98.3667°O). Abarca aproximadamente 1183 km² (SIATL, 2023). El valle comprende los municipios de Acatlán, Acaxochitlán, Cuautepec de Hinojosa, Metepec, Singuilucan, Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Tulancingo de Bravo y Chignahuapan. La altitud varía entre los 1640 y los 3180, y la mayoría de los municipios presentan zonas entre los 2000 y los 2400 metros (Árcega et al., 2015).

En la Figura 11 se pueden observar las elevaciones topográficas, las cuales se presentan en un rango de 1640 a 3180 metros sobre el nivel del mar, destacando que la mayoría de los municipios cuentan con zonas entre 2000 y 2400 metros.

El uso de suelo y vegetación se caracteriza por predominar la actividad agrícola, de la cual 80.35% del total de la superficie sembrada es de temporal, seguido por 19.40% para agricultura de riego y únicamente 0.25% es destinado a agricultura protegida (SIAP, 2014). También se representan las zonas urbanas en tonos grises, los principales cuerpos de agua destacando la Laguna de Zulpitlán y se incluyen las principales industrias que demandan agua.



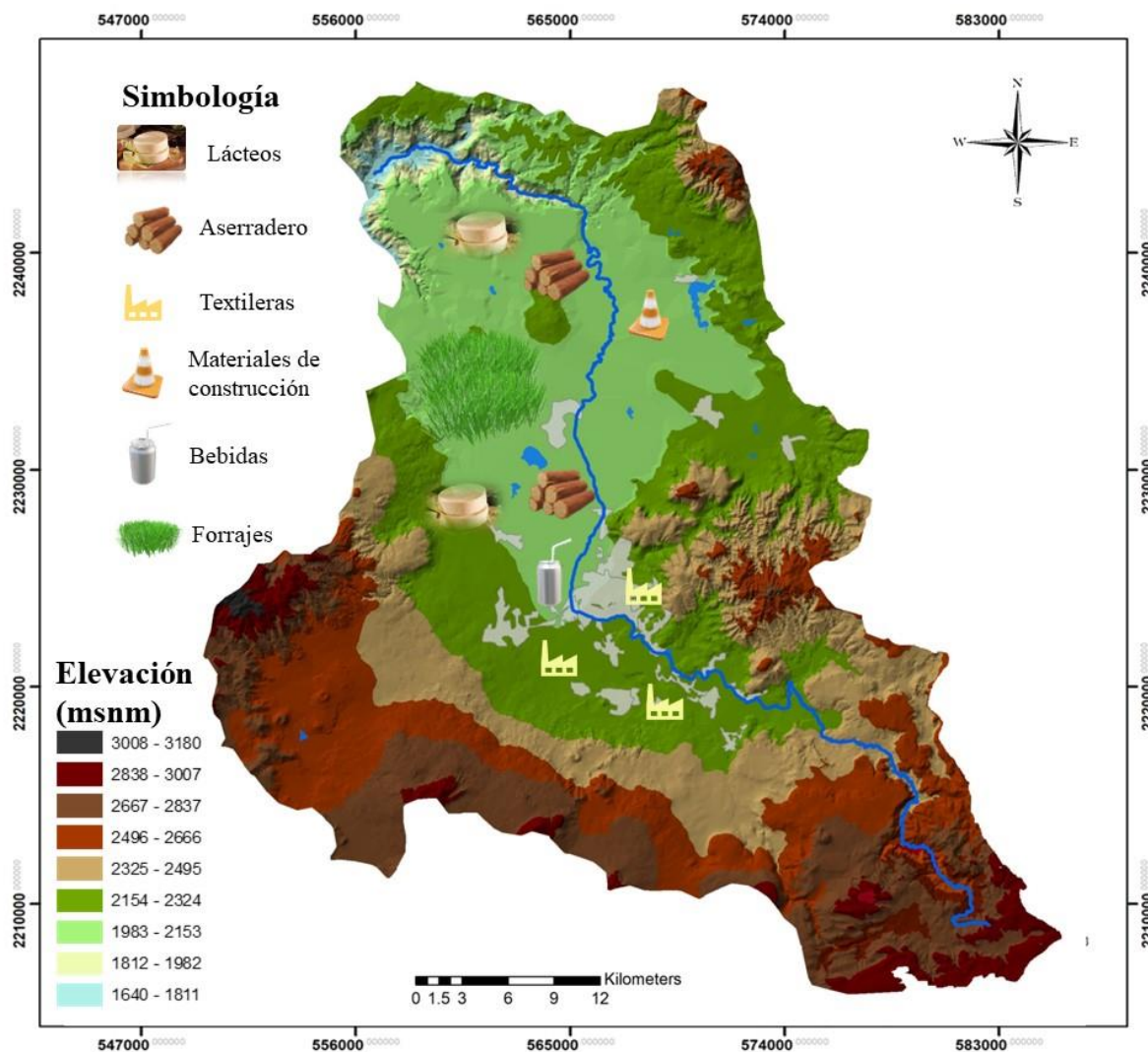
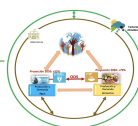


Figura 11. Localización y elevaciones del valle de Tulancingo

La población total del valle asciende a 242.014 habitantes, según el último censo (INEGI, 2020), de los cuales el 71% se concentra en los municipios de Tulancingo de Bravo y Cuautepec de Hinojosa, donde se ubican los principales núcleos urbanos. La principal actividad económica y el uso del suelo en la zona se centran en la producción agrícola y ganadera.

5.1.2. Parámetros climatológicos y edáficos

El clima predominante en el valle de Tulancingo es de estepa semiárida con lluvias estivales. Los tipos de suelo predominantes incluyen kastanozems, vertisoles, luvisoles y umbrisoles (INEGI, 2015).



Los datos mensuales acumulados de precipitación y temperatura se obtuvieron de la serie histórica para el periodo 1998-2017, disponible en los datos públicos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2023), como se detalla en la Figura 12. Se recopilaron y sistematizaron datos de 15 estaciones meteorológicas representativas para el modelo. Las estaciones se seleccionaron mediante el método de interpolación poligonal de Thiessen, recomendado para lograr una distribución geoespacial más precisa en el área de estudio (Ortiz y Villaseñor, 2025).

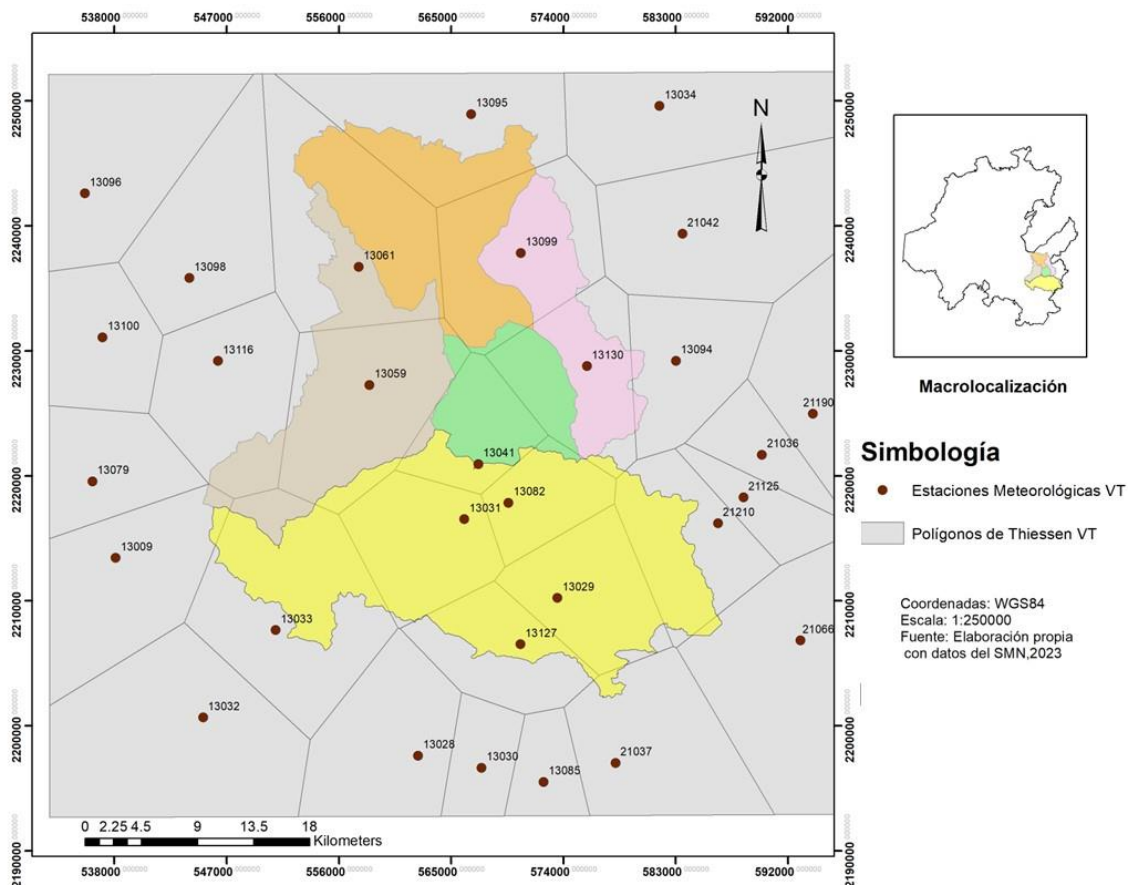


Figura 12. Polígonos de Thiesen y estaciones climatológicas del valle de Tulancingo

Los meses de junio, julio, agosto y septiembre presentan las mayores precipitaciones (Figura 13). El promedio anual de lluvias más bajo (400–500 mm) se registra en la región central, en los municipios de Santiago Tulantepec y una pequeña porción de Tulancingo de Bravo. En contraste, el resto de los municipios reciben entre 500 y 800 mm anuales (SMN, 2023).



La temperatura promedio anual en la zona oscila entre 12 °C y 18 °C (Figura 13), con un rango predominante de 14–16 °C en los municipios de Acatlán, Tulancingo de Bravo y Santiago Tulantepec, y de 12–14 °C en Cuauhtepec de Hinojosa, Singuilucan y Metepec (SMN, 2023).

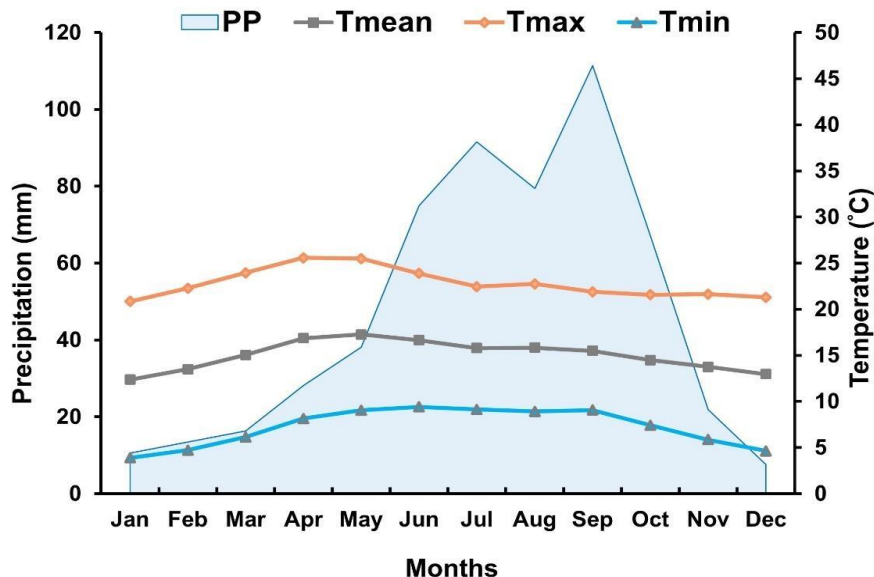


Figura 13. Valores promedio de precipitación y temperatura del valle (1998- 2017)
 PP: precipitación, Tmean: temperature media, Tmax: temperatura máxima, Tmin: temperatura mínima.

Se calculó el índice estandarizado de precipitación en el periodo 1998-2017 (Figura 14), con el que se definió el año base 2013 para realizar el modelado de escenarios, debido a que no se presentaron alteraciones ambientales, sociales o económicas atípicas.

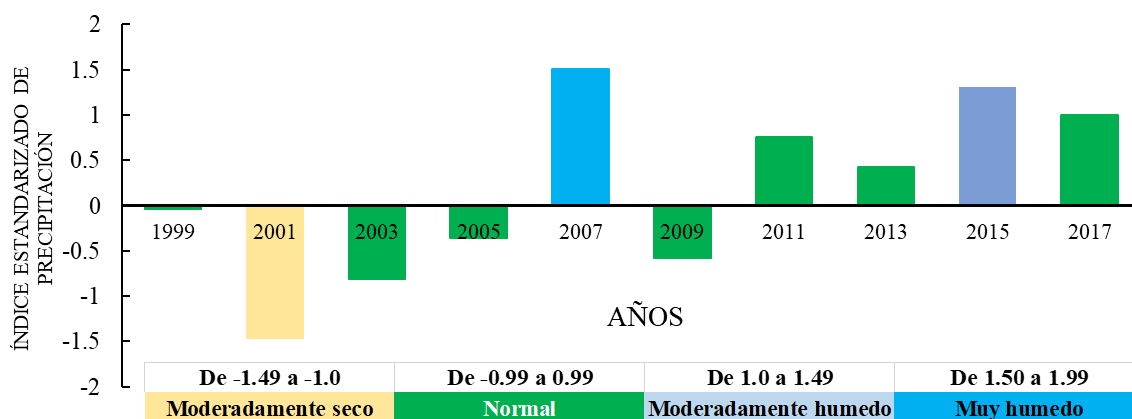


Figura 14. Índice estandarizado de precipitación del valle de Tulancingo



5.1.3. Hidrología

El valle de Tulancingo se ubica dentro de la Región Hidrológica 26 Alto Pánuco (SEMARNAT, 2023). La Figura 15 muestra la hidrología superficial y subterránea del valle, donde el Distrito de Riego 028, con una superficie de 824 ha, abastece a 484 usuarios. El volumen anual de agua superficial destinado a riego es de 13,366,050 m³ (Torres, 2020). Además, se identificaron 284 pozos en la zona (CONAGUA, 2014).

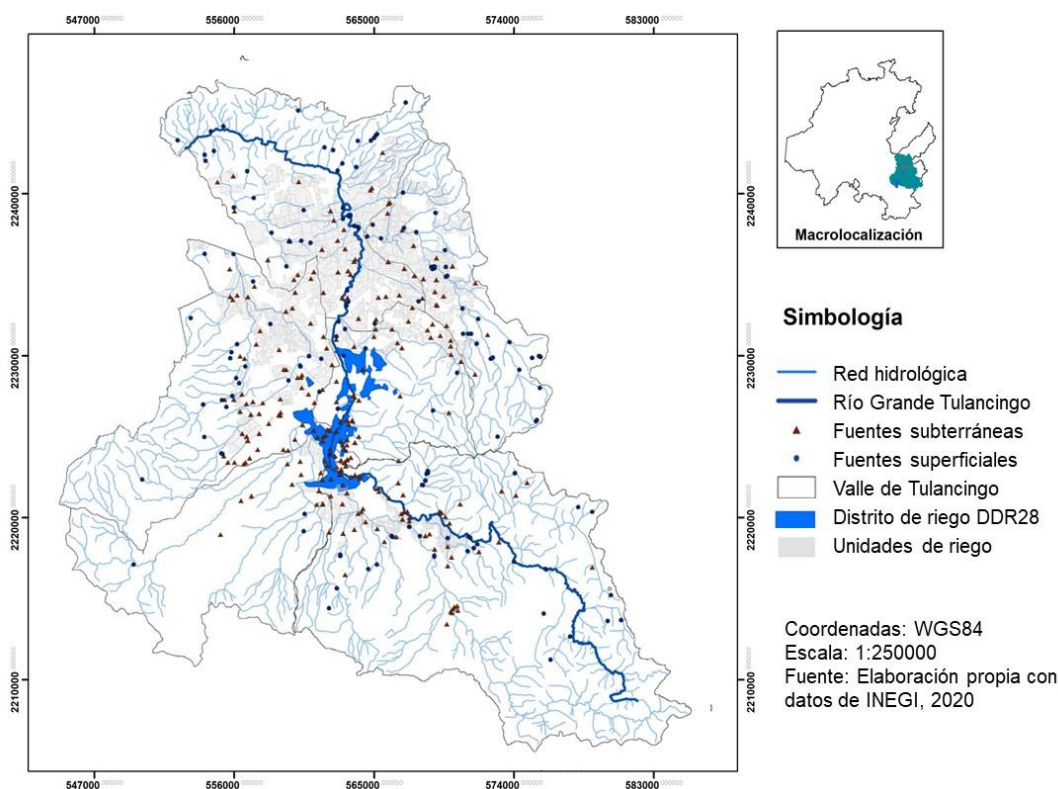


Figura 15. Red hidrológica del valle de Tulancingo

El Acuífero 1317-valle de Tulancingo (SIGACUA, 2023) es la principal fuente de agua potable para más de 250,000 habitantes (Figura 16). Del volumen total extraído, el 78,5% se destina a actividades agrícolas y ganaderas, el 18,8% al abastecimiento público urbano, el 1,85% al consumo doméstico y el 2,0% al uso industrial (Árcega et al., 2015).

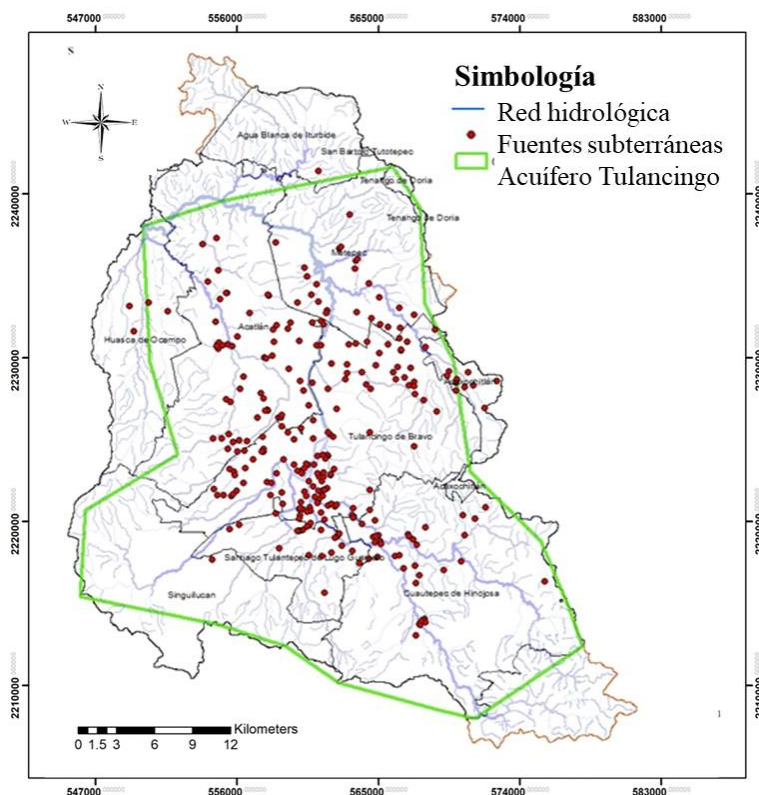


Figura 16. Acuífero del valle de Tulancingo

Fuente: Elaboración propia, con datos de CONAGUA (2014)

Según datos de CONAGUA (2024) limita al norte con el acuífero Mezquitlán, del Estado de Hidalgo; al noreste con el acuífero Álamo-Tuxpan de Veracruz; al este con Acaxochitlán; al oeste con Huasca-Zoquitán; al sur con el acuífero Tecocomulco, pertenecientes al Estado de Hidalgo; al suroeste con el acuífero Cuautitlán-Pachuca del Estado de México, y al sureste con el acuífero Tecolutla, perteneciente al Estado de Veracruz.

5.1.4. Aspectos agrícolas y pecuarios

El área de estudio se considera una de las regiones agrícolas más importantes del estado de Hidalgo, debido a que en ella se producen aproximadamente 24 cultivos de importancia nacional, destacando la producción de maíz grano blanco en todos los municipios (43%), seguido por pastos y praderas, cebada, avena, maíz forrajero y alfalfa (Figura 17).

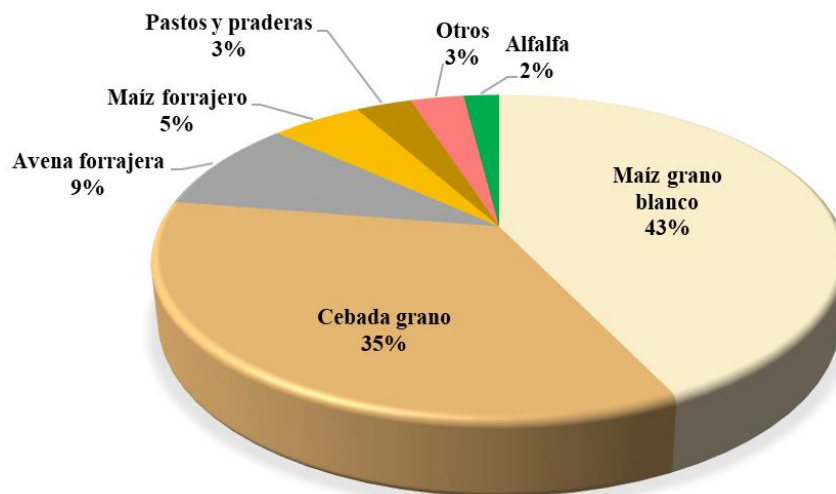


Figura 17. Proporción de cultivos en superficie total del valle de Tulancingo

Fuente: SIAP, 2022

Para conocer la evolución de la agricultura en el valle de Tulancingo y determinar un adecuado año base de análisis, se realizó un análisis agrícola del periodo 2010-2021 a nivel de municipio (Figura 18). Destacando que los municipios que presentan mayor actividad agrícola son Cuautepec de Hinojosa con una superficie sembrada de 222,037.43 ha. y Tulancingo de Bravo con 127,626.55 ha. durante el periodo evaluado. De igual forma, estos municipios presentaron la mayor diversificación de cultivos. Y los cultivos que reportaron un mayor rendimiento son el tomate rojo, pastos y alfalfa, en la mayoría de los municipios (SIAP, 2022), como se detalla en la Figura 18.

Cabe resaltar que el municipio de Axochitlán se diferencia de los demás municipios, debido a que en él se siembran frutales como manzana, ciruela y durazno (Figura 18). Sin embargo, del total de su superficie sembrada en 2021, el 90% se destina a la producción de maíz grano blanco, lo que representa el 63% del valor total de su producción.

A su vez, Metepec se caracteriza por la mayor producción de tomate rojo, el cual obtuvo el 32% del valor total de la producción, con menos del 0.45% del total de la superficie sembrada (Figura 18).



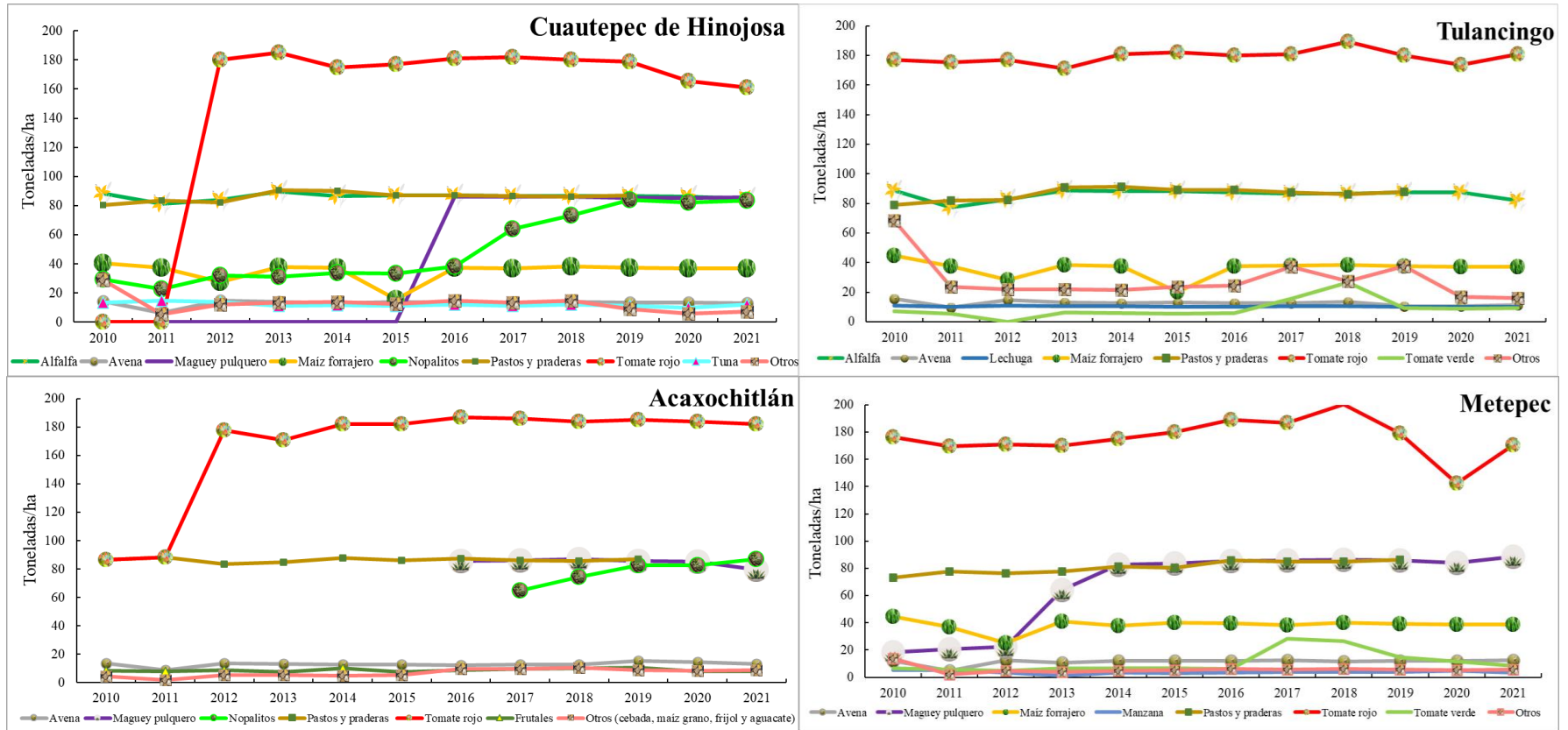


Figura 18. Producción agrícola: Cuautepec, Tulancingo, Acaxochitlán y Metepec (2010-2021)

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2022



Santiago Tulantepec y Acatlán se enfocan en la producción de cultivos forrajeros como alfalfa y pasto *Rye grass*, logrando estas especies el 26% del valor total de la producción en sólo 9% del total de la superficie de siembra (Figura 19). Singuilucan se diferencia de todos los municipios, porque es el único que no reporta superficie agrícola de riego; el maguey pulquero es el cultivo de máximo rendimiento y la cebada ocupa el 73% de la superficie de siembra, lo que representa el 80% del valor total de la producción (SIAP, 2022), como se detalla en la Figura 19.

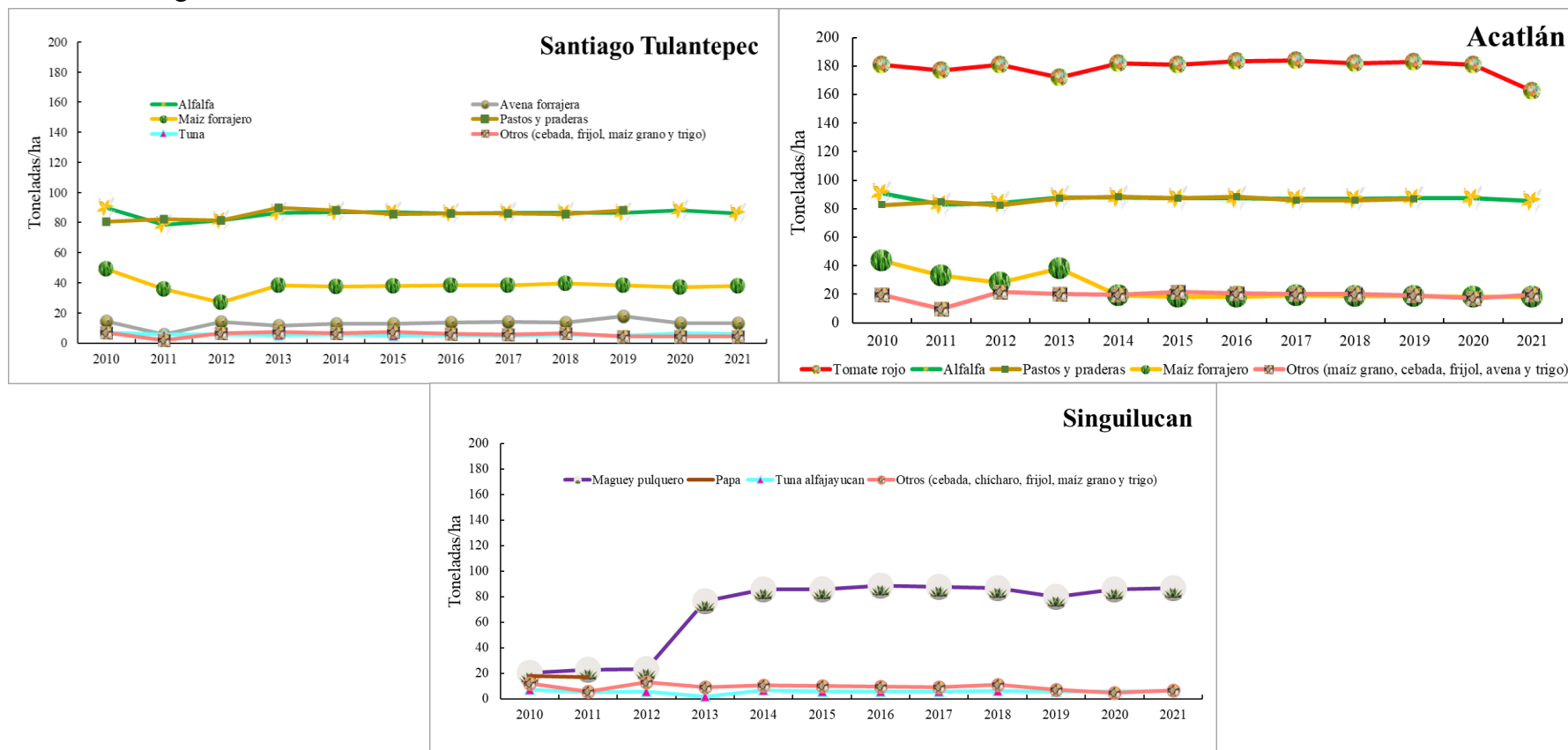


Figura 19. Producción agrícola: Santiago Tulantepec, Acatlán y Singuilucan (2010-2021)



5.1.5. Situación socioeconómica e industrial

Los principales asentamientos humanos se localizan en los municipios de Tulancingo de Bravo, Santiago Tulantepec y Cuauhtepac de Hinojosa. Existe una población de aproximadamente 242,014 habitantes (INEGI, 2020) los cuales se concentran principalmente en el municipio de Tulancingo de Bravo y Cuauhtepac de Hinojosa.

Se localizan 96,852 viviendas, de las cuales solamente 92,452 disponen de agua de la red pública y en promedio habitan cuatro personas en cada una (INEGI, 2020).

Predomina el comercio al por menor, la industria manufacturera, de alimentos y la industria de bebidas (Figura 20a). Asimismo, en el valle se identificaron 14,825 unidades económicas, de las cuales 1,818 están dedicadas específicamente a la industria alimenticia (INEGI, 2013).

Cabe resaltar que la industria de producción de quesos en el valle de Tulancingo se caracteriza por distribuirse en 75 empresas registradas (Gómez, 2010) y muchas más sin registrar, en los municipios de Acatlán, Tulancingo y Santiago Tulantepec (Figura 20b).

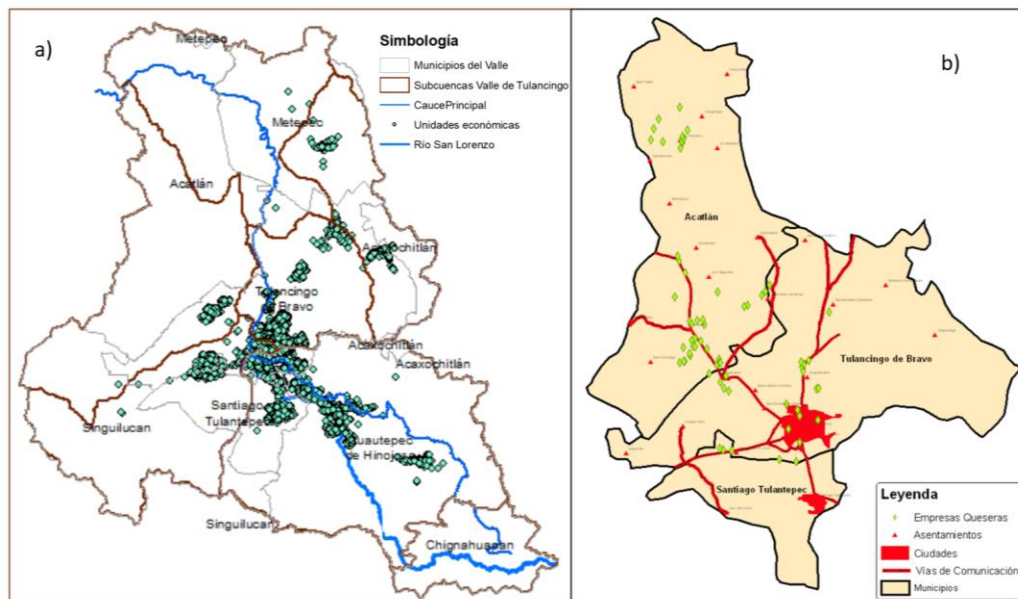


Figura 20. Distribución geográfica de industrias en el valle de Tulancingo

a) unidades económicas, b) padrón único de empresas queseras. Elaboración propia con datos de INEGI, 2013.
b) Gómez, 2010.

Esta actividad tiene gran relevancia por generar graves problemas de contaminación del agua y del suelo, debido a que el lactosuero que se genera del proceso de producción contiene un elevado porcentaje de materia orgánica y de los 429,000 litros de lactosuero que se generan al día aproximadamente, se detectó que en el valle de Tulancingo 72% se vierten sin ningún tipo de tratamiento ya sea al drenaje, arroyos o al suelo de la región (Conde-Báez et al., 2016) y únicamente el 3.7% se vuelve a utilizar para la elaboración de otros quesos (Gómez, 2010) y otro porcentaje para alimentar al ganado.

5.2. Modelación hidrológica del valle de Tulancingo

5.2.1. Modelo conceptual. Año base 2013

Para garantizar la claridad y el rigor analítico, los límites del modelo conceptual se definen por la extensión espacial, el alcance temporal y el enfoque temático.

En este sentido, los flujos de entrada y salida de agua del valle se utilizaron para definir el modelo y establecer los supuestos y consideraciones, fundamentales para influir en la funcionalidad y aplicabilidad en situaciones del mundo real, considerándose los siguientes:

- Se estableció el año base 2013, debido a que representa un año normal según el Índice de Precipitación Estandarizado (Figura 10) y la disponibilidad de datos históricos de la estación hidrométrica 26807 (1982-2014) para la calibración posterior del modelo matemático.
- El valle de Tulancingo se considera una cuenca hidrográfica. Según los mapas de elevación, comprende seis subcuencas para el estudio: Cuauhtepec, Acatlán, Barranca, Tulantepec, Metepec y Napateco. Cada subcuenca tiene un afluente principal que desemboca en el río Grande Tulancingo.
- El río Grande Tulancingo es el principal afluente del valle. Nace en la región montañosa de Chignahuapan (estado de Puebla) y fluye hacia el norte (Figura 11) hacia la Barranca de Metztitlán, transportando agua de lluvia, aguas residuales municipales e industriales. Es la principal fuente de agua superficial.
- No hay afluentes externos, debido a que el río Grande-Tulancingo nace internamente de las escorrentías de la sierra de Chignahuapan, Puebla, en el límite sur de la subcuenca del Cuauhtepec.



- En la parte sur del valle se encuentran aproximadamente 500 fallas geológicas, conocidas como dolinas, que incrementan la infiltración, especialmente en la subcuenca del Cuauhtepic (Fernández, 2022).
- Los aportes de agua superficial incluyen: 1) el caudal proveniente de la sierra de Chignahuapan a través del río Grande-Tulancingo en el límite sur del valle, 2) la escorrentía pluvial y 3) las aguas residuales municipales e industriales.
- La demanda de agua superficial se divide entre: 1) agricultura y ganadería, 2) uso urbano (servicios y comercio) y 3) uso industrial.
- Las salidas de agua superficial incluyen: 1) evapotranspiración, 2) flujo hacia la Barranca de Mezquitlán en la parte norte del valle y 3) la demanda para riego agrícola, urbano e industrial.
- El suministro de agua subterránea proviene del acuífero del valle de Tulancingo, el cual presenta dos horizontes: 1) superficial (20-40 metros de profundidad) y 2) profundo (hasta 300 metros), este último confinado (Lesser et al., 2019), con una disponibilidad de 103 hm³ (CONAGUA, 2013).
- Las entradas de agua subterránea son: 1) recarga del acuífero mediante infiltración de la lluvia y resúmenes, y 2) retorno del agua de riego. No existen transferencias de agua subterránea debido a la naturaleza confinada del acuífero (Lesser et al., 2019).
- Las salidas de agua subterránea son: 1) evapotranspiración, 2) demanda de a) agricultura y ganadería, b) uso urbano (doméstico, servicios públicos y comercio) y c) uso industrial (principalmente textiles, refrescos y bebidas, productos lácteos, materiales de construcción y aserraderos).
- La evapotranspiración se estimará mediante el método de Penman-Monteith.
- El agua subterránea consumida por la industria de refrescos representa una pequeña exportación, y el modelo considera la producción en volumen de forma insignificante.
- Requisitos adicionales del modelo matemático: 1) Exclusión de los pastos inducidos por la agricultura estacional, y 2) se utilizará la subcuenca Cuauhtepic para la calibración, debido a que sólo existe una estación hidrométrica (26807 Tulancingo) ubicada en el sur, cuya validez se asume para todo el valle.

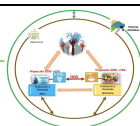


5.2.2. Datos de entrada para modelaje en WEAP

Se recopilaron una serie de datos obtenidos de diversas fuentes gubernamentales, como son: CONAGUA, INEGI, SIAP, FAO, SIATL, estaciones meteorológicas activas, estaciones hidrométricas, entre otras, considerándose las variables descritas en la Tabla 3.

Tabla 3. Variables empleadas para modelaje en WEAP

Consideraciones hídricas		
Variable	Unidades	Obtención de la información
Pozos	cantidad	CONAGUA (REPDA)
Cuerpos de agua: ríos, presas y bordos	Localización	INEGI, SIATL
Coefficientes de cultivos (Kc)	---	FAO y literatura especializada
Precipitación	Mm	Estaciones meteorológicas activas
Coefficiente de escurrimiento	---	Metodología CONAGUA
Coefficiente de infiltración	---	Metodología CONAGUA
Evapotranspiración	m/mes	Método Penman Montheit (FAO)
Agua agrícola, municipal e industrial	m ³	CONAGUA (REPDA) y DENUÉ
Superficie sembrada y cosechada	Ha	SIAP
Volumen de escurrimiento anual	m ³	CONAGUA (estación hidrométrica)
Variables socio-territoriales		
Variable	Unidades	Obtención de la información
Delimitación subcuencas hidrológicas	Ha	SIATL, 2023; INEGI; SIG
División política municipal	Km	INEGI, 2021 Escala: 1:250000
Población	Habitantes	INEGI
Vegetación y uso de suelo	---	INEGI, 2013, Serie V. Escala: 1:250000
Elevación	M	INEGI, 2023a
Tipo de suelo	---	INEGI, Serie III (F14D82). Escala: 1:50000
Rendimiento de cultivos	ton/ha	SIAP
Superficie sembrada y cosechada	Ha	SIAP
Valor de la producción	miles de pesos	SIAP
Temperatura máxima, mínima y media	°C	Estaciones meteorológicas activas



Todas las variables recopiladas se procesaron en Excel para generar una base de datos por sector. Una vez recopiladas y sistematizadas las variables se procedió a la delimitación de las subcuencas.

Delimitación de las subcuencas.

Se establecieron las subcuencas hidrográficas como áreas de drenaje pluvial, al estar delimitadas por un parteaguas y donde su sistema hídrico conduce sus aguas a un afluente principal, que por lo general es un río. Asimismo, dentro de éstas se encuentran integrados sistemas biofísicos y socioeconómicos, como recursos naturales, ecosistemas, agroecosistemas y asentamientos humanos estrechamente relacionados y por lo tanto interdependientes (Cuervo-Osorio, 2020).

Se realizó empleando el mapa topográfico del estado de Hidalgo (MDE), disponible en la página web de INEGI y por medio de geoprocursos con la herramienta digital “Hydrology” ubicada en “Spatial Analyst Tools” se procedió a su delimitación.

Se rellenaron los espacios para evitar celdas vacías en el ráster del MDE, esto por medio del comando “Fill”. Posteriormente se definió la dirección de la red hidrológica empleando el comando “Flow Direction”, paso a seguir se determinó la acumulación de la red utilizando el comando “Flow Accumulation”, lo cual permitió ubicar los puntos de drenaje a través del comando “SnapPoint”, una vez ubicados estos puntos se generaron las sub-cuencas con el comando “Watershade” y finalmente el ráster obtenido se convierte a una capa vectorial, proceso que se detalla en la Figura 21.

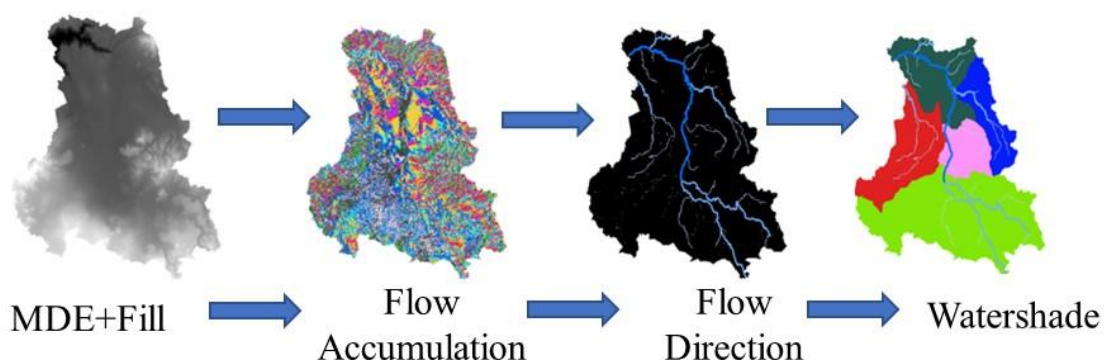


Figura 21. Geoprocursos para delimitar las subcuencas del valle de Tulancingo

Fuente: Elaboración propia mediante el uso de SIG

Caracterización de las subcuencas

Las características naturales y el uso de suelo del valle se presentan en la Figura 11.

- ***Subcuenca Cuauhtepac:*** Ubicada en la parte sureste de la cuenca, esta subregión marca el segmento inicial donde el río principal ingresa al valle. Es la más extensa, con un 56% dedicado a la agricultura de secano y de aguas superficiales, y un 6% a la agricultura de riego y la ganadería. Alberga las industrias textiles y de bebidas destiladas más grandes y ocupa el segundo lugar en población, representando el 30% del total del valle.

- ***Subcuenca Tulantepec:*** Ubicada en la zona suroeste del valle, gran parte de la ciudad de Tulancingo se encuentra dentro de esta subcuenca, que concentra la mayor población de la región, representando aproximadamente el 38% del total. Se caracteriza por el extenso cultivo de cebada de temporal y la presencia de 47 industrias textiles, además de un rastro, todo esto ejerce una presión considerable sobre los recursos hídricos subterráneos.

- ***Subcuenca Metepec:*** Ubicada al este, produce maíz y tomate rojo mediante agricultura de riego, cuenta con un aserradero y cuatro pequeñas empresas de extracción de piedra. Alberga el 5% de la población del valle.

- ***Subcuenca Napateco:*** Ubicada en el centro del valle, es la más pequeña en superficie, con zonas urbanas y parques naturales designados. Presenta el mayor nivel de producción de alfalfa de la región, gracias al Distrito de Riego de Tulancingo, que utiliza agua subterránea por gravedad y se encuentra en un 75% dentro de sus límites. La subcuenca concentra aproximadamente el 7% de la población total.

- ***Subcuenca de Acatlán:*** Ubicada en la parte occidental de la cuenca, es la segunda más grande en extensión territorial y se destaca por su alta actividad agrícola y ganadera, que depende del agua subterránea. Sobresale en la producción de cultivos forrajeros bajo riego (135,711 toneladas), la ganadería, con una producción de 1,062 toneladas de carne y 19.14 millones de litros de leche



(SIAP, 2014), alberga el 61% de las pequeñas empresas productoras de lácteos. Esto genera 29,275 L/día de suero, del cual el 36% se descarga sin tratamiento en desagües, ríos o suelo. La subcuenca concentra el 15% de la población del valle.

• **Subcuenca Barranca:** Ubicada en el extremo norte de la cuenca, esta región marca el tramo final donde el río principal desemboca en La Barranca de Metztlán. Es la principal productora regional de tomate rojo cultivado en invernadero y ocupa el segundo lugar en producción de maíz. La zona también alberga industrias de extracción de piedra y de materiales de construcción. Tiene la menor concentración de población en la cuenca, representando solo el 4% del total.

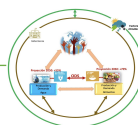
De forma resumida y datos relevantes de las subcuencas en el año base 2013 se presentan en la Tabla 4.



Tabla 4. Aspectos sociodemográficos del valle de Tulancingo (2013)

Subcuenca	Area (km ²)	Población (habitantes)	Sector industrial (número de industrias)*				Porcentaje de uso de suelo (%)						
			Tex	Saw	IA	MC	AT	AR	ZU	B	P	CA	Mat
Napateco	98	17634	60	4	29	41	25.5	35.0	8.5	15.9	11.9	0.02	3.1
Metepec	116	12162	7	1	2	17	59.4	14.3	1.2	20.7	2.2	1.6	0.7
Tulantepec	167	92881	47	0	24	20	60.1	6.0	3.6	29.6	0.4	0.1	0.0
Barranca	198	10608	0	1	0	4	51.7	17.0	0.08	23.0	4.3	0.1	3.7
Acatlán	219	35455	4	0	77	10	38.7	27.5	1.4	27.4	4.4	0.5	0.07
Cuautepec	385	73274	139	0	45	67	55.6	5.6	3.4	26.7	7.5	0.05	1.0
Valle de Tulancingo	1,183	242,014	257	6	177	209	50.3	14.9	2.7	25.1	5.2	0.3	1.3

*INEGI (2014), Tex: industria textil, Saw: aserradero, IA: industria alimenticia, MC: materiales de construcción, AT: agricultura de temporal, AR: agricultura de riego, ZU: zona urbana, B: bosque, P: pastizal, CA: cuerpos de agua, Mat: matorral crasicaule.



5.2.3. Modelo matemático. Año base 2013

Los volúmenes de agua superficial y subterránea, tanto para el año base como para los escenarios proyectados, se calcularon mediante el software WEAP (Sistema de Evaluación y Planificación del Agua). Los resultados se utilizan para determinar el balance hídrico del acuífero, el metabolismo del agua del valle y para caracterizar el ciclo hidrológico dentro del área de estudio.

El modelo esquemático de WEAP (Figura 22) utiliza una capa vectorial creada en ArcGIS que incluye las subcuencas representativas del área de estudio, las principales interacciones entre los sitios de demanda sectorial y las fuentes primarias de agua (río Grande Tulancingo y acuífero Tulancingo), así como las unidades hidrológicas, la infiltración, los retornos y los procesos de escorrentía.

Para calcular los volúmenes de agua superficial y subterránea de los escenarios y del año base se empleó el software WEAP. Con los resultados se determinó el balance hídrico del acuífero y el ciclo hidrológico de la zona de estudio.

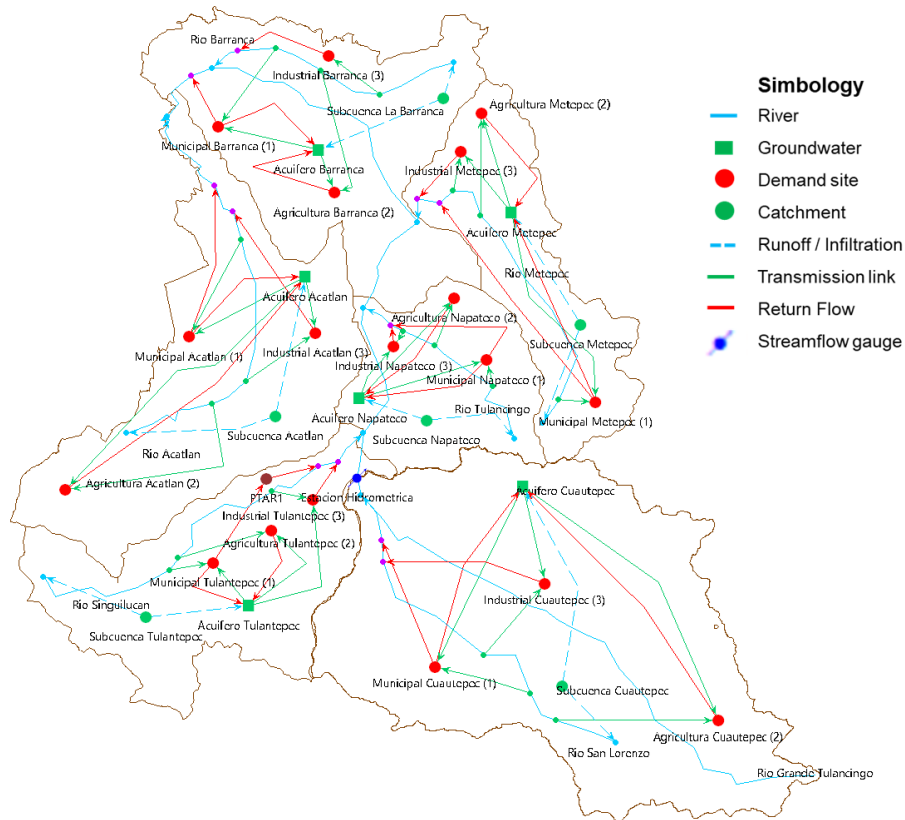
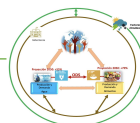


Figura 22. Diagrama en WEAP del modelo conceptual del valle de Tulancingo



5.2.4. Balance hídrico

Simulación del ciclo hidrológico del valle de Tulancingo. Se empleó el módulo de "escorrentía pluvial" que proporciona mayor disponibilidad de datos para los parámetros necesarios (Dlamini, Senzanje y Mabhaudhi, 2023) para calcular el ciclo hidrológico de cada subcuenca y del valle completo mediante la suma de las escorrentías parciales.

Interpolación de la precipitación y la temperatura mediante Kriging. Se utilizaron datos climáticos públicos de la plataforma en línea del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2023) para calcular los valores promedio a partir de los registros de 15 estaciones meteorológicas dentro del área de estudio. La figura 23a muestra el mapa ráster de precipitación anual interpolados mediante kriging en ArcGIS 10.5.

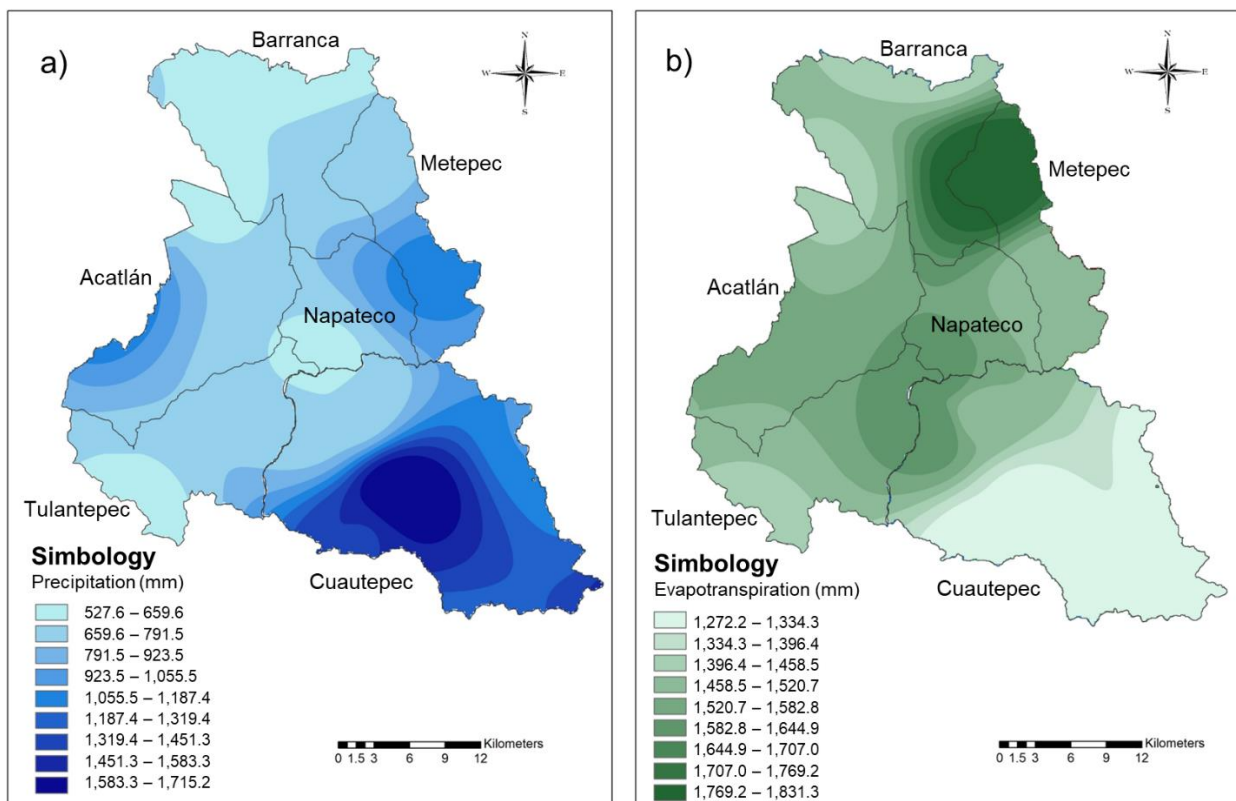


Figura 23. Interpolaciones del valle de Tulancingo mediante Kriging (2013)
 a) Interpolación de la precipitación, b) Interpolación de la evapotranspiración

Cálculo de la evapotranspiración (E_t). El método estandarizado de Penman-Monteith es aceptado y recomendado por la Organización Meteorológica Mundial y adoptado por la FAO para

calcular la ET_0 mensual para el año base 2013 (Zotarelli et al., 2018). La ecuación (E1) y el mapa ráster (Figura 23b), detallan el comportamiento de la evapotranspiración.

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

Donde:

R_n es la densidad neta del flujo de radiación en la superficie del cultivo ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$).

G es la densidad del flujo de calor del suelo.

Δ es la pendiente de la curva de presión-temperatura de vapor.

T es la temperatura del aire ($^{\circ}C$).

U_2 es la velocidad del viento.

γ es la constante psicrométrica.

Determinación de los coeficientes de escorrentía (C_e) e infiltración (C_i)

. La Tabla 5 muestra los resultados para cada subcuenca. Para el coeficiente de escorrentía (C_e), se aplicó la metodología descrita por Galindo et al. (2010). Véase la Ecuación 2, que considera la pendiente, la textura del suelo, el uso del suelo y un periodo de retorno de 10 años para cada subcuenca.

$$C_e = LU + S + T \quad (2)$$

Donde C_e : Coeficiente de escorrentía, LU : Uso del suelo, S = Elevación y T : Textura

La Ecuación 3 es el método actual para calcular el coeficiente de infiltración (C_i), que se obtiene restando el coeficiente de escorrentía de uno. Los resultados obtenidos para cada subcuenca se muestran en la Tabla 5.

$$C_i = 1 - C_e \quad (3)$$

Donde C_e : Coeficiente de escorrentía; y C_i : Coeficiente de infiltración.



Tabla 5. Coeficientes de escorrentía e infiltración para cada subcuenca en porcentaje

Subcuenca	Área (km ²)	Ce	Ci
Napateco	98	43.76	56.24
Metepec	116	43.11	56.89
Tulantepec	167	42.07	57.93
Barranca	198	41.02	58.98
Acatlán	219	40.41	59.59
Cuautepec	385	38.00	62.00
Valle de Tulancingo	1,183		

Ce: coeficiente de escorrentía, Ci: coeficiente de infiltración

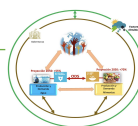
Coeficiente de cultivo (Kc): Se consideraron los períodos de crecimiento de cada cultivo (alfalfa, avena, maíz grano, maíz forrajero, pasto *Ray grass* y tomate rojo) para determinar el coeficiente de cultivo (Kc), junto con los requerimientos de agua para cada etapa fenológica (ver Tabla 6).



Tabla 6. Coeficientes de cultivo y rendimientos máximos de cultivos del valle de Tulancingo (2013)

Cultivo	Valores mensuales de coeficientes de cultivo (Kc)												Rendimiento máximo anual (t/ha)
	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Alfalfa	0.95	0.95	0.05	0.05	1.15	1.15	1.15	1.00	1.10	1.00	0.05	0.95	86.80
Avena	0.95	0.95	0.05	0.05	1.31	1.6	1.46	0.95	0.95	0.05	0.00	0.05	1.81
Jitomate	0.05	0.05	0.05	0.05	1.01	1.07	1.16	0.95	0.95	0.5	0.05	0.05	200.45
Maíz forrajero	0.95	0.05	0.05	0.05	1.08	0.94	1.5	0.95	1.04	0.95	0.00	0.05	40.06
Maíz grano	0.95	0.95	0.05	0.05	1.08	0.94	1.5	0.95	1.04	0.92	0.00	0.00	3.00
Pastos	0.10	0.70	0.05	0.05	1.11	0.95	1.11	0.95	1.50	0.80	0.80	0.70	86.20
Tomate verde	0.95	0.95	0.05	0.05	1.10	0.30	1.10	0.95	1.10	0.50	0.00	0.05	26.49

Fuente: Elaboración propia



5.2.5. Demanda de agua subterránea y superficial

Cálculo de la demanda de agua. Los volúmenes de agua superficial y subterránea se estimaron utilizando datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la CONAGUA (2014), una base de datos en línea de acceso público.

Dado que los registros están organizados por municipio y sector, cada entrada se georreferenció para determinar su subcuenca correspondiente. La demanda de agua industrial se calculó identificando los tipos de industria relevantes que figuran en el Directorio Nacional Estadístico de Unidades Económicas (DENUE) (INEGI, 2014) para el año base y aplicando los requerimientos hídricos específicos de sus procesos de producción.

En la industria láctea, se identificaron 75 pequeñas empresas en las subcuencas de Acatlán y Tulantepec, y su demanda de agua se estimó utilizando la metodología descrita por Gómez (2010), que relaciona los volúmenes de producción de leche con el agua requerida para su procesamiento.

5.2.6. Calibración y validación del modelo matemático

Delimitación de la Subcuenca de calibración

Para llevar a cabo el balance hídrico del valle de Tulancingo fue necesario definir una subcuenca de calibración, debido a que la estación hidrométrica con que se calibró el modelo se encuentra ubicada en la Ciudad de Tulancingo, al centro del valle. Un aspecto fundamental es que los datos de la estación hidrométrica 26807 mide los caudales de los dos ríos aguas arriba (río San Lorenzo y río Grande Tulancingo), debido a que en este punto se identificó se unen los ríos considerados los afluentes principales de entrada de agua al modelo (Figura 24).

En este sentido se delimitó la subcuenca Cuauhtepac como aquella destinada para la calibración del modelo. Se consideraron todas las demandas de agua de las fuentes superficiales, subterráneas, una porción del Distrito de riego y las descargas residuales, tal como se detalla en la Figura 25.





Figura 24. Ubicación de la estación hidrométrica 26807 del valle de Tulancingo

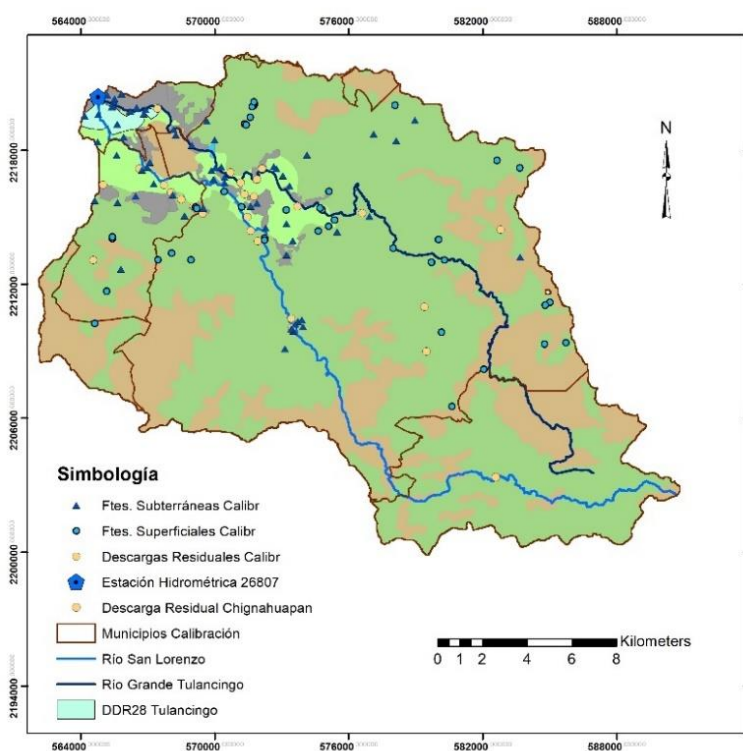


Figura 25. Subcuenca de calibración del valle de Tulancingo

Se evaluaron los volúmenes históricos de escurrimiento anual de la estación hidrométrica 26807 y con ello se confirmó que el año base seleccionado contaba con los datos más confiables para llevar a cabo la calibración del modelo (Figura 26).



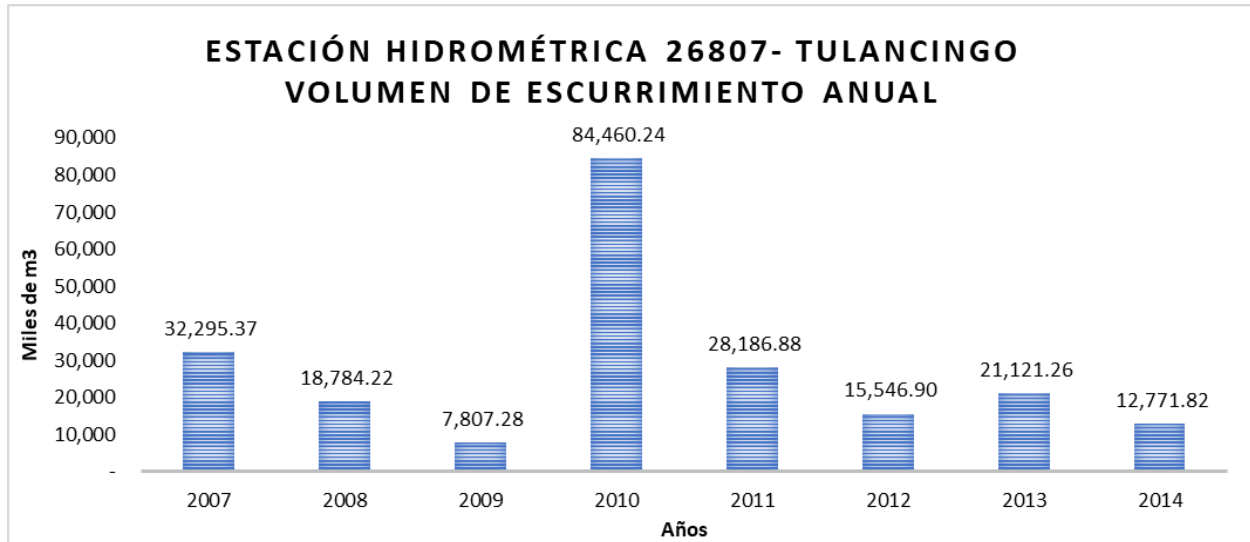


Figura 26. Volúmenes históricos de escurrimiento de la Estación hidrométrica 26807

Calibración

La estación hidrométrica 26807 en el río Grande Tulancingo, proporcionó datos valiosos para la calibración del modelo, evidenciados por la correlación lineal entre los volúmenes mensuales de agua superficial calculados y reportados por la estación, con base en datos de caudal de 2013. Se excluyó el valor de mayo debido a la falta de confiabilidad del volumen registrado por la estación hidrométrica para ese mes.

Validación

El Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) se calculó mediante la Ecuación (4) para evaluar la precisión del modelo (Ríos-Sánchez et al., 2024).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t} \times 100 \quad (4)$$

Donde n es el número de predicciones, A_t es el valor real y F_t es el valor previsto.



Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó siguiendo la metodología de Sieber (2015) modificando los valores del coeficiente de cultivo (K_c) para el maíz grano en todo el valle, utilizando los valores mínimos y máximos reportados por Allen et al. (1998), como se muestra en la Tabla 7. Este cultivo fue seleccionado porque su producción ocupa más del 60% de la superficie total dedicada a la agricultura de riego.

Tabla 7. Valores de K_c para el maíz grano utilizados en el análisis de sensibilidad

K_c	Ero	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agt	Sep	Oct	Nov	Dic
Usado	0.95	0.95	0.05	0.05	1.08	0.94	1.50	0.95	1.04	0.92	0.001	0.001
Máximo	1.00	1.00	0.30	0.40	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.20	0.30	0.30
Mínimo	0.30	0.30	0.05	0.05	0.40	0.90	0.70	0.70	0.70	0.60	0.001	0.001

Metabolismo del agua en el valle de Tulancingo

Los componentes fundamentales de los flujos de agua se calcularon mediante la Ecuación 5 (Sieber, 2015).

$$P + Ex = ETr + Q + E + I \quad (5)$$

Donde:

- P : precipitación ($\text{hm}^3/\text{año}$)
- Ex : flujos externos ($\text{hm}^3/\text{año}$)
- ETr : evapotranspiración actual ($\text{hm}^3/\text{año}$)
- Q : caudal del río Grande Tulancingo ($\text{hm}^3/\text{año}$)
- E : extracciones ($\text{hm}^3/\text{año}$)
- I : infiltración ($\text{hm}^3/\text{año}$)

Los diagramas de Sankey serán útiles para la representación visual.



Cálculo del balance hídrico del acuífero.

El balance consideró la recarga total media anual (con los retornos de agua de riego agrícola), la descarga natural comprometida y las extracciones de agua subterránea de los tres sectores. Se calculó conforme a la metodología indicada en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 (Ecuación 6).

$$DMA: R - DNC - VEAS \quad (6)$$

Donde:

- *DMA*: disponibilidad media anual de agua subterránea (hm³/año)
- *R*: recarga total anual promedio (hm³/año)
- *DNC*: descarga natural comprometida (hm³/año)
- *VEAS*: volumen de extracción de agua subterránea (hm³/año)

5.2.7. Escenarios en condiciones transitorias

5.2.7.1. Escenario de crecimiento inercial (BAU)

El escenario inercial (generalmente denominado “Business As Usual” o BAU) considera las tasas anuales de crecimiento o disminución de la población, las áreas agrícolas, las zonas urbanas, la cubierta forestal y el sector industrial para estimar el aumento de la demanda de agua en cada subcuenca durante el período de simulación 2013-2050, sin tener en cuenta otras perturbaciones.

La Tabla 8 muestra las proyecciones de crecimiento poblacional a nivel municipal reportadas por el Consejo Estatal de Población (COESPO, 2023).

ArcGIS 10.5 permitió desagregar los porcentajes de aumento poblacional por subcuenca, así como las unidades de producción industrial que figuran en el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (INEGI, 2014; INEGI, 2023). Las proyecciones de producción agrícola bajo riego incluyeron alfalfa, avena, maíz forrajero, maíz grano, pasto *Rye grass*, tomate rojo y tomate verde. Los cálculos se basaron en los porcentajes de crecimiento del área de producción reportados por el Servicio de Información Agrícola y Ganadera para 2015, 2020 y 2022 (SIAP, 2023), como se detalla en la Tabla 9.



Tabla 8. Proyecciones de población para las subcuencas del valle de Tulancingo

Subcuenca	Línea base	Proyección de la población (habitantes)							
	2013	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Acatlán	35,455	35,796	35,812	35,966	36,064	36,106	36,112	36,112	36,121
Barranca	10,608	10,729	10,846	10,951	11,033	11,087	11,120	11,142	11,155
Metepec	12,162	12,313	12,443	12,578	12,678	12,747	12,786	12,807	12,820
Cuautepec	73,274	74,153	74,351	74,764	75,015	75,148	75,159	75,189	75,245
Tulantepec	92,881	94,034	94,035	94,433	94,578	94,557	94,336	94,179	94,139
Napateco	17,634	17,797	18,210	18,632	19,065	19,507	19,960	20,424	20,898
Valle de Tulancingo (miles de habitantes)	242.01	244.82	245.70	247.32	248.43	249.15	249.47	249.85	250.38

Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI, 2020; COESPO, 2023

Tabla 9. Tasas de crecimiento del sector urbano, industrial y agrícola en cada subcuenca en porcentaje

Subcuenca	Urbano*	Industrial**	Agricultura***
Napateco	0.46	1.30	0.29
Metepec	0.66	1.53	0.49
Tulantepec	0.17	1.30	0.01
Barranca	0.63	2.00	0.47
Acatlán	0.23	1.53	0.14
Cuautepec	0.33	1.56	0.20

*(COESPO, 2023). **(DENUE, 2014, 2023). *** (SIAP, 2023).

Las proyecciones de los cambios porcentuales en las áreas agrícolas, urbanas y forestales se basaron en las series de cambios en el uso del suelo Serie V (INEGI, 2013), Serie VI (INEGI, 2016) y Serie VII (INEGI, 2021), reportadas por el INEGI. Se diseñó un modelo predictivo en el software Minitab 18.0 para cada tipo de cambio en el uso del suelo en las seis subcuencas del valle. Se ingresaron en WEAP mediante el editor de ecuaciones con porcentajes de hectáreas a través de



la función "Interp" cada 10 años. En la Tabla 10 se muestran las proyecciones del uso de suelo del 2020 y 2030 y en la Tabla 11 se detallan las proyecciones de los periodos 2040 y 2050.

Tabla 10. Proyecciones de porcentaje de uso de suelo utilizados en WEAP (2020 y 2030)

Sb	2020							2030						
	B	ZU	P	AT	AR	CA	MC	B	ZU	P	AT	AR	CA	MC
S1	21.3	10.1	10.9	20.6	34.7	0.0	2.5	23.0	10.7	10.7	19.3	34.1	0.0	2.3
S2	22.2	1.6	1.7	59.0	14.0	1.5	0.0	22.8	2.2	1.0	59.1	13.4	1.4	0.0
S3	32.7	5.3	0.8	55.2	6.0	0.1	0.0	32.9	7.7	1.2	52.5	5.6	0.1	0.0
S4	20.2	0.1	4.0	54.5	19.2	0.1	1.9	18.7	0.1	3.7	53.5	22.5	0.1	1.4
S5	22.7	3.3	3.5	48.0	22.0	0.6	0.0	22.6	6.1	3.4	47.5	19.5	0.9	0.0
S6	28.3	4.5	8.7	53.8	4.8	0.0	0.0	28.8	4.8	9.5	52.8	3.8	0.0	0.0

Sb: Subcuenca, S1: Subcuenca Napateco, S2: Subcuenca Metepec, S3: Subcuenca Tulantepec, S4: Subcuenca Barranca, S5: Subcuenca Acatlán, S6: Subcuenca Cuauatepec, B: Bosque, ZU: Zona urbana, P: Pastizal, AT: Agricultura de temporal, AR: Agricultura de riego, CA: Cuerpos de agua, MC: Matorral crasicaule.

Tabla 11. Proyecciones de porcentaje de uso de suelo utilizados en WEAP (2040 y 2050)

Sb	2040							2050						
	B	ZU	P	AT	AR	CA	MC	B	ZU	P	AT	AR	CA	MC
S1	24.0	11.0	10.6	18.6	33.5	0.0	2.1	24.8	11.3	10.6	18.2	32.9	0.0	2.1
S2	23.2	2.9	0.2	59.4	12.9	1.4	0.0	23.6	3.5	0.0	59.8	12.4	1.3	0.0
S3	32.5	10.0	1.7	50.4	5.2	0.1	0.0	32.0	12.3	2.2	48.7	4.8	0.1	0.0
S4	17.7	0.1	3.6	52.1	25.5	0.0	1.1	16.8	0.1	3.4	50.6	28.3	0.0	0.9
S5	22.4	9.0	3.3	47.0	17.1	1.1	0.0	22.3	11.9	3.3	46.5	14.6	1.3	0.0
S6	29.3	5.1	10.1	52.5	2.8	0.0	0.0	29.8	5.4	10.5	52.3	2.0	0.0	0.0

Sb: Subcuenca, S1: Subcuenca Napateco, S2: Subcuenca Metepec, S3: Subcuenca Tulantepec, S4: Subcuenca Barranca, S5: Subcuenca Acatlán, S6: Subcuenca Cuauatepec, B: Bosque, ZU: Zona urbana, P: Pastizal, AT: Agricultura de temporal, AR: Agricultura de riego, CA: Cuerpos de agua, MC: Matorral crasicaule.

Este escenario no es realista, ya que no incorpora proyecciones regionales del cambio climático. Por lo tanto, se diseñó el siguiente escenario, como una mejor referencia para la comparación con posteriores escenarios basados en mitigación.

5.2.7.2. Escenario con perturbación de cambio climático (Reference)

Este escenario incorpora los efectos estimados del cambio climático futuro, al escenario BAU previo, incluyendo cambios en la precipitación, la temperatura media y la evapotranspiración para cada subcuenca.



Las proyecciones a corto plazo (2014-2030) y a mediano plazo (2031-2050) de precipitación y temperatura media se tomaron del escenario SSP3 RCP7 para México, según lo informado por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2023). La el método estandarizado de Penman-Monteith.

Tabla 12 presenta los valores de precipitación y evapotranspiración para cada subcuenca. La evapotranspiración de cada subcuenca se estimó con las proyecciones de temperatura y se aplicó el método estandarizado de Penman-Monteith.

Tabla 12. Proyecciones de variables climáticas en escenario de Referencia SSP3-RCP7

Parámetro	2014-2030	2031-2050
Precipitación (%)	0.4	-1.5
Temperatura (°C)	0.7	1.4
Evapotranspiración (%)**	0.073	0.146

*IPCC, 2023. **Estimación considerando las proyecciones de temperatura propuestas por el IPCC

5.2.7.3. Escenarios con medidas de mitigación

Basándose en el escenario de referencia, las medidas de mitigación (M1-M12) incluyen la penetración gradual proyectada de acciones para la compensación de la demanda de agua en tres sectores durante el período de simulación (2013-2050). Por lo tanto, se consideran perturbaciones del escenario de referencia.

Sector agropecuario

- **Eficiencia de conducción de agua de riego (M1):** La perturbación consiste en la mejora del mantenimiento de los canales de riego, incluyendo el revestimiento gradual de los canales de tierra para reducir las pérdidas por infiltración (Sibale et al., 2025). La penetración supone una disminución anual del consumo de agua del -0.2% para el período 2014-2025 (dado que ya se ha producido) y del -1.31% para el período 2026-2050. Esta medida proyecta alcanzar 58% de eficiencia hídrica al finalizar el periodo de simulación.

- **Riego por aspersión (incremento en eficiencia de aplicación de riego) (M2):** La perturbación radica en la mejora de la eficiencia derivada de la sustitución del riego por gravedad por sistemas de aspersión, que pueden alcanzar hasta un 85% de ahorro en el consumo de agua (CONAGUA, 2025). La penetración se proyecta por etapas: -0.2 % anual en el periodo 2014-2025 (dado que ya



se ha implementado) y -2.48% para el periodo 2026-2050. Se estimó alcanzar 69% de eficiencia hídrica al finalizar el periodo de simulación. En este sentido, implementar las dos eficiencias, proporciona una eficiencia global de riego agrícola de 87%. Lo cual va en concordancia con eficiencias propuestas para sistemas de cuenca (Moges, 2020, citado por Sibale et al., 2025).

• **Sustitución del uso de aguas subterráneas por aguas superficiales (M3):** La perturbación se centra en el riego con aguas superficiales de ríos o cuerpos de agua para mitigar la alta demanda de aguas subterráneas. La penetración fue diferente en cada subcuenca debido a la variabilidad del caudal, considerando el porcentaje de sustitución en los años 2026, 2030, 2040 y 2050, con los siguientes porcentajes: Metepec y Tulantepec (2%, 4%, 10%, 15%), Barranca (2%, 4%, 4% y 5%), Acatlán (2%, 4%, 5% y 6%) y Napateco (2% en el 2026 y posteriormente 4%), en Cuautepec no se implementó la sustitución, debido a que las extracciones son casi en su totalidad de uso superficial.

• **Mitigación combinada de la demanda agrícola (M4):** Integra M1, M2 y M3. La suma de los tres efectos se basa en lograr una eficiencia global de riego agrícola en 87% e implementar la sustitución de agua subterránea por superficial para el uso agrícola. Esta medida logrará promover la sustentabilidad hídrica a largo plazo.

Sector urbano

Eficiencia física (M5): La perturbación consiste en la reducción de la demanda de agua mediante la reparación de fugas en los sistemas urbanos de distribución de agua potable (las zonas urbanas tenían una eficiencia física del 50% en 2013). La penetración comienza en un 2% en 2020 porque se considera ya se han hecho obras de mantenimiento y reparación de la red, con un aumento anual de la eficiencia del 0.3%, alcanzando el 75% en 2050 (Ríos-Sánchez et al., 2024).

Reutilización de aguas grises en el hogar (M6): La perturbación incluye la reutilización de aguas grises para uso no potable en inodoros, riego de jardines y limpieza. Las proyecciones de penetración muestran una tasa de agotamiento anual del -0.4% desde 2026, con un ahorro de 10



L/día, alcanzando una eficiencia en el uso del agua del 65%, debido al ahorro de agua subterránea (Azabache et al., 2020).

- **Captación de agua de lluvia (M7):** La perturbación consiste en sustituir el agua subterránea por agua de lluvia. La penetración comienza en 2026 a una tasa de crecimiento anual del -0.4%, con el objetivo de reducir el consumo hasta en un -15% para 2050 (Ríos-Sánchez et al. 2024).
- **Mitigación combinada de la demanda urbana (M8):** Integración de M5, M6 y M7. La suma de las tres medidas de mitigación del sector urbano estima alcanzar una eficiencia hídrica mayor al 75% al finalizar el periodo de simulación.

Sector industrial

- **Humedales artificiales para la reutilización de aguas residuales y la infiltración en acuíferos (M9):** La perturbación considera la reutilización de las aguas residuales tratadas por estos sistemas, que purifican y decoloran eficazmente las aguas residuales industriales en más del 90% (Wang et al., 2024). La penetración comienza en 2035, con una reducción del 40% en el uso de aguas superficiales debido a la reutilización, y una fracción del agua de los humedales se infiltrará en el acuífero.
- **Planta de tratamiento para la reutilización de aguas residuales (M10):** Se estima que la perturbación permitirá ahorrar agua superficial en la industria textil mediante el uso de aguas residuales tratadas. Azanaw et al. (2022) reportaron una posible sustitución del 50% en la industria textil. Se considera que la penetración total del sistema se alcanzará en 2035, cuando las plantas de tratamiento podrían comenzar con una sustitución conservadora del 30%.
- **Reducción de la demanda (M11):** La perturbación consiste en disminuir la demanda de agua subterránea para fines industriales. La penetración comienza con una reducción del 12.5% en 2026, un 25% en 2030, un 37.5% en 2040 y un 50% en 2050.
- **Mitigación combinada de la demanda industrial (M12).** Integración de M9, M10 y M11. Se determinó que la implementación de una planta de tratamiento no cuenta con la capacidad de



eliminar en 100% los colorantes y contaminantes complejos, por ello los humedales artificiales y la reducción de la demanda de agua subterránea, son una solución complementaria sustentable para los recursos hídricos en el valle de Tulancingo.

5.3. Indicadores de estrés hídrico

5.3.1. Índice de Falkenmark

El índice Falkenmark se utiliza para medir el estrés hídrico en una región o país (Falkenmark et al., 1989). Es una herramienta útil para comprender la escasez de agua teniendo en cuenta la población (ver clasificación en la Tabla 13). Requiere el número de personas que habitan en una región y el volumen de agua azul, como se detalla en la ecuación (7). Si el resultado está por debajo de 1,700 m³/habitante/año ya existe estrés hídrico o escasez de agua.

$$\text{Falkenmark} = \frac{\text{Recursos hídricos renovables totales (m}^3\text{/año)}}{\text{Población (habitantes)}} \quad (7)$$

En donde los recursos hídricos renovables totales corresponden al volumen de las aguas subterráneas y superficiales consideradas como “agua azul” y la humedad almacenada en el suelo “agua verde” y la población corresponde al total de habitantes de la zona de estudio.

Tabla 13. Clasificación del Índice de Falkenmark

Índice (m ³ /persona)	Categoría o Condición
> 1700	Sin estrés
1000-1700	Estrés hídrico
500-1000	Escasez de agua
<500	Escasez aguda de agua

El índice muestra la relación entre la huella hídrica de una región y sus recursos hídricos renovables totales.



5.3.2. Nivel de estrés hídrico mediante el Indicador 6.4.2. de los ODS

El Índice de nivel de estrés hídrico es un indicador oficial del objetivo de desarrollo sostenible 6 (ODS6), que busca garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible para todos. Este índice mide el estrés en que están los recursos de agua dulce de un país o región, comparando cuánta agua se extrae con cuánta agua renovable hay disponible. Específicamente, corresponde al indicador 6.4.2 del ODS6. Se calcula mediante la Ecuación (8) propuesta por la FAO (2019).

$$\text{Estrés hídrico (\%)} = \frac{\text{TFWW}}{(\text{TRWR} - \text{EFR})} \times 100 \quad (8)$$

En donde TFWW corresponde al total de agua dulce extraída, proporcionando el año al que hace referencia, TRWR son los recursos renovables totales de agua dulce y EFR son los requisitos de caudales ambientales. El resultado se expresa en porcentaje, cuanto mayor es el porcentaje, mayor es el nivel de estrés hídrico del país o región. Según el Sistema de las Naciones Unidas, por encima del 25% de estrés hídrico, se han identificado cuatro clases que indican diferentes niveles de gravedad del estrés (Tabla 14).

Tabla 14. Clasificación de estrés hídrico según Indicador 6.4.2. de los ODS

Valor	Categoría o condición
< 25%	Sin estrés
25% - 50%	Estrés bajo
50% - 75%	Estrés medio
75% - 100%	Estrés alto
>100%	Estrés crítico

5.3.3. Indicador WaSSI (Índice de estrés de suministro de agua)

El índice WaSSI propuesto por Sun et al. (2008) indica si existe una limitante en el suministro real de agua aportado a una cuenca hidrográfica. Se calcula mediante la ecuación (9).

$$\text{WaSSI} = \frac{WD}{SW + GW} \quad (9)$$



Donde WD es la demanda de agua correspondiente a las extracciones de agua de diferentes fuentes, SW es el suministro de agua superficial y GW es el suministro de agua subterránea.

Si el área a evaluar obtiene un valor mayor a 0.5, se considerará esta cuenta con un nivel de estrés en el suministro aportado (Tabla 15).

Tabla 15. Clasificación de estrés hídrico según Indicador WaSSI

Nivel de estrés	Categoría o Condición
< 0.50	Sin estrés
0.5 – 1.0	Estrés medio
> 1.0	Estrés alto

5.3.4. Indicador SWaSSI (Índice de estrés hídrico sectorial agrícola)

Este indicador prioriza el uso del agua superficial de forma sectorizada. En este estudio se empleará para conocer si existe estrés en el suministro de agua del sector agrícola en el valle de Tulancingo. Se calcula mediante la Ecuación (10) propuesta por Borrok et al. (2018).

$$SWaSSI = \frac{WW_{iSW} + WW_{iGW}}{WS_{iSW} + WS_{iGW}} \quad (10)$$

Donde WW_{iSW} son las extracciones totales de agua superficial, WW_{iGW} corresponde a las extracciones totales de agua subterránea, WS_{iSW} es la demanda superficial de agua para el sector agrícola, y WS_{iGW} es la demanda de agua subterránea para el sector agrícola.

5.4. Indicadores de sustentabilidad para el Nexo agua-alimentos

5.4.1. Indicador consumo de agua

Es la cantidad total de consumo de agua de cada cultivo por hectárea (m^3/ha), propuesto por Pourfallah et al. (2025). Mediante el programa WEAP se obtuvieron los valores del consumo de agua de los siete cultivos representativos del valle de Tulancingo.



5.4.2. Indicador productividad del agua

Es el rendimiento de cada cultivo expresado en kg/ha y el consumo de agua m³/ha. Se calcula mediante la Ecuación (11) propuesta por (Sadeghi, Sharifi Moghadam, Delavar, & Zarghami, 2020; Sharifi Moghadam, Sadeghi, Zarghami, & Delavar, 2023).

$$W_p = \frac{Y_m}{W_c} \quad (11)$$

Donde W_p es la productividad del agua, Y_m es el rendimiento del producto expresado en kg/ha, W_c es la cantidad total de consumo de agua de cada cultivo (m³/ha).

5.4.3. Indicador productividad económica del agua agrícola

Este indicador brinda la oportunidad de minimizar el uso del agua para la producción de cultivos a través de la gestión de los recursos. Esto a través de la detección de los cultivos que tienen más beneficios económicos por metro cúbico de agua asignada. Se calcula mediante la Ecuación (12) propuesta por Sadeghi et al. (2020); Sharifi Moghadam et al. (2023).

$$WEV = \frac{N_c - C_c}{W_c} \quad (12)$$

Donde WEV es la productividad económica del agua agrícola (pesos/m³), N_c es el valor de la producción (pesos/ha), C_c es el costo de los insumos utilizados para cada cultivo (pesos/ha) y W_c es la cantidad total de consumo de agua de cada cultivo (m³/ha).

5.4.4. Indicador disponibilidad de alimentos

Este indicador señala la cantidad de alimentos disponibles en un área. Si el valor es cercano a 1, significa que la disponibilidad de dicho cultivo es satisfactoria. Se calcula mediante la Ecuación (13) propuesta por Mondal et al. (2023).

$$DA \equiv \frac{P_c}{R_d \times Pop} \quad (13)$$

Donde P_c es la producción del cultivo (kg), R_d es el requerimiento dietético de cada cultivo (kg/año), Pop es la población en cada subcuenca (personas).



5.4.5. Índice Nexo agua-alimentos

Se definieron los indicadores que integrarían el Índice del Nexo agua-alimentos mediante una evaluación bibliométrica de los indicadores empleados para evaluar el nexo entre los recursos a evaluar. La finalidad de este índice es poder llevar a cabo una gestión integral de los recursos.

Todas las variables se normalizaron para obtener datos unificados debido a la variabilidad de las unidades. Los indicadores consumo de agua, productividad del agua, productividad económica del agua agrícola y disponibilidad de alimentos se normalizaron y ponderaron utilizando el método de Jerarquía analítica y Matriz de Saaty. Mediante la matriz se determinó la intensidad de la importancia de cada indicador (Tabla 16) y el peso (Tabla 17).

Tabla 16. Intensidad de importancia de los indicadores del Índice del Nexo agua-alimentos

Intensidad de importancia	Valor
Igual importancia	1
Importancia moderada	3
Esencial o de gran importancia	5
Importancia demostrada	7
Importancia absoluta	9

Tabla 17. Matriz de Saaty para el Índice Nexo agua-alimentos

	Consumo de agua	Productividad del agua	Productividad económica del agua	Disponibilidad de alimentos
Consumo de agua	1.00	7.00	7.00	5.00
Productividad del agua	0.14	1.00	3.00	5.00
Productividad económica del agua	0.14	0.33	1.00	0.20
Disponibilidad de alimentos	0.20	0.20	5.00	1.00

Posteriormente se normalizaron los valores (Tabla 18) y con ello se obtuvo el Índice del Nexo agua-alimentos.



Tabla 18. Normalización y ponderación de Matriz de Saaty para el Índice Nexo agua-alimentos

	Matriz Normalizada (Representatividad por criterio)				Ponderación (Peso por criterio)
	Consumo de agua	Productividad del agua	Productividad económica del agua	Disponibilidad de alimentos	
Consumo de agua	0.67	0.82	0.44	0.45	0.59
Productividad del agua	0.10	0.12	0.19	0.45	0.21
Productividad económica del agua	0.10	0.04	0.06	0.02	0.05
Disponibilidad de alimentos	0.13	0.02	0.31	0.09	0.14
	0.67	0.82	0.44	0.45	0.59

5.4.6. Indicadores para el bienestar humano y ecológico: Nexo agua-alimentos

Se realizó un análisis bibliométrico de documentos científicos que incluyeran indicadores de sustentabilidad con un enfoque de Nexo agua-alimentos. La recopilación teórica se realizó durante el mes de septiembre de 2023 en las bases de datos Scopus, Google Scholar y Web of Science, considerando el conocimiento científico nacional e internacional que se generó en el periodo 2018-2023, restringiendo la búsqueda a documentos en idioma inglés y español.

Los términos de búsqueda fueron “nexus” AND “water” AND “food” AND “sustainability” AND “indicators”. Estos términos aparecieron en el título, resumen, y palabras clave de los documentos, obteniéndose 3769 trabajos de investigación.

Se llevó a cabo una revisión sistemática de los documentos siguiendo el diagrama de flujo Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA, 2023). El diagrama se detalla en la Figura 27.

Una vez revisados los documentos, se crearon dos categorías de indicadores basadas en el Barómetro de la sustentabilidad (Prescott-Allen, 1997, citado en Rodríguez Cote, 2021).



Esta clasificación tuvo como finalidad evaluar la interacción existente entre el entorno ecológico y el humano, considerándose en este último todos los aspectos sociales y económicos que se deben discutir para definir un nivel de sustentabilidad. En este sentido, se incluyeron en la revisión sistemática 43 artículos.

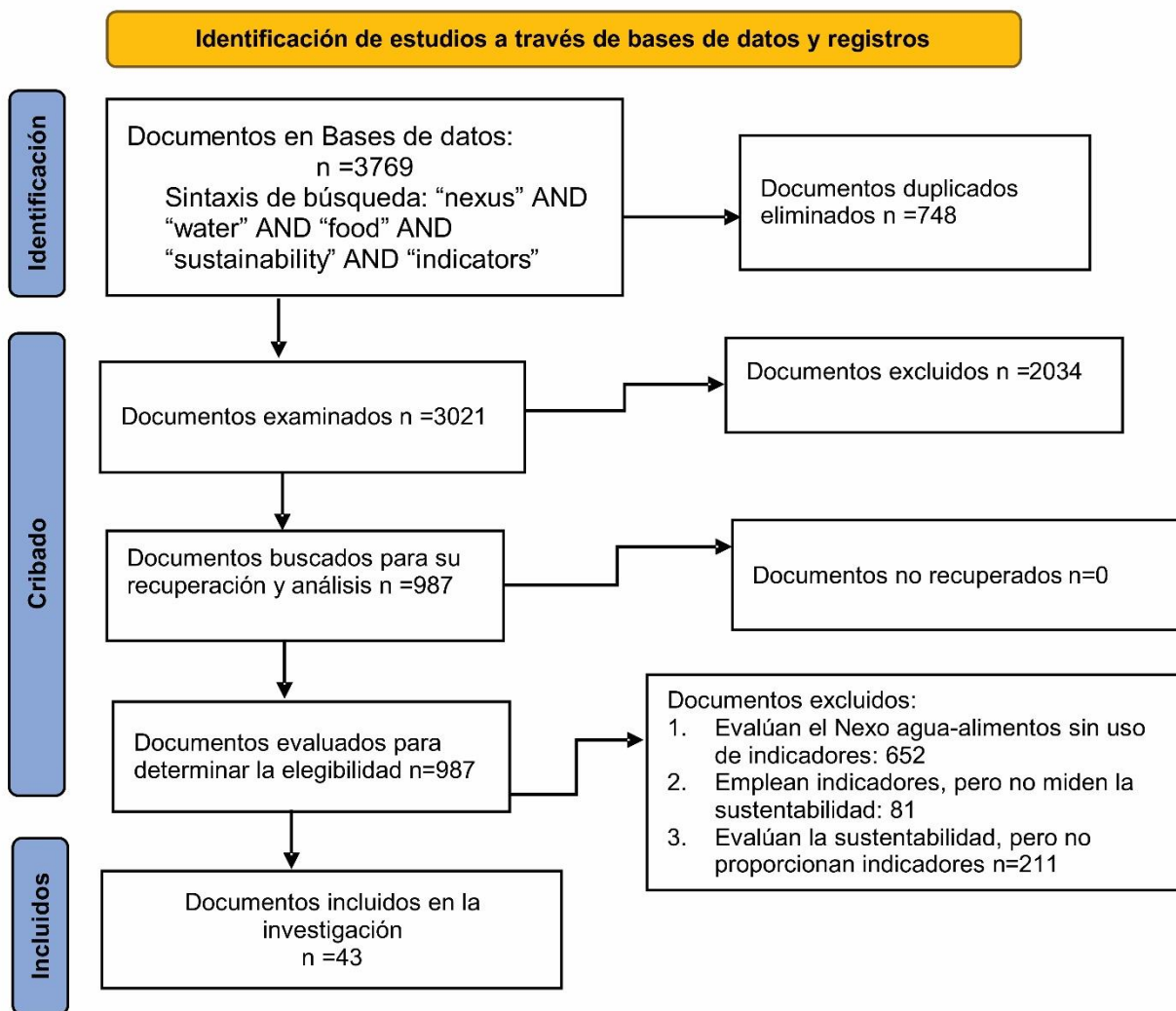
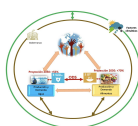


Figura 27. Diagrama PRISMA para indicadores de sustentabilidad del Nexo agua-alimentos

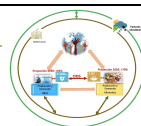
Fuente: elaboración propia a partir de la revisión de documentos examinados en Scopus, Google Scholar y Web of Science.



Se analizaron los 43 documentos científicos y se seleccionaron nueve indicadores que cumplieron con los criterios de selección: 1) incluyen indicadores de sustentabilidad; 2) evalúan el Nexo agua-alimentos u otra variante del Nexo; 3) abordan el tema del Nexo y su relación con los ODS (**Tabla 19**).

Tabla 19. Indicadores regionales para determinar la sustentabilidad del Nexo agua-alimentos

	Indicador	Fórmula para cálculo	Descripción y Referencia
Bienestar ecológico	Huella hídrica total (HHTot) Unidad: m ³ /t	$HHTot = HH_{proc, verde} + HH_{proc, azul} + HH_{proc, gris}$ HH _{proc, verde} = Componente verde del uso de agua del cultivo (m ³ /t). HH _{proc, azul} = Componente azul del uso de agua del cultivo (m ³ /t). HH _{proc, gris} = Componente gris del uso de agua del cultivo (m ³ /t).	Suma de las huellas hídricas e insumos utilizados en la producción de cultivos (Hoekstra <i>et al.</i> , 2011).
	Huella territorial (LF) Unidad: t/ha ⁻¹	$LF = \frac{Y}{Pt}$ Y= Rendimiento de los cultivos Pt= Población total	Demanda de tierra necesaria para producción de alimentos, materiales, energía e infraestructura (Vanham <i>et al.</i> , 2019; Armengot <i>et al.</i> , 2021).
	Huella de carbono Unidad: CO ₂ eq	$HC = Da \times Fe$ Da= Nivel de la actividad generadora de las emisiones de GEI Fe= Cantidad de gases GEI emitidos por cada tipo de actividad	Mide la emisión de gases de efecto invernadero (CO ₂ , CH ₂ y N ₂ O) a la atmósfera y producto del cambio de uso de suelo. (Hatjiathanassiadou <i>et al.</i> , 2023).
	Entorno ecológico Unidad: Proporción de superficies (%)	Límites planetarios globales y ODS: Proporción de tierras de cultivo: ≤15% Cobertura forestal: ≥ 24% Cobertura con pastizales: 60% Zona de humedales: 0.553 millones de km ² Espacio urbano: 4.62% o 116 mil km ²	Cuantifica la superficie de tierras agrícolas devueltas a bosques o degradadas, basándose en los límites planetarios globales y los ODS 2030 (Tan <i>et al.</i> , 2022).



	Indicador	Fórmula para cálculo	Descripción y Referencia
Bienestar humano	Acceso a los alimentos Unidad: Proporción de habitantes (%)	No sustentable: >30% Moderadamente sustentable: 15-29 % Sustentable: 5-14% Altamente sustentable: <5%	Proporción de individuos que han experimentado un grado de inseguridad alimentaria durante el año de referencia (Nhamo <i>et al.</i> , 2020).
	Acceso al agua Unidad: Proporción de habitantes (%)	$Aa = \frac{Rh}{Pt} \times 100$ Rh= Recursos hídricos totales Pt= población total	Porcentaje de población que habitan una vivienda particular y disponen de agua potable de la red pública (Jemmali <i>et al.</i> , 2021).
	Producción sustentable (rendimiento de cultivos) Unidad: Kg/ha	No sustentable= > 500 Moderadamente sustentable= 501-2000 Sustentable= 2001-4000 Altamente sustentable= >4000	Cantidad de producción agrícola sustentable por unidad de superficie (Nhamo <i>et al.</i> , 2020).
	Acceso a saneamiento de agua (Sa) Unidad: Proporción de habitantes (%)	$Sa = \frac{Mpo}{Pt} \times 100$ Mpo= Municipios que cuentan con saneamiento de aguas residuales Pt= población total	Porcentaje de población que cuenta con servicio de tratamiento de aguas residuales (Jemmali <i>et al.</i> , 2021).
	Disponibilidad de alimentos (D_{food}) Unidad: (kcal/persona)	$D_{food} = \frac{E_{req} - E_{consum}}{E_{req}} \times 100$ E _{req} = Energía dietética promedio requerida E _{consum} = Energía dietética promedio consumida	Promedio de energía dietética que requiere una persona para tener un estilo de vida saludable (Cansino-Loeza <i>et al.</i> , 2020).

Fuente: elaboración propia con base en información documental.

A su vez, se relacionaron los indicadores de sustentabilidad seleccionados, con los Objetivos de Desarrollo Sustentable, con la finalidad de verificar si se está avanzando hacia un acceso equitativo a los recursos, un desarrollo sustentable y la protección del medio ambiente (Arthur et al., 2019). Asimismo, relacionar los indicadores de sustentabilidad identificados en la revisión bibliográfica con los ODS brindó la oportunidad de generar una herramienta de análisis multidisciplinaria.



VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Situación agrícola y socioeconómica del valle de Tulancingo

Para el año base de análisis 2013, se reportó que la superficie sembrada fue de 75,787 hectáreas, obteniéndose para ese mismo año un volumen de producción de 637,958 toneladas, lo que representó un valor total de la producción de \$929,845,000 (SIAP, 2014). Asimismo, se obtuvo un volumen de producción forestal de 63,140m³ rollo y aproximadamente 6,069 productores fueron beneficiados por el programa PROCAMPO, lo cual representó \$29,785,000 pesos aproximadamente (INEGI, 2019).

Los municipios que presentaron mayor producción agrícola fueron Tulancingo de Bravo con 230,479 toneladas entre los 13 cultivos que produce, seguido de Acatlán que obtuvo 155,497 toneladas, distribuidas en los 10 cultivos que desarrolla, como se detalla en la Figura 28.



Figura 28. Producción municipal total agrícola del valle de Tulancingo (2013)

El cultivo más extenso en agricultura de temporal es maíz grano en cinco subcuencas del valle, destinando más del 50% de la superficie agrícola en dicho cultivo. En la subcuenca



Tulantepec predomina la producción de cebada en grano, debido a que las condiciones agroclimáticas de esta subcuenca se consideran más óptimas para el adecuado desarrollo del cultivo. Los porcentajes de extensión territorial de cada uno de los cultivos del valle, se expresan en la Tabla 20.

Tabla 20. Porcentaje de superficie agrícola de temporal: subcuencas del Valle de Tulancingo (2013)

Cultivo	Napateco	Metepec	Tulantepec	Barranca	Acatlán	Cuautepec
Avena forrajera	16.17	7.35	9.68	5.49	10.88	8.46
Cebada grano	3.68	20.62	46.74	22.91	16.75	39.60
Maíz grano	79.61	69.93	42.68	69.88	71.82	45.30
Frutales*	0.00	0.89	0.28	0.47	0.01	1.17
Maguey pulquero	0.00	0.04	0.08	0.04	0.03	0.04
Otros**	0.54	1.18	0.54	1.22	0.51	5.42

*Tuna, ciruela, durazno, manzana, **trigo, frijol, chícharo. Fuente: elaboración propia, con base en datos de SIAP, 2014.

Respecto a los cultivos bajo el sistema de riego, destaca el porcentaje de hectáreas destinadas para la producción de maíz grano en las subcuencas Metepec, Acatlán, Barranca y Metepec. Seguido de pastos y praderas, específicamente la variedad *Rye grass* en las subcuencas Napateco y Tulantepec, con más del 40% de hectáreas agrícolas consideradas para dicho cultivo (Tabla 21).

Tabla 21. Porcentaje de superficie agrícola de riego: subcuencas del Valle de Tulancingo (2013)

Cultivo	Napateco	Metepec	Tulantepec	Barranca	Acatlán	Cuautepec
Alfalfa	16.75	3.34	15.89	7.76	4.68	11.25
Avena	7.53	6.98	7.42	5.55	7.62	9.33
Maíz forrajero	8.41	12.80	9.41	13.34	5.23	8.10
Maíz grano	16.36	50.78	17.58	42.00	50.56	36.11
Pastos y praderas	48.49	23.78	47.66	29.08	31.39	33.67
Tomate rojo	0.08	0.82	0.06	0.45	0.09	0.31
Otros*	2.37	1.49	1.98	1.81	0.44	1.24

* Tomate verde, frijol, hortalizas. Fuente: elaboración propia, con base en datos de SIAP, 2014.



El sector ganadero se caracterizó por contar con 1,500 unidades pecuarias. Se producen siete productos pecuarios: ganado en pie, carne, leche, huevo, cera, miel y lana. Un volumen de producción de ganado en pie de 31,731 toneladas; un volumen de producción de leche de 78,960,000 litros y un valor de producción de \$1,620,779,000 (INEGI, 2019).

Los municipios que presentaron mayor producción pecuaria fueron Acatlán con 12,224 toneladas entre sus siete productos pecuarios, destacando el ganado en pie y Tulancingo con 9,499 toneladas (Figura 29a). Respecto a la producción de leche, Acatlán obtuvo 23,512,000 litros; seguido del municipio de Tulancingo con 22,979,000 litros, como se detalla en la Figura 29b.

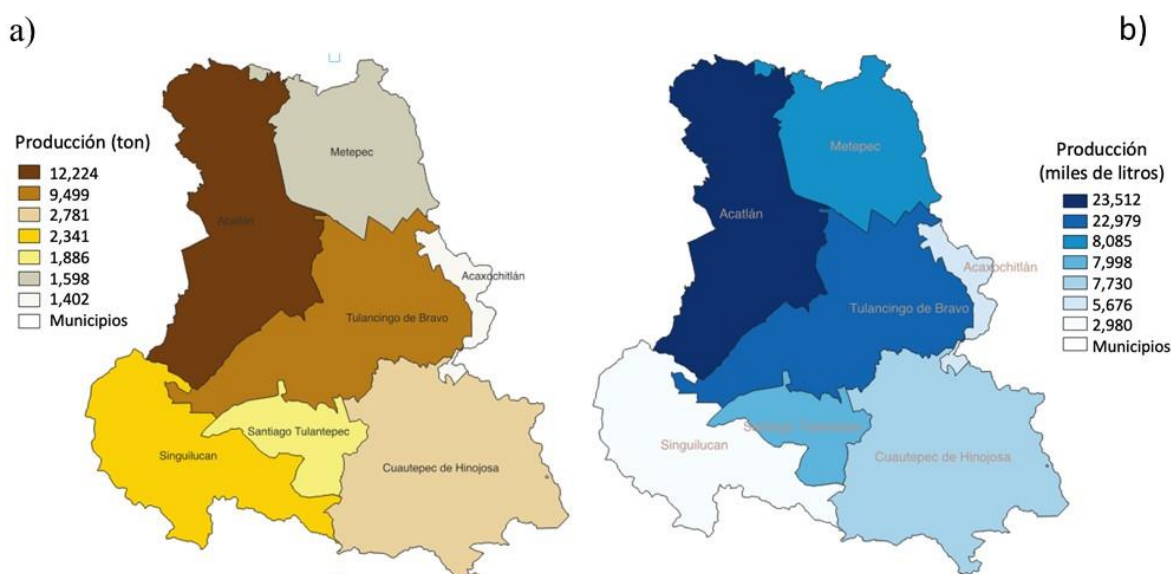


Figura 29. Producción municipal total pecuaria del valle de Tulancingo (2013)

a) producción de ganado en pie, b) producción de leche. Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP, 2014.

Respecto al sector industrial, existen 1,818 unidades económicas dedicadas a la industria alimenticia (INEGI, 2014), como son: tortillerías, panificación tradicional, producción de harinas y pastas, refresqueras y elaboración de bebidas destiladas. Todas estas industrias se concentran principalmente en los municipios de Tulancingo de Bravo, Santiago Tulantepec y Cuautepec de Hinojosa, como se geolocalizaron en la Figura 19a. A su vez se identificaron 75 empresas de producción de lácteos en el municipio de Acatlán (Gómez, 2010).



6.2. Evaluación integral del sistema hídrico mediante modelación

6.2.1. Demanda de agua subterránea y superficial. Año base 2013

En el valle de Tulancingo, la demanda de agua subterránea (81.8%) es significativamente superior a la de agua superficial. Además, del total de la demanda hídrica, el uso agropecuario representa el 91%, cifra notablemente alta en comparación con el promedio mundial (70%) reportado por el Banco Mundial (World Bank Group, 2022).

Se hace evidente la necesidad de implementar estrategias sostenibles que no sólo busquen disminuir la demanda del recurso subterráneo, sino que también optimicen la gestión del agua superficial disponible en el área. La Tabla 22 muestra los volúmenes de demanda de agua superficial y subterránea por sector para el año base.

Tabla 22. Área y demandas de agua subterránea y superficial por sector en cada subcuenca: (2013)

Subcuenca	Pop (10 ³)	Área (km ²)	Agua superficial (hm ³)*			Agua subterránea (hm ³)*		
			AgLi [§]	Urb [^]	Ind	AgLi	Urb	~Ind
	Pop ^{&}	AR [≠] + ZU ⁼						
Napateco	17.63	34 + 8.3	8.59	0.39	0.36	73.17	1.04	4.05
Metepec	12.16	17 + 1.4	8.63	0.10	0.36	26.80	0.48	0.12
Tulantepec	92.88	10 + 6.1	7.07	0.71	0.44	16.96	3.63	2.24
Barranca	10.60	34 + 0.2	10.10	0.07	0.79	64.66	0.82	NR
Acatlán	35.45	60 + 3.0	12.99	0.17	0.85	115.89	1.88	1.15 [#]
Cuautepec	73.27	22 + 13.2	14.49	0.68	4.80	3.96	3.46	1.20
Valle de Tulancingo	242.01	177 + 32.2	61.87	2.12	7.60	301.44	11.31	8.76
			Demanda total de agua superficial 71.59			Demanda total de agua subterránea 321.51		

*CONAGUA (2014), [&]Pop: población, [≠]AR: agricultura de riego, ⁼ZU: zonas urbanas, [§]AgLi: sector agrícola y pecuario, [^]Urb: sector urbano, [~]Ind: sector industrial, NR: no reportado. [#] Estimado de Cédulas de Operación Anual de Empresas municipales (COA). Nota: Las subcuencas han sido nombradas por el municipio predominante, pero esto no coincide con lo que se informó para la división política municipal.



6.2.1.1. Demanda de agua superficial

La principal demanda de agua superficial se identificó en el sector agrícola y ganadero (86.4%), que representa aproximadamente el 70.5% del territorio (Tabla 22).

La subcuenca Cuauhtepc destaca por representar el 20.24% del total de la superficie y posee las mayores concesiones de agua superficial (19.97 hm³) de todos los sectores, debido a su disponibilidad, sustentada por la presencia de dos ríos principales y cuerpos de agua que permiten la construcción de canales de riego (véase la Figura 15). Estos factores facilitan las actividades agrícolas y ganaderas que dependen principalmente del agua superficial. La subcuenca Acatlán concentra el 18.14% del uso agrícola de agua superficial, debido a que la escorrentía de la sierra de Huasca se utiliza principalmente para la agricultura y la ganadería. No obstante, es necesario mejorar el riego agrícola superficial.

El sector urbano representa sólo el 3% del total de agua superficial disponible, utilizada principalmente para servicios urbanos (riego de áreas verdes y deportivas, limpieza de calles y mantenimiento de infraestructura) y fines recreativos (lagos artificiales y cuerpos de agua para el ocio). Este bajo porcentaje se debe a la reducida área urbana en el valle de Tulancingo (2.7% del área total, principalmente en las subcuencas Tulantepec y Cuauhtepc).

En el sector industrial, la demanda de agua superficial representó el 10.6% del total. La subcuenca Cuauhtepc presenta el valor más alto (6.7%), debido a la presencia de 139 industrias textiles (INEGI, 2014). Existen numerosas fábricas textiles pequeñas, pero dos son importantes y poseen concesiones que suman 8.1 hm³ (CONAGUA, 2014) para refrigeración, manufactura y servicios.

Estos resultados resaltan la necesidad de implementar acciones estratégicas para mejorar la gestión y el uso del agua superficial en los tres sectores. Las recomendaciones principales deben centrarse en el apoyo gubernamental para la construcción o mejora de la infraestructura de tratamiento de aguas residuales y la renovación de la infraestructura hídrica agrícola, incluyendo los canales de riego existentes y nuevos, para optimizar el uso del agua en el Distrito de Riego



DDR 028, que abarca 824 ha irrigadas principalmente con agua superficial (Torres, 2020), y disminuir las extracciones subterráneas para uso agropecuario.

Sin embargo, la ubicación de las fuentes de agua superficial y su calidad en las subcuencas septentrionales aguas abajo podría dificultar su uso; sin embargo, la sustitución de la demanda de agua subterránea para la agricultura podría mitigar este problema en cierta medida. Las aguas río abajo transportan descargas de aguas residuales municipales e industriales, por ello la calidad no cumple con los estándares de riego agrícola, ocasionando que sean mayores las extracciones de agua subterránea.

6.2.1.2. Demanda de agua subterránea

Existe una alta demanda de agua subterránea por parte del sector agrícola y ganadero, que representa el 93.8 % de la demanda total; la infiltración proveniente del retorno del riego cubre solo el 15%, lo cual es insuficiente para compensar la demanda del acuífero. El Distrito de Riego no proporciona el agua superficial suficiente para la producción agrícola, recurriendo casi exclusivamente a pozos de extracción.

Es necesario implementar estrategias sostenibles para reducir la demanda de agua subterránea y prevenir la sobreexplotación del acuífero, así como considerar la disponibilidad de agua superficial en la zona.

La mayor demanda de agua subterránea (36%) se registra en la subcuenca Acatlán, impulsada por la intensa actividad agrícola y ganadera. En contraste, Cuauhtepic presenta una dinámica hidrológica más favorable, con mínimas concesiones para la demanda de agua subterránea agrícola (1.2%), dado que el uso de los ríos locales permite una dependencia predominante del agua superficial.

En la zona urbana, las subcuencas Tulantepec y Cuauhtepic concentran el 63% del total de agua subterránea urbana, ya que ambas albergan al 69% de la población del valle y, por lo tanto, concentran la mayor cantidad de servicios y negocios, con concesiones registradas para uso urbano o de servicios (INEGI, 2014; CONAGUA, 2014).



La mayor demanda industrial de agua subterránea se registra en la subcuenca Napateco (46% del total), debido a las concesiones otorgadas a cinco industrias de textiles y de bebidas (CONAGUA, 2014; INEGI, 2014).

El valle consume agua superficial de baja calidad en los tres sectores y una gran proporción de agua subterránea para la agricultura y la ganadería. Como conclusión preliminar, se recomienda analizar las subcuencas por separado para identificar acciones que mejoren la gestión del agua superficial, reduzcan la presión sobre el acuífero y prevengan la sobreexplotación.

6.2.2. Balance hídrico en el valle de Tulancingo para el año base 2013

La Figura 30 muestra los componentes del balance hidrológico del valle de Tulancingo para el año base 2013. La precipitación es el único aporte, dado que los principales ríos nacen en el valle a partir de la escorrentía de las montañas del sur, en el municipio de Chignahuapan.

Se destaca la evapotranspiración como la principal salida del modelo, representando el 74% de la precipitación total que ingresa al valle, tal como se reporta en otros estudios de tierras predominantemente agrícolas, como el valle de Mezquital en el estado de Hidalgo, donde el 79.2% de la precipitación se atribuye a la evapotranspiración. Estos altos porcentajes indican que las áreas con uso agrícola (65.26% en el valle de Tulancingo) presentan una elevada evapotranspiración.



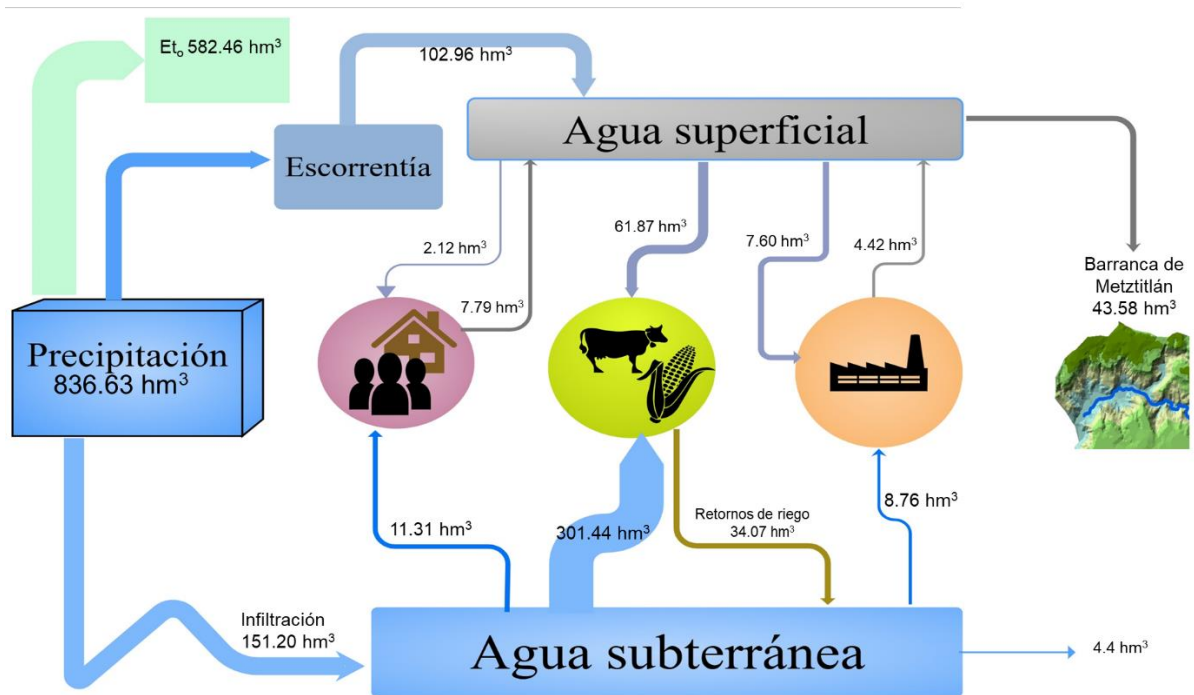


Figura 30. Diagrama de Sankey del balance hidrológico del valle de Tulancingo: 2013 (hm³/año)

Et.: evapotranspiración. Fuente: Elaboración propia.

6.2.3. Análisis de las subcuencas para el año base 2013

La figura 31 representa los esquemas de las seis subcuencas que componen el valle de Tulancingo. También se detallan los componentes del ciclo hidrológico y la extensión territorial de cada subcuenca.

La subcuenca Cuauhtepac destaca por los valores de parámetros más altos debido a que tiene la mayor superficie, 385 km². La escorrentía es menor que la infiltración en todas las subcuencas, debido a que el 65.26% de la superficie terrestre es plana y se dedica a uso agrícola, y el 25.15% es bosque, lo que promueve una mayor infiltración dentro del valle, mientras que solo el 2.72% es urbano.



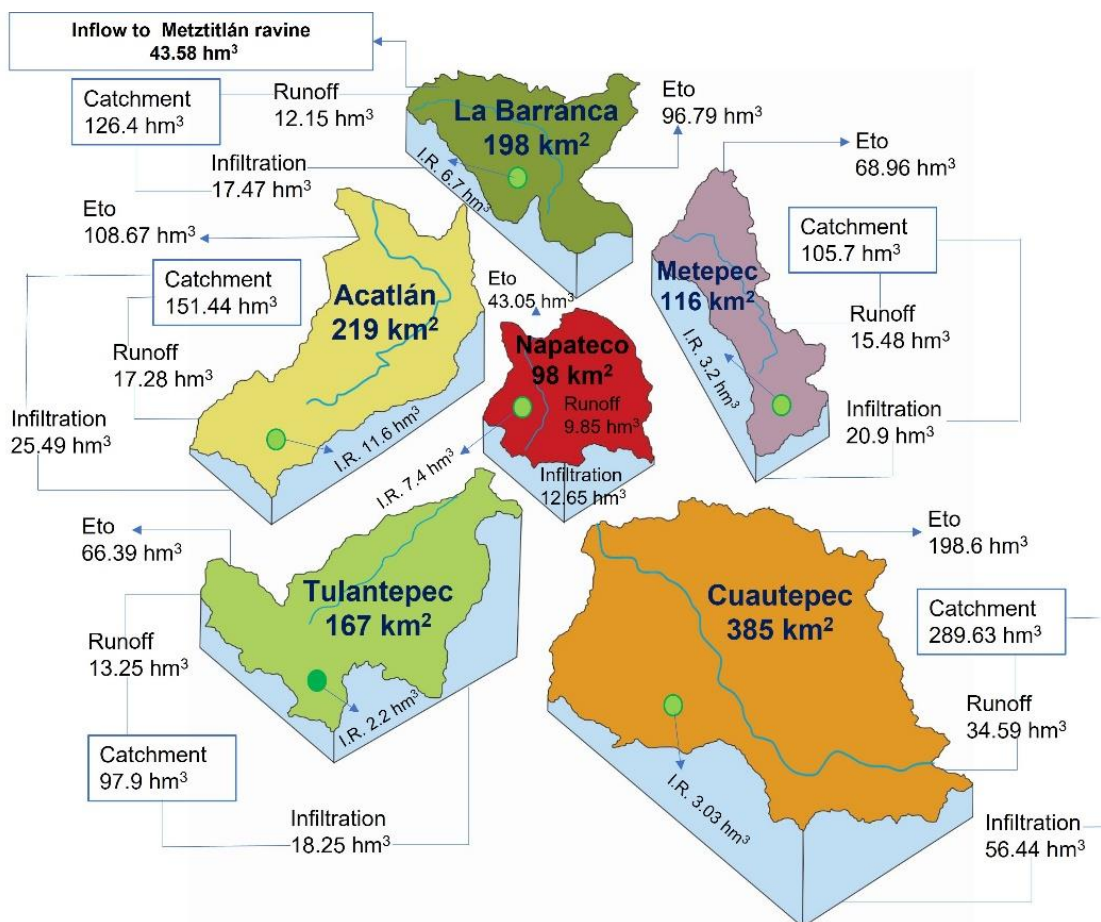


Figura 31. Balance hídrico por subcuenca del valle de Tulancingo (modelo matemático WEAP): Año base 2013

Et₀: evapotranspiración, I.R.: retornos de riego agrícola. Fuente: Elaboración propia con datos de WEAP.

6.2.4. Recarga del acuífero y resultados del Año base (2013)

La recarga del acuífero se produce principalmente por infiltración en las montañas que rodean el valle de Tulancingo, el retorno del agua de riego y a través de fallas geológicas (resumideros) ubicadas principalmente en las subcuencas de Cuautepec y Acatlán. La recarga natural fue de 254.16 hm³.

El balance del acuífero se determinó con la NOM-011-CONAGUA-2000, considerando la recarga total anual promedio (185.27 hm³/año), la descarga natural comprometida (49.4 hm³/año) y el volumen de extracción de agua subterránea (301.44 + 8.76 + 11.41 hm³/año). Esto indica una



sobreexplotación de -185.65 hm^3 . CONAGUA (2013) reportó un déficit en el acuífero ya en el año base (-20.9 hm^3), por ello el agua superficial subutilizada es, sin duda, valiosa.

La disponibilidad promedio de agua subterránea en el valle de Tulancingo fue de $1,050 \text{ m}^3$ per cápita al año, lo que indica estrés hídrico según el umbral establecido por Falkenmark et al. (1989), con una infiltración pluvial de 151.2 hm^3 distribuida entre los 242,014 habitantes del valle.

Debido a las diferencias entre las subcuencas, se realizaron cálculos de estrés hídrico individuales para cada una. La subcuenca de Tulantepec presenta escasez absoluta, con solo 339 m^3 per cápita al año, debido a su alta densidad de población ($556 \text{ habitantes/km}^2$) y los niveles de precipitación más bajos del valle ($97.9 \text{ hm}^3/\text{año}$).

Las subcuencas de Acatlán, Cuauhtepic y Napateco experimentan un estrés hídrico leve, con una disponibilidad per cápita estimada de 1200 m^3 al año. En contraste, las subcuencas de Barranca y Metepec no presentan estrés hídrico, ya que superan los 2500 m^3 per cápita por año debido a su baja población y extensas áreas boscosas.

6.2.5. Calibración y validación del modelo

Se calibró el modelo mediante la correlación lineal entre los volúmenes mensuales de salida de WEAP y los datos de volumen correspondientes de la estación hidrométrica 26807 para el río Grande Tulancingo. El coeficiente de correlación lineal de Pearson (R^2) para las aguas superficiales fue de 0.971 (véase Figura 32).

La Tabla 23 presenta las diferencias entre los valores mensuales calculados y reales utilizados para calcular el MAPFE, con una diferencia del 7.92 %, lo que respalda la validación del modelo. Diversos autores han descrito el mismo procedimiento en otros estudios de caso y han obtenido resultados similares a los de este estudio (Dias, Lazaro y Barros, 2023; Ríos-Sánchez et al., 2024; Dlamini et al., 2023; Chamizo-Checa et al., 2020; Calizaya et al., 2025).



Tabla 23. Error estándar medio del modelo matemático del valle de Tulancingo

Mes	Miles de m ³ real	Miles de m ³ WEAP	Error
Enero	292.55	265.51	9.2%
Febrero	190.43	205.39	7.9%
Marzo	288.06	283.04	1.7%
Abril	284.86	290.59	2.0%
Junio	1,760.40	1,732.22	1.6%
Julio	2,306.91	1,847.88	19.9%
Agosto	2,523.98	2,467.24	2.2%
Septiembre	8,957.78	10,234.88	14.3%
Octubre	2,781.04	2,806.03	0.9%
Noviembre	4,660.93	3,604.68	22.7%
Diciembre	946.94	991.57	4.7%

MAPE: 7.92%

Confiabilidad:92.08%

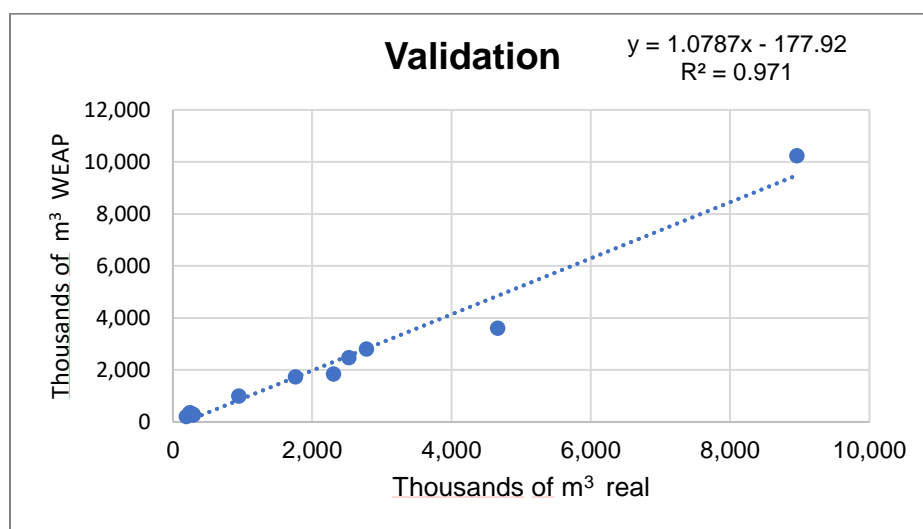


Figura 32. Validación del modelo matemático del valle de Tulancingo

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó con el cultivo de maíz, dada su amplia prevalencia en el valle. Las figuras 33a y 33b ilustran las variaciones observadas en los volúmenes de escorrentía e infiltración simulados con WEAP.



La Figura 33 muestra que prácticamente no existen diferencias entre los valores máximos y mínimos de enero a agosto, así como en octubre y diciembre, registrándose la mayor discrepancia en septiembre. En este mes, la diferencia en infiltración alcanza los 27.75 hm³, mientras que la escorrentía difiere en 19.09 hm³. En noviembre, las diferencias son menores: 8.39 hm³ para la infiltración y 5.98 hm³ para la escorrentía. Septiembre es el mes más lluvioso, lo que explica tanto la magnitud de estas diferencias como la mayor sensibilidad a los valores máximos y mínimos de Kc. En general, los resultados del análisis mejoran la confianza y la fiabilidad del modelo.

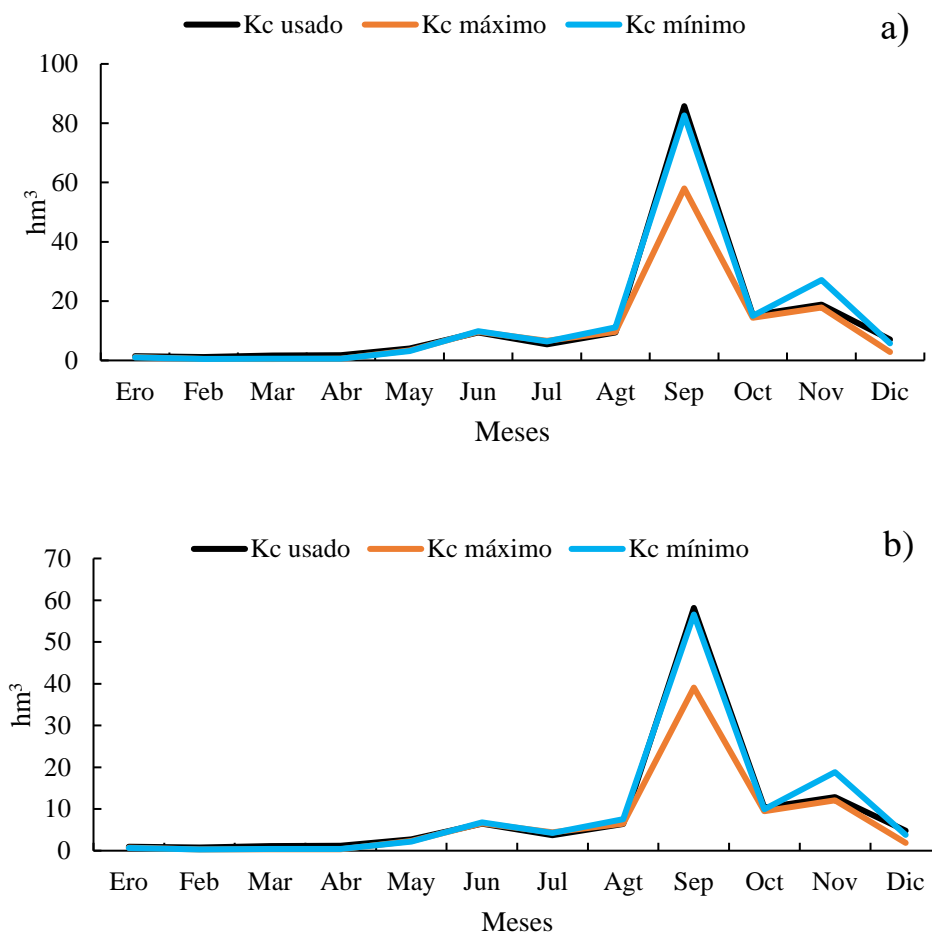


Figura 33. Análisis de sensibilidad del modelo
a) infiltración, b) escorrentía



6.2.6. Escenarios en condiciones transitorias

La Tabla 24 presenta los volúmenes de entrada y salida calculados para 2030 y 2050 en todos los escenarios de transición para el valle de Tulancingo. Obsérvense los valores negativos de las salidas de agua subterránea, que indican la sobreexplotación agravada del acuífero de Tulancingo documentada en el año base (2013), impulsada principalmente por las actividades agrícolas y ganaderas. Este daño puede mitigarse con las acciones de mitigación simuladas en los escenarios M1 a M12.

6.2.6.1. Escenario crecimiento inercial (BAU)

Los volúmenes estimados de demanda de agua superficial y subterránea para cada sector se basan en las proyecciones de crecimiento demográfico, agrícola e industrial. La demanda en todos los sectores aumenta progresivamente a partir de 2030, en consonancia con los hallazgos de Dau y Adeloje (2021), quienes modelaron la demanda futura de agua utilizando WEAP e identificaron una tendencia ascendente similar.

Entre las subcuencas analizadas, Barranca presenta el mayor incremento en la demanda de agua subterránea, con una proyección de aumento del 60 % para 2050 con respecto a los niveles de 2013. Tulantepec muestra el crecimiento más significativo en la demanda de agua superficial, con un aumento del 37.5% durante el mismo período. Sectorialmente, la subcuenca de Metepec registra el mayor incremento porcentual en la demanda de agua subterránea para uso industrial, pasando de 0.12 hm³ en 2013 a 0.30 hm³ en 2050, impulsado por cuatro industrias textiles y tres mineras. En cuanto a las aguas superficiales, Barranca lidera con un aumento del 138%, pasando de 0.79 hm³ a 1.88 hm³, atribuido a cuatro operaciones mineras.

Sin embargo, cabe destacar que el valle dedica más del 50% de su superficie a actividades agropecuarias, uso que lo convierte en el principal extractor de agua. Se proyecta un incremento del 27% en la demanda de agua subterránea entre 2013 y 2050, con volúmenes que pasarán de 301.44 hm³ a 381.88 hm³ (Figura 34). Este patrón de consumo intensivo genera una preocupación crítica, que es el riesgo de sobreexplotación continua del acuífero. Según Arcega et al. (2015), este cuerpo de agua ya presentaba un déficit desde el año base, lo que subraya la insostenibilidad de



las extracciones proyectadas. Caso similar se reporta en el valle del Mezquital, donde se estima que para el año 2050 las demandas hídricas serán insatisfechas (Chamizo-Checa et al., 2020).

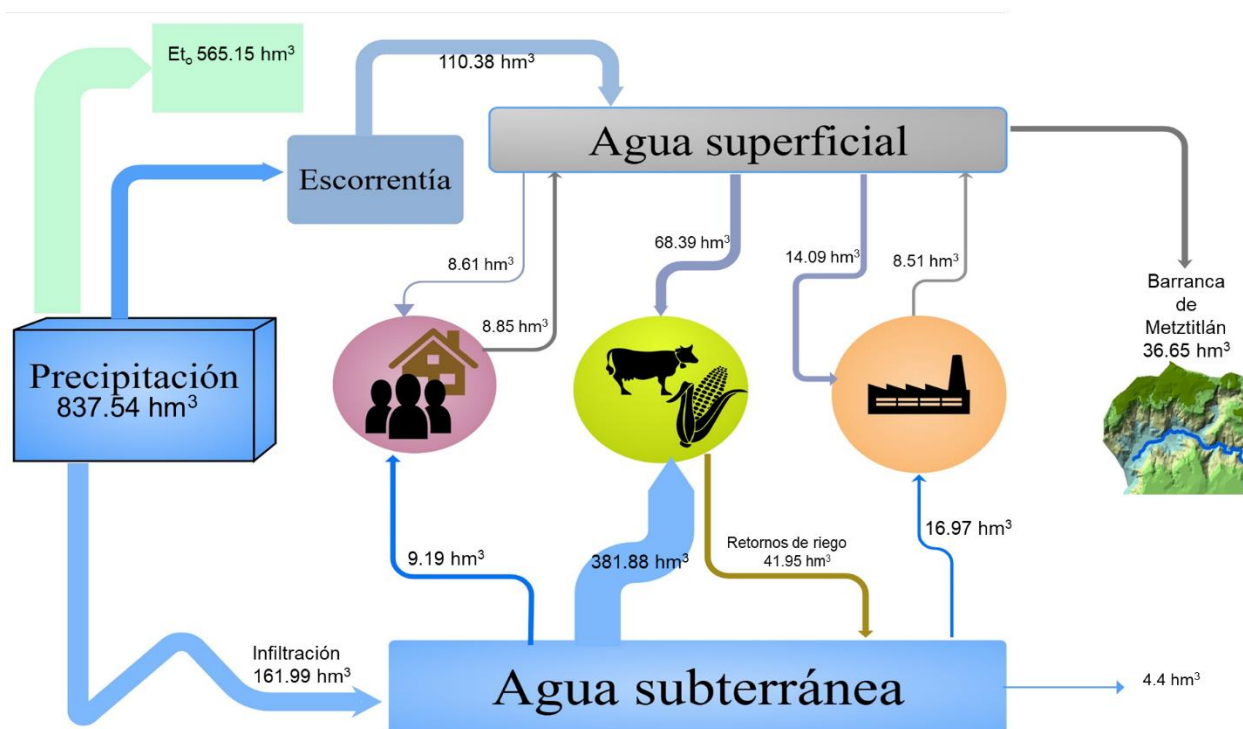


Figura 34. Diagrama de Sankey del balance hidrológico: escenario BAU 2050 (hm³/año)

6.2.6.2. Escenario de Perturbación del Cambio Climático (CC, Referencia)

Este escenario considera el crecimiento inercial de los tres sectores y se suman las perturbaciones ocasionadas por el cambio climático. En escenarios de altas emisiones (p. ej., RCP8.5), se proyecta que la precipitación continúe disminuyendo (aproximadamente un 2%) y que la temperatura aumente (1.4 °C), con cambios significativos en el valle.

El diagrama de Sankey (Figura 35) ilustra el balance hídrico del valle, mostrando reducciones en la precipitación de 269.76 hm³ y en la evapotranspiración de -154.09 hm³ con respecto al año base, a pesar del aumento de las temperaturas, lo que refleja la reducción prevista



de la precipitación. La escorrentía y la infiltración también disminuyen, con reducciones estimadas de 46.83 hm³ y 68.84 hm³, respectivamente.

Cabe destacar que, la demanda total de agua en el valle de Tulancingo mostró una disminución significativa en el año 2020, lo que coincide con el tercer año consecutivo de sequía en la región (Sánchez, 2025). Este evento resultó en una marcada insuficiencia de agua disponible, afectando principalmente al sector agropecuario y destacando la vulnerabilidad de las fuentes superficiales.

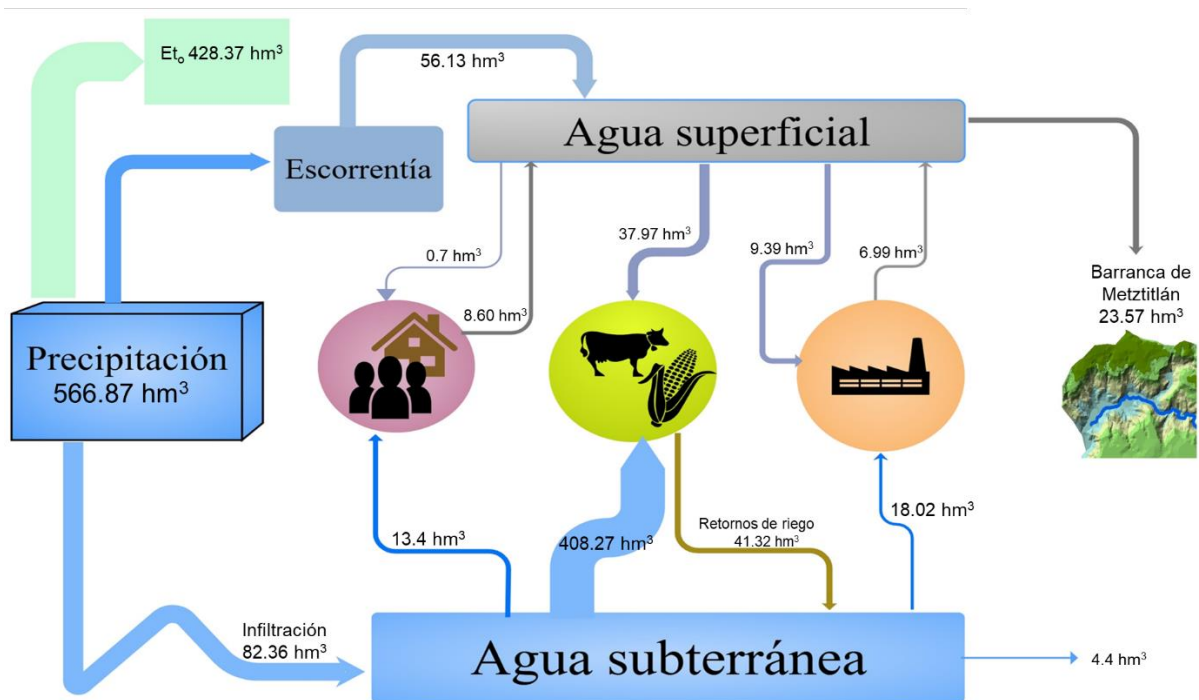


Figura 35. Diagrama de Sankey del balance hidrológico: escenario de Referencia 2050 (hm³/año)

Esta tendencia de disminución en la infiltración y escorrentía la reportan también Dlamini et al. (2023) con una reducción del 19% en el escenario de futuro cercano y del 15% en los escenarios de futuro mediano a lejano. Lo cual demuestra que existe una tendencia en la disminución de los caudales repercutiendo en una demanda insatisfecha a largo plazo y la afectación que conllevan diversas regiones al cambio climático (Calizaya et al., 2025; Moncada et al., 2020).



La combinación del crecimiento inercial con las perturbaciones del cambio climático muestra la misma demanda creciente de agua superficial y subterránea que BAU, pero la disponibilidad de agua superficial en todas las subcuencas disminuye, al igual que la recarga de acuíferos (Tabla 25), lo que exacerba la escasez de recursos en el valle.

En consecuencia, el déficit de recarga del acuífero de Tulancingo asciende a -20.04% , lo que supone un riesgo para la seguridad hídrica y alimentaria regional para 2050, y el acuífero alcanzaría una demanda de -365.12 hm^3 (Figura 35). Estos efectos observados concuerdan con los hallazgos de otras regiones, como el valle del Mezquital, donde las proyecciones muestran una reducción del 10% en la escorrentía y la infiltración para 2050.

La subcuenca de Acatlán, que representa el 30.5% de la producción agrícola total del valle, experimentaría un aumento del 21% en la demanda de agua subterránea y una disminución del 40% en la demanda de agua superficial.

Estudios similares reportan impactos comparables: reducciones promedio del caudal de los ríos del 28% bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5; aumento de la demanda de riego bajo múltiples escenarios RCP; y evidencia multimodelo de interacciones complejas entre las perturbaciones climáticas, el ciclo hidrológico y la producción agrícola.

Dias et al. (2023) reportan que el caudal promedio disminuye 28% al evaluar la disponibilidad de agua en escenarios de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5. Golfam y Ashofteh (2025a; 2025b) emplearon los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5 para evaluar los efectos del cambio climático en la demanda y uso del agua y la energía en el sector agropecuario al suroeste de Irán, comprobando que esta aumentaba considerando las proyecciones propuestas.

En ese mismo sentido, Silva et al. (2023) detectaron que al modelar con los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 la demanda de agua para riego aumentó en 36%. Ansari et al. (2023) al emplear el enfoque de multimodelado detectaron los efectos del cambio climático en la producción de arroz y las complejas interacciones que existen entre las perturbaciones climáticas, el ciclo hidrológico y la producción de cultivos.

Los resultados respaldan el desarrollo de estrategias para el uso eficiente del agua y la gestión integrada, especialmente ante la intensificación de la sobreexplotación de los acuíferos prevista bajo las condiciones meteorológicas adversas proyectadas.



Tabla 24. Volúmenes de entrada y salida para 2030 y 2050 en todos los escenarios de transición del valle de Tulancingo

Escenario	Descripción	Tipo de agua	2030		2050	
			In-Flow	Out-Flow	In-Flow	Out-Flow
Referencia (BAU+CC)	Incremento poblacional, agropecuario e industrial. Incremento de la temperatura y disminución de la precipitación.	S.W.	92.12	20.92	56.13	6.03
		G.W.	174.76	-254.34	123.68	-356.94
M1	Aumento de eficiencia en la conducción del riego.	S.W.	92.12	24.92	56.13	9.03
		G.W.	170.34	-206.34	111.07	-220.94
M2	Aumento de eficiencia en la aplicación del riego mediante riego por aspersión.	S.W.	92.12	25.92	56.13	10.03
		G.W.	168.1	-183.34	106.63	-173.94
M3	Sustitución de agua subterránea por agua superficial.	S.W.	92.12	5.63	56.13	-25.03
		G.W.	373.83	-235.86	327.1	-327.41
M4	Incremento de la eficiencia global de riego y sustitución de agua.	S.W.	92.12	27.52	56.13	12.68
		G.W.	320.11	-149.77	208.7	-131.78
M5	Incremento de eficiencia física urbana mediante reparación de fugas en el sistema de suministro.	S.W.	98.61	21.12	62.89	6.33
		G.W.	135.6	-251.64	82.72	-352.14
M6	Reúso de aguas grises en los hogares.	S.W.	98.61	20.92	62.89	6.13
		G.W.	135.6	-253.24	82.72	-354.44
M7	Cosecha de agua en las zonas urbanas.	S.W.	98.61	20.92	62.89	6.23
		G.W.	135.6	-253.84	82.72	-355.34
M8	Incremento de eficiencia física, reúso de aguas grises y cosecha de agua.	S.W.	98.61	21.22	62.89	6.43
		G.W.	135.6	-251.14	82.72	-351.34
M9	Implementación de humedales artificiales en el sector industrial.	S.W.	98.11	22.94	63.68	10.94
		G.W.	135.26	-254.34	82.36	-350.64
M10	Instalación de plantas de tratamiento simple en la industria textil.	S.W.	98.11	22.94	63.88	9.00
		G.W.	135.26	-254.34	82.36	-355.24
M11		S.W.	98.11	21.73	63.92	8.44



	Disminución de la demanda de agua subterránea para el sector industrial.	G.W	135.26	-251.18	82.36	-347.57
M12	Instalación de humedales artificiales, planta de tratamiento y disminución de la demanda subterránea.	S.W.	98.11	21.73	64.1	15.88
		G.W	135.26	-251.18	82.36	-341.3
M1-M12	Implementación de todas las medidas de mitigación propuestas. Incremento poblacional, agropecuario e industrial. Incremento de la temperatura y disminución de la precipitación.	S.W.	104.6	28.63	70.86	22.93
		G.W	320.11	-143.41	209.06	-110.54

S.W: Agua superficial, G.W: Agua subterránea, M1: Mejora de la eficiencia del sistema de conducción de agua para riego, M2: Riego por aspersión para el incremento en la eficiencia de aplicación, M3: Sustitución del uso de agua subterránea por agua superficial, M4: M1+M2+M3, M5: Eficiencia física urbana, M6: reutilización de aguas grises en el hogar, M7: Cosecha de agua, M8: M5+M6+M7, M9: Humedales artificiales, M10: Planta de tratamiento, M11: Disminución de la demanda, M12: M9+M10+M11.

6.2.6.3. Escenarios de mitigación agrícola, urbana e industrial

Se diseñaron doce escenarios de mitigación para mejorar la eficiencia en el uso del agua, cuatro para cada uno de los sectores estudiados. La Tabla 25 muestra los efectos de estas intervenciones en cada subcuenca y sector. Los escenarios de mitigación revelan reducciones significativas en la presión sobre el acuífero de Tulancingo. En comparación con la simulación del escenario de referencia en los tres sectores, la extracción total de agua subterránea disminuiría un 56.1% y el uso de agua superficial un 31.5% para el año 2050.

Sector agropecuario (M1-M4)

Mejora de la eficiencia del sistema de conducción de agua para riego (M1). Esta acción produciría una reducción estimada del 33.3% en la extracción de agua subterránea y del 7.9% en el uso de agua superficial en el valle de Tulancingo para el año 2050. La subcuenca Cuauhtepac destaca por una reducción del 60% en el uso de agua subterránea y del 30% en el de agua



superficial, debido a que alberga la principal red de canales de riego agrícola, que distribuye agua al sur del valle.

El revestimiento gradual de los canales genera un aumento significativo en la eficiencia y un mejor aprovechamiento de los recursos. Estudios previos reportaron resultados similares, con una reducción del 17% en el uso total de agua a través de mejoras en la infraestructura hidráulica durante el periodo de simulación, utilizando el modelo WEAP (Sibale et al., 2025).

Riego por aspersión para el incremento en la eficiencia de aplicación (M2). Esta acción mitigaría la demanda total de agua subterránea en el valle en un 44.9% y la de agua superficial en un 10.5%. Específicamente en la subcuenca Acatlán, de predominio agrícola, los sistemas de riego por aspersión reducirían el uso de agua subterránea en un 44.7% para 2050, lo que representa un ahorro absoluto de 63 hm³.

Además de ahorrar agua en el riego, los sistemas de riego por aspersión aumentan el rendimiento de los cultivos, lo que subraya su doble beneficio en términos de costos laborales y productividad, debido a que se reduce el estrés hídrico de los cultivos. (Araya-Portuguez and Fuentes-Quirós 2024; Sharifi et al., 2025; Morchid et al., 2025). La implementación combinada de M1 y M2 genera una eficiencia global de riego agrícola del 80%, en consonancia con las eficiencias propuestas para estudios basados en cuenca (Moges, 2020, citado por Sibale et al., 2025).

Alternativa similar proponen Chamizo-Checa et al. (2020) en el valle de Mezquital, estimando la reducción de la demanda de agua hasta en un 42% si se emplean sistemas de riego por goteo. Fuentes (2021) validan que la reducción del tiempo de riego y las láminas de agua aplicadas por hectárea incrementa la eficiencia en la producción de cebada (38%) y maíz (47%). Sharifi et al. (2025) demostraron que el uso de sistemas de riego eficientes no sólo disminuye el consumo de agua en 94%, sino que también incrementa el rendimiento de los cultivos en un 32.6%, lo que subraya el doble beneficio de estas medidas.



En este sentido mejorar la eficiencia en la aplicación de riego agrícola, ayuda a la toma de decisiones en el mejor momento para realizarlo y la cantidad de agua exacta que requiere el cultivo, optimizando la gestión del recurso hídrico (Morchid et al., 2025).

Sustitución del uso de agua subterránea por agua superficial (M3). La sustitución de agua subterránea por agua superficial produjo una reducción de 30 hm^3 (7.4%) en el uso de agua subterránea y un aumento del 81.6% en la demanda de agua superficial en todo el valle.

Aunque la subcuenca de Acatlán presenta el uso más extenso de agua subterránea, su potencial de reducción es bajo (7.1%) debido a que el caudal con el que se dispone es de aproximadamente 8.4 hm^3 . Esto limita sea mayor el porcentaje de sustitución de agua subterránea por superficial. Se estima que para que esta subcuenca lleve a cabo sus actividades agropecuarias en el año 2050, requerirá de 141 hm^3 considerando las perturbaciones de cambio climático y crecimiento gradual del sector. Lo anterior limita aún más la sustitución, pero no excluyen las posibilidades de su implementación.

Por otro lado, la subcuenca de Cuauhtepic ya cuenta con una red de riego basada en aguas superficiales. Por consiguiente, las acciones se simularon en las otras cuatro subcuencas. Esta acción reduciría la sobreexplotación del acuífero, pero requiere financiamiento.

Mitigación combinada de la demanda agrícola M4 (M1+M2+M3). Al integrar mejoras en la conducción para aumentar la eficiencia global del riego agrícola, y la sustitución de aguas superficiales, este escenario reduciría el uso de aguas subterráneas en un 55.1% y el de aguas superficiales en un 18.4% para 2050. El mayor ahorro de agua subterránea se debe concretar en Acatlán (55.3%), donde se implementarían canales revestidos y sistemas de aspersión. Además de los óptimos resultados en ahorro de agua, los costos laborales disminuyen gracias a la mayor eficiencia del riego y se reduce el estrés hídrico de los cultivos (Araya-Portuguez & Fuentes-Quirós, 2024).

Sector urbano

Eficiencia física (M5). El aumento de la eficiencia del sistema de distribución al 75% mediante la reparación de fugas redujo la demanda de agua subterránea en un 35.8% y la de agua superficial



en un 42.9%. Si bien los porcentajes son altos, los volúmenes absolutos son bajos debido a la escasa población del valle. La reparación gradual de fugas en las redes de distribución urbanas reduce notablemente la demanda con el tiempo (Ríos Sánchez et al., 2024). La gestión adecuada de los subprocesos de producción y distribución de agua urbana es fundamental para lograr la eficiencia en el uso de los recursos (Yin, Hsiao y See, 2024).

Reutilización de aguas grises en hogares (M6). La reutilización doméstica de aguas grises para fines no potables resultó en una reducción del 18.7% en el consumo total de agua subterránea y del 14.3% en la demanda de agua superficial. Tulantepec presenta el mayor ahorro de agua subterránea (21.4%) debido a su alta densidad de población, lo que permite una mayor reutilización de aguas grises.

Los sistemas domésticos de tratamiento y recirculación de aguas grises pueden ahorrar hasta 10 litros por hogar al día y eliminar cantidades sustanciales de sólidos disueltos totales (SDT), color, nitratos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), contribuyendo, a largo plazo, a una recarga menor de acuíferos mediante infiltración en las zonas verdes de los hogares (Azabache et al., 2020). A largo plazo se espera esta medida también contribuirá a la recarga del acuífero al ayudar con una pequeña porción de infiltración en las áreas verdes de los hogares.

Aprovechamiento del agua de lluvia (M7). Si bien las zonas urbanas son limitadas en el valle, la implementación proyectada del aprovechamiento del agua de lluvia para 2050 redujo la demanda de agua subterránea en un 11.9% y la de agua superficial en un 28.6%. Las técnicas de captación constituyen respuestas resilientes a la variabilidad de las precipitaciones, previniendo inundaciones, reduciendo el consumo de agua potable para el riego de jardines, minimizando la erosión y fomentando una gestión responsable del agua urbana (Morote y Hernández, 2017).

Adaptación urbana combinada M8 (M5+M6+M7). La combinación de reparación de fugas, reutilización de aguas grises domésticas y captación de agua de lluvia redujo la demanda total de agua subterránea en un 41.8% y la de agua superficial en un 42.9% para 2050. Cuautepec logró las mayores reducciones (41.8% en agua subterránea y 42.9% en agua superficial) debido a su mayor extensión territorial urbana y a que es la segunda subcuenca más poblada, lo que facilitó la



implementación de programas de reparación de fugas, reutilización de aguas grises y captación de agua de lluvia. El objetivo es alcanzar una eficiencia hídrica superior al 75% en el sector urbano para 2050.

Sector industrial

Humedales artificiales para la reutilización de aguas residuales y la infiltración en acuíferos (M9). La instalación de humedales artificiales para el ahorro de agua, la degradación de contaminantes orgánicos y la decoloración de hasta el 90% del agua (Wang et al., 2024) logró un ahorro del 30.9% en aguas superficiales y del 35.6% en aguas subterráneas para el año 2050. Estudios previos destacan que esta alternativa no sólo reduce la demanda de agua mediante la reutilización de aguas residuales, sino que también mejora la calidad del agua vertida a los cuerpos de agua, con tasas promedio de eliminación de DBO5 del 49.5%, lo que genera beneficios ambientales, económicos y sociales a largo plazo (Romero, 2021).

Planta de tratamiento para la reutilización de aguas residuales (M10). La industria textil es la mayor consumidora industrial de agua en el valle; por lo tanto, se propuso la instalación de una planta de tratamiento en cada subcuenca para aplicar técnicas de reciclaje o reutilización de aguas industriales en los procesos de teñido textil (Orts et al., 2019) y reducir el importante daño ambiental causado por esta industria (Monmeneu, 2025).

Esta acción puede reducir la demanda total de agua superficial en un 40.4% y la de agua subterránea en un 21.2% afirmándose que tratar 50 m³/día de aguas residuales textiles del proceso de blanqueo se puede lograr instalando una planta de tratamiento con tecnología de membranas de gas de barrido (Monmeneu, 2025). Sangaré et al. (2025) señalan que la instalación de sistemas de reutilización de aguas residuales puede reducir la contaminación del río hasta en un 86%, por lo que las industrias que adopten esta medida podrían reutilizar el agua para el riego de zonas verdes y, de este modo, aumentar la infiltración en el acuífero de Tulancingo.

Reducción de la demanda (M11). Se estima que la reducción gradual de la demanda de agua industrial permitirá ahorrar un 50.8% de agua subterránea y un 50% de agua superficial. Estudios previos han demostrado la reducción del consumo de agua en la industria textil mediante el uso de técnicas de teñido sin agua con dióxido de carbono o teñido por chorro (Ascencio Ramírez, Burgos



y López, 2020; Siemens, 2025). Utilizando la herramienta Proyección de Agua Industrial Sostenible (SWIP), Haque, Nahar y Sayem (2021) proponen que la industria textil puede reducir la extracción mensual de agua subterránea en un 9% y, según las proyecciones, conservar 156,763 m³ de agua subterránea.

Mitigación Combinada de la Demanda Industrial M12 (M9+M10+M11). La instalación de plantas de tratamiento simples son una de las claves para las reducciones significativas a corto plazo en la demanda de agua del valle. Sin embargo, las plantas de tratamiento por sí solas no eliminan todos los contaminantes orgánicos ni alcanzan los niveles de decoloración requeridos por la industria textil para la reutilización del agua de proceso; por lo tanto, se propusieron humedales artificiales como medida complementaria, junto con reducciones graduales en la demanda industrial de agua subterránea.

Estas acciones combinadas reducirían la demanda total en un 87.4% para el agua subterránea y en un 83.5% para el agua superficial para el año 2050. Dado que las plantas de tratamiento no pueden eliminar los colorantes ni los contaminantes complejos, los humedales artificiales y la reducción de la demanda de agua subterránea ofrecen soluciones complementarias y sostenibles para los recursos hídricos del valle de Tulancingo.

Tabla 25. Volúmenes de suministro de agua subterránea y superficial para cada escenario y subcuenca (hm³)

Sector agrícola											
Subcuenca	T.W.	2030					2050				
		R	M1	M2	M3	M4	R	M1	M2	M3	M4
Napateco	G.W.	84	73	68	80	60	92	62	52	89	44
	S.W.	8	8	8	12	8	5	5	5	8	5
Metepec	G.W.	33	29	27	32	24	41	27	21	34	16
	S.W.	9	8	8	10	7	6	6	6	13	5
Tulantepec	G.W.	19	17	15	18	14	21	13	11	17	7
	S.W.	8	7	7	8	7	6	6	5	11	5
Barranca	G.W.	94	82	76	90	68	108	74	62	103	52
	S.W.	8	8	8	12	8	3	3	3	8	3
Acatlán	G.W.	132	114	106	125	94	141	94	78	131	63
	S.W.	13	13	13	21	13	8	9	9	19	9
Cuauhtepic	G.W.	4	3	2	3	2	5	2	2	5	2
	S.W.	13	10	10	11	9	10	7	6	10	6



Valle de Tulancingo		G.W.	366	318	295	348	261	408	272	225	378	183
		S.W.	59	55	54	74	52	38	35	34	69	31
Sector urbano												
		R	M5	M6	M7	M8	R	M5	M6	M7	M8	
Napateco	G.W.	1.1	0.8	1.1	1.1	0.7	1.3	0.9	1.2	1.2	0.8	
	S.W.	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Metepec	G.W.	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.4	0.6	0.6	0.4	
	S.W.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.08	0.06	0.04	0.06	0.05	0.04	
Tulantepec	G.W.	3.6	2.8	3.2	3.4	2.6	4.2	2.8	3.3	3.7	2.5	
	S.W.	0.9	0.7	0.9	0.9	0.7	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	
Barranca	G.W.	0.9	0.7	0.9	0.9	0.6	1.0	0.6	0.9	0.9	0.6	
	S.W.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.06	0.09	0.06	0.09	0.08	0.06	
Acatlán	G.W.	2.0	1.5	1.8	1.9	1.4	2.0	1.3	1.8	1.8	1.2	
	S.W.	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Cuauatepec	G.W.	3.4	2.6	3.0	3.3	2.5	4.0	2.6	3.1	3.6	2.3	
	S.W.	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.08	0.02	0.08	0.03	0.02	
Valle de Tulancingo		G.W.	11.6	8.9	10.5	11.1	8.4	13.4	8.6	10.9	11.8	7.8
		S.W.	2.3	2.1	2.3	2.3	2.0	0.7	0.4	0.6	0.5	0.4
Sector industrial												
		R	M9	M10	M11	M12	R	M9	M10	M11	M12	
Napateco	G.W.	5.75	5.75	5.75	4.31	4.31	7.95	5.01	7.15	3.97	1.03	
	S.W.	1.62	1.62	1.62	2.65	2.65	2.27	1.43	2.04	5.11	0.29	
Metepec	G.W.	0.19	0.19	0.19	0.13	0.13	0.32	0.19	0.28	0.15	0.02	
	S.W.	0.3	0.3	0.3	0.29	0.29	0.43	0.28	0.39	0.40	0.07	
Tulantepec	G.W.	2.93	2.93	2.93	2.20	2.20	4.43	2.79	3.98	2.21	0.58	
	S.W.	0.42	0.42	0.42	1.05	1.05	0.98	0.62	0.88	2.71	0.13	
Barranca	G.W.	0	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	
	S.W.	0.82	0.82	0.82	0.64	0.64	1.3	0.84	1.17	0.68	0.21	
Acatlán	G.W.	1.49	1.49	1.49	0.94	0.94	2.02	1.59	1.82	0.69	0.27	
	S.W.	0.43	0.43	0.43	0.82	0.82	0.58	0.45	0.52	1.53	0.08	
Cuauatepec	G.W.	1.68	1.68	1.68	1.26	1.26	3.3	2.03	2.97	1.51	0.36	
	S.W.	4.29	4.29	4.29	3.64	3.64	3.83	2.87	3.43	4.93	0.77	
Valle de Tulancingo		G.W.	12.04	12.0	12.0	8.84	8.84	18.0	11.6	16.2	8.53	2.26
		S.W.	7.88	7.88	7.88	9.09	9.09	9.39	6.49	8.43	15.3	1.55

R: Referencia (BAU + Cambio climático), T.W: Tipo de agua, G.W: Demanda de agua subterránea, S.W: Demanda de agua superficial, M1: Incremento en la eficiencia de conducción de riego, M2: Incremento en la eficiencia de aplicación de riego, M3: Sustitución del uso de agua subterránea por agua superficial, M4: M1+M2+M3, M5: Eficiencia física urbana, M6: reutilización de aguas grises en el hogar, M7: Cosecha de agua, M8: M5+M6+M7, M9: Humedales artificiales, M10: Planta de tratamiento, M11: Disminución de la demanda, M12: M9+M10+M11.



Impacto general

El paquete de mitigación modelado reduce sustancialmente la presión sobre el acuífero de Tulancingo y las extracciones de agua superficial, apoyando una transición hacia balances hídricos más sostenibles en escenarios futuros.

6.2.7. Efectos acumulativos del agua subterránea en el valle de Tulancingo

Dada la importancia y la amenaza que se presenta para el acuífero, se muestra la evolución temporal del uso de agua subterránea en los sectores agrícola (Fig. 36a), urbano (Fig. 36b) e industrial (Fig. 36c) para cada medida de mitigación propuesta.

Se observa una marcada disminución en la demanda de agua subterránea a partir de 2025 con respecto al escenario de referencia, impulsada principalmente por reducciones en el sector agrícola (Figura 36a). En consecuencia, al final del período de simulación, considerando los tres sectores y todas las medidas de mitigación propuestas, la demanda total de agua subterránea en el valle se reduce en un 56.1%, lo que demuestra que las medidas propuestas son viables para una mejor gestión de los recursos hídricos en el valle.



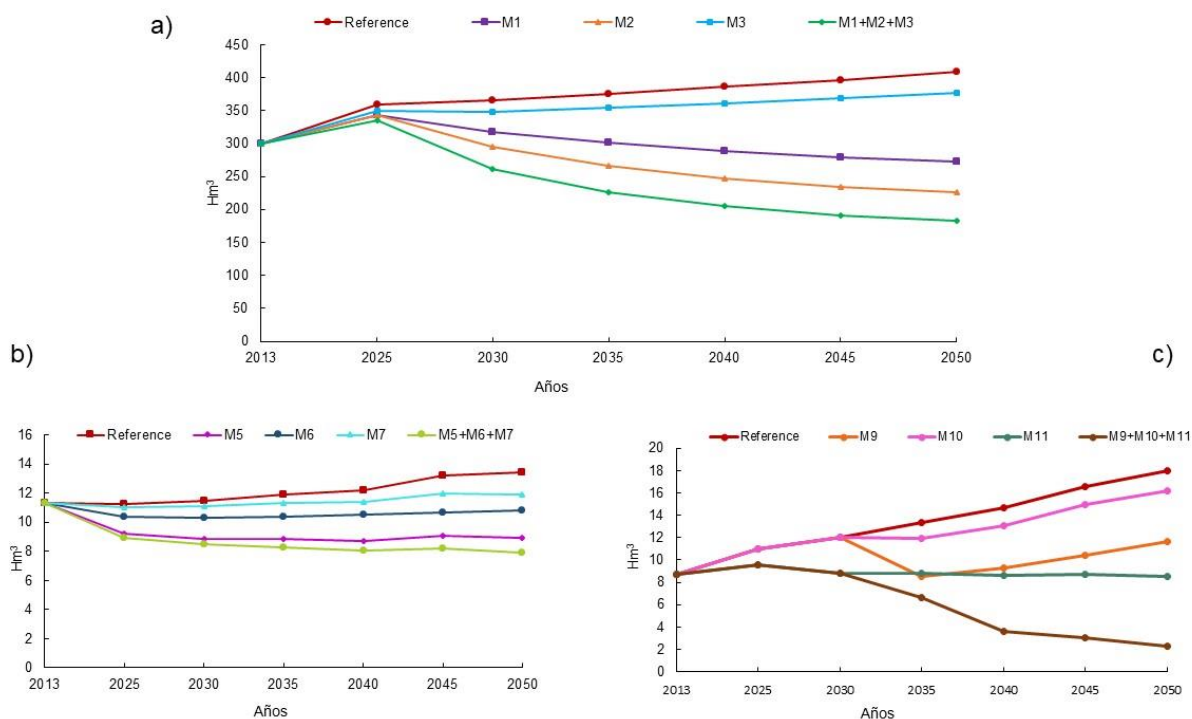


Figura 36. Demandas de agua subterránea considerando medidas de mitigación

a) sector agrícola, b) sector urbano, c) sector industrial. M1: Incremento en la eficiencia de conducción de riego, M2: Incremento en la eficiencia de aplicación de riego, M3: Sustitución del uso de agua subterránea por agua superficial, M4: M1+M2+M3, M5: Eficiencia física urbana, M6: reutilización de aguas grises en el hogar, M7: Cosecha de agua, M8: M5+M6+M7, M9: Humedales artificiales, M10: Planta de tratamiento, M11: Disminución de la demanda, M12: M9+M10+M11.

El análisis también muestra que, si las medidas de mitigación se aplicaran únicamente a los sectores urbano e industrial, la reducción de la demanda sería mínima, debido a que la mayor parte de la demanda de agua del valle proviene de las actividades agrícolas.

Efectos acumulativos en los volúmenes del acuífero

Análisis previos demostraron que la demanda de agua para la agricultura representa la mayor amenaza para el recurso hídrico, específicamente para el acuífero. Si se analizan los efectos acumulativos en los volúmenes del acuífero bajo los supuestos de que no se implementen medidas de mitigación, que la demanda continúe creciendo en los tres sectores y que la infiltración se reduzca debido al cambio climático, el valle presentaría un déficit neto de -187.04 hm^3 para 2050,



como se detalla en la Tabla 26. Este déficit neto se revierte sustancialmente al implementar las medidas de mitigación propuestas para los tres sectores, lo que genera un efecto neto positivo de 250.4 hm³ para el año 2050.

Tabla 26. Efectos acumulativos en los volúmenes de agua subterránea del acuífero de Tulancingo debido a diferentes perturbaciones en 2030 y 2050

Perturbación	Efecto	2030 (hm ³)	2050 (hm ³)	Efecto neto en 2050 (hm ³)
Agricultura	Aumenta la demanda	-64.3	-106.8	
Urbano	Aumenta la demanda	-0.2	-2.1	
Industrial	Aumenta la demanda	-3.3	-9.2	-187.04
Cambio climático	Disminuye la infiltración	-15.9	-68.8	
M1		47.7	136.3	
M2	Disminuye la demanda agrícola	70.7	182.8	225.4
M3		18.2	31.8	
M1+M2+M3		104.3	225.4	
M5		2.7	4.8	
M6	Disminuye la demanda urbana	1.1	2.5	8.9
M7		0.5	1.6	
M5+M6+M7		3.2	5.6	
M9		1.5	3.2	
M10	Disminuye la demanda industrial	1.7	3.8	16.1
M11		3.0	9.1	
M9+M10+M11		4.3	11.0	
Efecto neto en 2050 considerando medidas de mitigación de los 3 sectores				250.4

M1: Incremento en la eficiencia de conducción de riego, M2: Incremento en la eficiencia de aplicación de riego, M3: Sustitución del uso de agua subterránea por agua superficial, M4: M1+M2+M3, M5: Eficiencia física urbana, M6: reutilización de aguas grises en el hogar, M7: Cosecha de agua, M8: M5+M6+M7, M9: Humedales artificiales, M10: Planta de tratamiento, M11: Disminución de la demanda, M12: M9+M10+M11.

Los resultados muestran que aumentar la eficiencia en el uso del agua a lo largo del tiempo mediante la implementación de las medidas propuestas (adaptadas a las condiciones geográficas, económicas y sociales del valle) puede reducir el déficit del acuífero que persiste desde 2013 (CONAGUA, 2013).



6.3. Estrés hídrico en el valle de Tulancingo

Al evaluar los parámetros del ciclo hidrológico (precipitación, infiltración y escorrentía), se obtuvieron los valores de la recarga natural. Con dichos parámetros, el número de habitantes y las demandas de agua subterránea y superficial se lograron indicadores e índices de estrés hídrico, los cuales fungen como principales indicadores para determinar si existe escasez hídrica en el valle de Tulancingo.

6.3.1. Estimación de Recarga natural

La recarga natural considera la precipitación, infiltración y escorrentía. En el año 2013 se reportaron 836.62 hm³ de agua de lluvia en el valle, de los cuales el 35% se captó en la subcuenca Cuauhtepac, 18% en Acatlán, 15% en Barranca, 13% en Metepec y el 19% restante en las subcuencas Tulantepec y Napateco (Tabla 27).

Tabla 27. Estimación de recarga natural para el valle de Tulancingo (año base 2013)

Subcuenca	Precipitación	Infiltración	Escorrentía	Recarga natural
Acatlán	151.44	25.49	17.28	42.77
Barranca	126.40	17.47	12.15	29.62
Metepec	105.70	20.90	15.84	36.74
Cuauhtepac	289.63	56.44	34.59	91.03
Tulantepec	97.90	18.25	13.25	31.50
Napateco	65.55	12.65	9.85	22.50
Valle de Tulancingo	836.62	151.20	102.96	254.16

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de WEAP

Respecto a los valores de infiltración, estos oscilaron entre un 3.2% a un 20.5% y el escurrimiento entre un 3.3% y 16.8%. La evapotranspiración es alta, debido a que el valle de Tulancingo está clasificado como una zona semiárida y el 65.26% de su superficie está destinada a la agricultura y 25.15% a zona boscosa, valores que concuerdan con lo reportado en el valle de Mezquital en donde algunas zonas presentan una evapotranspiración mayor a 70% del total de la precipitación (Chamizo-Checa, 2018).

En este sentido la recarga natural del valle de Tulancingo para el año base fue de 254.16 hm³, de los cuales 151.2 hm³ corresponden a la infiltración y 102.96 hm³ a la escorrentía. Dicha recarga corresponde para aproximadamente 298,397 habitantes, lo que clasifica al valle en



condiciones de estrés hídrico, como se había señalado en resultados previos del análisis del acuífero.

6.3.2. Índice de Falkenmark en el valle de Tulancingo

El índice de Falkenmark muestra el nivel de escasez hídrica de una región considerando diferentes factores, pero principalmente la población. Si el valor obtenido es menor a 1,700 m³/habitante/año la zona analizada presentará un grado de estrés hídrico.

Se realizaron las estimaciones del índice a partir del año base, cada 10 años y hasta el 2050 en cada una de las subcuencas para los escenarios que toman en cuenta tanto el crecimiento demográfico, industrial y agrícola, como las perturbaciones debidas al cambio climático (Tabla 28).

En este sentido, al analizar las condiciones hídricas de todo el valle en el 2013, se determinó existe un nivel de escasez hídrica al reportarse 1,050 m³/habitante/año. Para el año 2050 donde se van a presentar condiciones de crecimiento en todos los sectores y un cambio climático desfavorable, se estima la situación se agrave, debido a que el valle reporta un nivel de escasez de agua de 553 m³/habitante/año, tal como se detalla en la Tabla 28.

Asimismo, se observa que a partir del año 2040 todas las subcuencas presentan una disminución significativa en cuanto a la disponibilidad del recurso.

Tabla 28. Comportamiento del índice de Falkenmark bajo condiciones de crecimiento inercial y cambio climático proyectado hasta 2050

Subcuenca	2013	2020	2030	2040	2050
Acatlán	1,206	1,215	1,162	959	772
Barranca	2,792	2,583	2,269	1,633	1,224
Metepec	3,021	2,804	2,545	2,010	1,573
Cuautepec	1,242	1,175	1,066	831	630
Tulantepec	339	322	302	242	188
Napateco	1,276	1,180	1,028	766	560
Valle de Tulancingo	1,050	999	915	718	553



A nivel de subcuenca, observamos que la subcuenca Barranca en el año 2040 entra en condiciones de estrés hídrico con 1,633 m³/habitante/año. En este mismo año las subcuencas Acatlán, Cuauhtepic y Napateco agudizan sus condiciones pasando de tener estrés hídrico a un nivel de escasez hídrica con 959,831 y 766 m³/habitante/año respectivamente.

La subcuenca Napateco es la más cercana a catalogarse a lo largo del tiempo con escasez absoluta de agua, estando a sólo 60 m³/habitante/año de llegar al nivel crítico en el año 2050. Esto debido a que en esta área se encuentra el mayor porcentaje de agricultura de riego (35%), así como el 21% de extracciones de agua subterránea y el 10% de agua superficial del total del valle, para el sector agropecuario, lo que pone en situación de vulnerabilidad hídrica al darle prioridad a dicha actividad altamente demandante del recurso.

Respecto a la subcuenca Tulantepec desde el año 2013 presenta un nivel de escasez absoluta de agua (339 m³/habitante/año) debido a que cuenta con una mayor demanda del recurso al existir una mayor densidad de población (556 habitantes/km²). A su vez, reporta una de las menores precipitaciones de todo el valle (97.9 hm³/año), factor que agudiza la disponibilidad de agua en la zona (Tabla 28).

Las subcuencas Barranca y Metepec para el año base reportaron no existe estrés hídrico al contar con más de 2500 m³/habitante/año (Tabla 28). Lo anterior se estima porque en estas subcuencas existen menos áreas de zonas urbanas (0.08% y 1.23% respectivamente) y grandes áreas de bosque (23.01% y 20.68%). Lo cual confirma que basándose en los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030, si una región destina más del 24% de su superficie para cobertura forestal, se puede considerar existe un grado de sostenibilidad en la zona (Tan et al., 2022). En este sentido, las dos subcuencas están a un 0.99% y 3.32% de cobertura forestal para lograr un entorno ecológico sostenible y por lo tanto no cuentan con estrés hídrico en el año base y hasta el año 2030.

Sin embargo, al observar el comportamiento del índice en el año 2050 vemos que las dos subcuencas en condiciones favorables (Barranca y Metepec), ahora cuentan con un grado de estrés hídrico (Tabla 28) al destinarse menos de 1,700 m³/habitante/año, lo cual refleja que la disminución de las áreas boscosas y aumento de las zonas urbanas (-5.95% y +0.01% para el caso de Barranca y -2.71% y +2.37% para Metepec) afecta indiscutiblemente la disponibilidad de agua.



Dichos hallazgos coinciden con lo reportado por Karimi y Talebi (2023) en subcuencas que cuentan con condiciones climáticas y antropogénicas similares, como la región semiárida de la Subcuenca Eskandari, en Irán, donde el agua se considera el factor restrictivo más importante para el consumo humano, agrícola e industrial, estimándose un índice de Falkenmark de 637 m³/habitante/año. De manera similar, en el valle del Mezquital, Chamizo-Checa (2018) reportaron para el año 2050 una disminución de la disponibilidad de agua y niveles de escasez aguda absoluta (desde 145 hasta 451 m³/habitante/año). Asimismo, Ríos-Sánchez et al. (2024) reportan una fuerte escasez absoluta en todas las subcuencas del valle Cuautitlán-Pachuca, estimándose valores de 190 m³/habitante/año para el año 2050.

Lo anterior confirma que las condiciones del cambio climático, el crecimiento poblacional y el cambio de uso de suelo, son el principal factor que ocasiona estrés hídrico en cualquier región de estudio. Además, la magnitud de indicadores de estrés hídrico, como el índice de Falkenmark, varía y depende de diversos factores dentro de una región, lo que proporciona información para generar estrategias puntuales dependiendo de los factores antropogénicos y climáticos de cada zona o subcuenca a evaluar, generando una adecuada gestión de los recursos hídricos (Veetil and Mishra, 2018).

En este sentido, es relevante realizar medidas de adaptación y mitigación para un uso eficiente del recurso. Por ello es de suma importancia primero conocer cómo está distribuida la demanda del agua tanto subterránea como superficial de la zona, para posteriormente poder implementar estrategias hídricas sostenibles a corto, mediano y largo plazo.

6.3.3. Indicador 6.4.2. de los ODS en el valle de Tulancingo

Este indicador nos refleja cuánta agua se extrae en relación con la disponibilidad renovable, por lo que si se obtiene un valor igual a 100% indica que se está extrayendo lo mismo que se puede renovar cada año. Si se obtiene un valor mayor a 100 refleja que se está usando más agua de la que el sistema puede reponer naturalmente y por lo tanto hay una mala gestión hídrica en la zona.

Considerando la clasificación propuesta por la FAO (2019) el valle de Tulancingo presentaría un índice de estrés hídrico crítico (277.5%) para el año 2030 si se considera un



crecimiento inercial de los tres sectores, perturbaciones debidas al cambio climático, un caudal ambiental del 20% y sin llevar a cabo ninguna medida de adaptación o mitigación (Tabla 29).

Lo anterior implica una sobreexplotación severa del acuífero al estar extrayendo casi tres veces más agua que la que naturalmente se recarga. Asimismo, refleja un decrecimiento del almacenamiento al bajar los niveles freáticos, secarse paulatinamente los manantiales y perder el caudal base los ríos. Esto significa que para el año 2030 se estima se usarán 232.95 hm³ más de lo que el ciclo hidrológico repone, reflejándose un claro signo de déficit hídrico estructural o dependencia de agua subterránea no renovable.

De persistir este nivel de estrés hídrico, se presentaría un riesgo agrícola al depender la producción de un bombeo excesivo de agua subterránea o de fuentes no sustentables. El impacto ecológico que esto conlleva se reflejaría en un daño severo a los ecosistemas acuáticos al no recibir suficiente caudal ambiental. Lo que se visualizaría en una pérdida de resiliencia ante sequías, debido a que todo el sistema no tendría la capacidad de recuperarse.

De manera similar, Ríos-Sánchez et al. (2024) informa que el indicador ODS de estrés hídrico resultó con valores mayores a 100% en todas las subcuencas del valle Cautitlán-Pachuca, debido al elevado y acelerado crecimiento de los sectores urbano e industrial de la zona. En este sentido, Gutiérrez-Nava et al. (2025) también señalan un aumento constante del indicador con condiciones de estrés hídrico superiores al 80% para el año 2020 en la ciudad de Puebla, México. Esto indica la necesidad de mejorar la gestión del agua urbana, debido a que, en general, las ciudades han estado experimentando un aumento en la demanda de agua en relación con la disponibilidad de recursos hídricos.

En este sentido, se consideraron únicamente las medidas de mitigación que hacen referencia a un incremento de eficiencia global del riego agrícola (M1 y M2), debido a ser el sector que más impacta en la sobreexplotación del acuífero. De igual forma son las medidas que se consideran tienen un mínimo porcentaje de avance del año base a la fecha.



En la Tabla 29, se observa que únicamente la subcuenca Cuauhtepac refleja un nivel de estrés hídrico menor a 100%, a pesar de que en dicha subcuenca se proyectó un caudal ambiental de 20% para el año 2030 y de 40% en el año 2050 para la protección de río y arroyos.

Tabla 29. Nivel de estrés hídrico según Indicador 6.4.2. de los ODS en diferentes escenarios

Subcuenca	Referencia		M1		M2	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Napateco	632.8	1296.7	562.7	903.9	530.8	781.8
Metepec	167.0	344.8	147.6	245.6	139.8	203.1
Tulantepec	152.6	293.6	139.5	228.9	130.7	204.7
Barranca	519.9	1191.9	459.9	836.1	430.0	710.5
Acatlán	446.1	790.9	392.4	555.2	368.6	473.3
Cuauhtepac	61.3	124.7	52.9	99.4	50.9	95.2
Valle de Tulancingo	277.5	559.2	246.4	400.7	231.9	337.1

M1: Mejora de la eficiencia del sistema de conducción de agua para riego, M2: Riego por aspersión para el incremento en la eficiencia de aplicación

Se determinó el nivel de estrés hídrico sin considerar un caudal ambiental, debido a que el valle de Tulancingo no cuenta con disponibilidad de agua suficiente (CONAGUA, 2024) que permita incluir dicho valor en su cálculo, mostrándose resultados más realistas con la zona de estudio (Tabla 30). Al igual que Kang, et al. (2022) los cuales señalan que este indicador tiene la ventaja de emplearse en cualquier región y se puede reducir el valor del caudal ambiental en temporada de secas o aumentar en temporada de lluvias, dando un valor más realista de las condiciones hídricas de la zona y siendo una estrategia óptima para una adecuada gestión del recurso hídrico.

En este sentido, observamos que el nivel de estrés en el valle sigue siendo extremadamente alto (353.1%) en el escenario de referencia para el año 2050, por lo que difícilmente se puede considerar la zona sea sustentable hídricamente si no se pone en acción alguna medida que mitigue esta crisis, debido a que se presenta una sobreexplotación progresiva del recurso.



Por ello, a lo largo del periodo de análisis e implementando las medidas de mitigación propuestas, en el año 2050 se observa una reducción del porcentaje de estrés, de 253% con la medida M1 y de 212.9% con la medida M2 (Tabla 30), lo cual es significativamente menor comparado con el valor de referencia que se espera habrá si no se pone en marcha ninguna medida. Por ello es de crucial importancia reducir la demanda mediante el aumento en la eficiencia del riego agrícola tanto en conducción, como en aplicación, restaurar la recarga progresiva del acuífero y proteger los caudales ecológicos.

Específicamente la subcuenca Cuautepec, considerada la única zona con un nivel bajo de estrés, refleja puede lograr obtener los menores valores y catalogarse como la única área con un uso sostenible de sus recursos hídricos, implementando las medidas de mitigación. Sin embargo, este valor se lograría únicamente si no se considera un caudal ambiental, lo cual implicaría no destinar ningún porcentaje de extracción para la protección de ríos, arroyos o recarga del acuífero.

Tabla 30. Nivel de estrés hídrico según Indicador 6.4.2. de los ODS en diferentes escenarios sin considerar caudal ecológico

Subcuenca	Referencia		M1		M2	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Napateco	506.3	907.7	450.2	632.7	424.6	547.3
Metepec	133.6	241.4	118.1	171.9	111.9	142.2
Tulantepec	122.1	205.5	111.6	160.2	104.6	143.3
Barranca	415.9	834.4	368.0	585.3	344.0	497.4
Acatlán	356.9	553.6	313.9	388.7	294.8	331.3
Cuautepec	36.8	62.4	31.8	49.7	30.5	47.6
Valle de Tulancingo	202.4	353.1	179.8	253.0	169.2	212.9

M1: Mejora de la eficiencia del sistema de conducción de agua para riego, M2: Riego por aspersión para el incremento en la eficiencia de aplicación

6.3.4. Índice de estrés de suministro de agua (WaSSI) en el valle de Tulancingo

Los valores altos del indicador de estrés del suministro de agua, reflejan existen condiciones de un aumento de la demanda o una disminución en la oferta del suministro. En este sentido, si se obtiene un valor mayor a 0.5, se considerará que la zona cuenta con un nivel de estrés en el suministro



aportado y si se obtienen valores mayores a uno es indicativo de la falta de disponibilidad de agua en la zona (Sun et al., 2008).

Los valores de WaSSI mostrados en la Tabla 30 demuestran que, en casi todas las subcuencas en el escenario de Referencia, a excepción de Cuauhtepic, existe una falta de disponibilidad de agua, con un nivel de estrés mediano a alto. Siendo la subcuenca Napateco la más afectada con un índice de estrés de 9.08 puntos. Valores similares reportan Dehghanpir et al. (2024) en Irán, donde al igual que el valle de Tulancingo, aproximadamente el 92% del agua dulce disponible se consume para la producción agrícola, reportándose valores entre 0.6 y 1.2 que significan estrés alto y muy alto

Se hizo un análisis considerando únicamente las medidas de mitigación propuestas para el sector urbano e industrial. Se observa que el nivel de estrés hídrico es similar al escenario de Referencia, debido a que el área urbana es muy pequeña y el impacto de las medidas no se refleja del mismo modo que en el sector agrícola.

Asimismo, el comportamiento del sector industrial no refleja un cambio significativo en el nivel de estrés hídrico, pero si es menor que el reflejado en el sector urbano, debido a que el uso de agua es mayor para llevar a cabo sus procesos y el impacto de las medidas de mitigación es mayor comparado con el sector urbano (Tabla 31).

En este sentido, se observa que en la subcuenca Tulantepec el índice de estrés hídrico del sector urbano e industrial, logra ser inferior al reportado en el año de referencia (1.18 en el año 2030) considerando todas las medidas de mitigación propuestas para cada sector (Tabla 31).



Tabla 31. Índice WaSSI del valle de Tulancingo bajo diferentes escenarios del sector urbano e industrial

Escenarios de mitigación sector urbano										
	Referencia		M5		M6		M7		M8	
Napateco	5.06	9.08	5.04	8.48	5.06	9.07	5.06	9.07	5.04	9.03
Metepec	1.34	2.33	1.33	2.40	1.34	2.41	1.34	2.41	1.33	2.40
Tulantepec	1.22	2.06	1.19	1.97	1.21	2.00	1.21	2.03	1.18	1.95
Barranca	4.16	8.34	4.15	8.31	4.16	8.34	4.16	8.34	4.15	8.31
Acatlán	3.57	5.54	3.55	5.51	3.56	5.53	3.57	5.53	3.55	5.51
Cuautepec	0.37	0.62	0.36	0.59	0.36	0.60	0.36	0.61	0.35	0.59
Valle de Tulancingo	2.02	3.52	2.01	3.50	2.02	3.52	2.02	3.52	2.01	3.49
Escenarios de mitigación sector industrial										
	Referencia		M9		M10		M11		M12	
Napateco	5.06	9.08	5.02	8.41	5.02	8.93	4.99	8.74	4.96	8.67
Metepec	1.34	2.33	1.34	2.40	1.34	2.40	1.33	2.38	1.33	2.38
Tulantepec	1.22	2.06	1.21	2.00	1.21	1.99	1.19	1.92	1.18	1.89
Barranca	4.16	8.34	4.16	8.32	4.16	8.31	4.15	8.28	4.14	8.26
Acatlán	3.57	5.54	3.57	5.52	3.56	5.51	3.56	5.49	3.55	5.47
Cuautepec	0.37	0.62	0.36	0.58	0.35	0.53	0.34	0.50	0.33	0.48
Valle de Tulancingo	2.02	3.52	2.02	3.50	2.01	3.47	2.00	3.43	1.99	3.41

M4: M1+M2+M3, M5: Eficiencia física urbana, M6: reutilización de aguas grises en el hogar, M7: Cosecha de agua, M8: M5+M6+M7, M9: Humedales artificiales, M10: Planta de tratamiento, M11: Disminución de la demanda, M12: M9+M10+M11.

A su vez, afortunadamente, el indicador WaSSI, al igual que el indicador 6.4.2. de los ODS, reafirman que específicamente la subcuenca Cuautepec es la que obtuvo valores menores a 0.5, catalogándola sin estrés o como zona sustentable en el análisis realizado en el sector urbano e industrial (Tabla 31).



6.3.5. Índice de estrés hídrico sectorial agrícola (SWaSSI) en el valle de Tulancingo

En la Tabla 32 se muestran los valores obtenidos a nivel de subcuenca del índice SWaSSI, percibiéndose un nivel de estrés hídrico significativamente alto en el escenario de Referencia tanto del año 2030, como 2050, al obtenerse valores superiores a 1.0, lo cual demuestra una sobreexplotación o déficit significativo de agua subterránea en cinco de las seis subcuencas de análisis.

Hallazgos similares reportan Rafiei et al. (2023) en la cuenca hidrográfica de Jazmourian en Irán, donde el estrés hídrico es muy alto ($WaSSI=0.88$) y el estrés hídrico agrícola rebasa los niveles críticos ($SWaSSI=1.25$) debido al uso intensivo del agua para la producción agrícola, trayendo consecuencias negativas para la seguridad hídrica y alimentaria de la región.

A nivel de valle, se observa que, si se consideran las medidas de mitigación propuestas, en el año 2050 se reduciría significativamente el estrés considerando un incremento gradual en sistemas de riego por aspersión (1.87, según el índice de estrés hídrico sectorial agrícola). A su vez las subcuencas Napateco y Acatlán presentaron el mayor impacto de disminución del estrés hídrico, al reducir sus valores en un 4.87 y 3.12 respectivamente.

Resultados de gran valor al ser las subcuencas donde se presenta la mayor área de agricultura de riego, la producción de especies forrajeras y la mayor producción ganadera, actividades altamente demandantes de agua y que son las que más ponen en riesgo la sobreexplotación del acuífero. Sin embargo, se sigue observando un grado alto de estrés hídrico, lo que conlleva a la necesidad de implementar más acciones que ayuden a un uso sustentable en estas subcuencas de alta actividad agropecuaria.

Asimismo, los resultados muestran que si se considera un incremento de eficiencia en la conducción (M1) y aplicación (M2) del riego, disminuye el nivel de estrés hídrico agrícola en la subcuenca Tulantepec, pasando a un grado mediano de estrés, obteniéndose valores de 0.77 y 0.91 para el año 2030 y 2050 respectivamente.



Tabla 32. Índice SWaSSI del valle de Tulancingo en diferentes escenarios

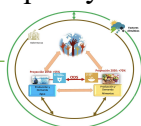
Subcuenca	Referencia		M1		M2	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Napateco	4.69	8.29	4.13	6.50	3.88	4.87
Metepac	1.30	2.28	1.15	1.59	1.08	1.29
Tulantepec	0.94	1.53	0.84	1.08	0.77	0.91
Barranca	4.08	8.13	3.60	5.64	3.36	4.76
Acatlán	3.46	5.34	3.03	3.69	2.84	3.12
Cuautepec	0.21	0.32	0.16	0.19	0.15	0.17
Valle de Tulancingo	1.87	3.21	1.64	2.22	1.53	1.87

M1: Incremento en la eficiencia de conducción de riego, M2: Incremento en la eficiencia de aplicación de riego, M3: Sustitución del uso de agua subterránea por agua superficial.

Esto conlleva a considerar que, si se implementan más medidas de mitigación dicha subcuenca puede lograr a lo largo del tiempo obtener valores menores a 0.5, lo cual la catalogaría una zona sin estrés hídrico agrícola. Valores que van en concordancia con los obtenidos en el indicador 6.4.2. de los ODS (97.9% para el año 2030, considerando un caudal ambiental del 20%) y con el indicador WaSSI, donde se obtiene en esta misma zona un valor de 0.87 en el año 2030 considerando todas las medidas de mitigación.

Resultados de gran relevancia, debido a que esta subcuenca es la que cuenta con la mayor densidad poblacional, lo que abre una oportunidad para crear conciencia de la necesidad de implementar una adecuada gestión de los recursos hídricos de la zona. Asimismo, su ubicación geográfica al sur del valle y considerando que el flujo de los ríos es de sur a norte, es de vital importancia que exista un uso sustentable de los recursos hídricos al inicio de la cuenca, para no afectar la disponibilidad de agua a las subcuencas que se encuentran al norte del valle.

De manera similar Chamizo et al. (2018) reportó que se prevé el estrés hídrico en el valle de Mezquital disminuirá a valores menores de 0.5, en el año 2030, debido a la instalación de una planta de tratamiento, lo cual ayudará a disminuir la demanda de agua al reutilizar el agua tratada. A su vez, López-López et al. (2025) mediante el uso de indicadores de estrés hídrico (WREI), también señalan que implementar medidas que ayuden a una mejor gestión en el suministro del



agua para cultivos como pasto *Rye grass* puede aumentar en 57% la eficiencia en el suministro del requerimiento de riego. Además, Rocha et al. (2024) mostraron a través del indicador SWaSSI e implementando riego por goteo en el estado de Guanajuato, se redujo significativamente el estrés hídrico en 11% del total de los municipios a partir del sexto año de su implementación.

Estos resultados tienen implicaciones para identificar nuevas oportunidades para la reasignación del uso de agua superficial para reducir el bombeo de agua subterránea en el sector agrícola y mejorar la sustentabilidad del agua en la región.

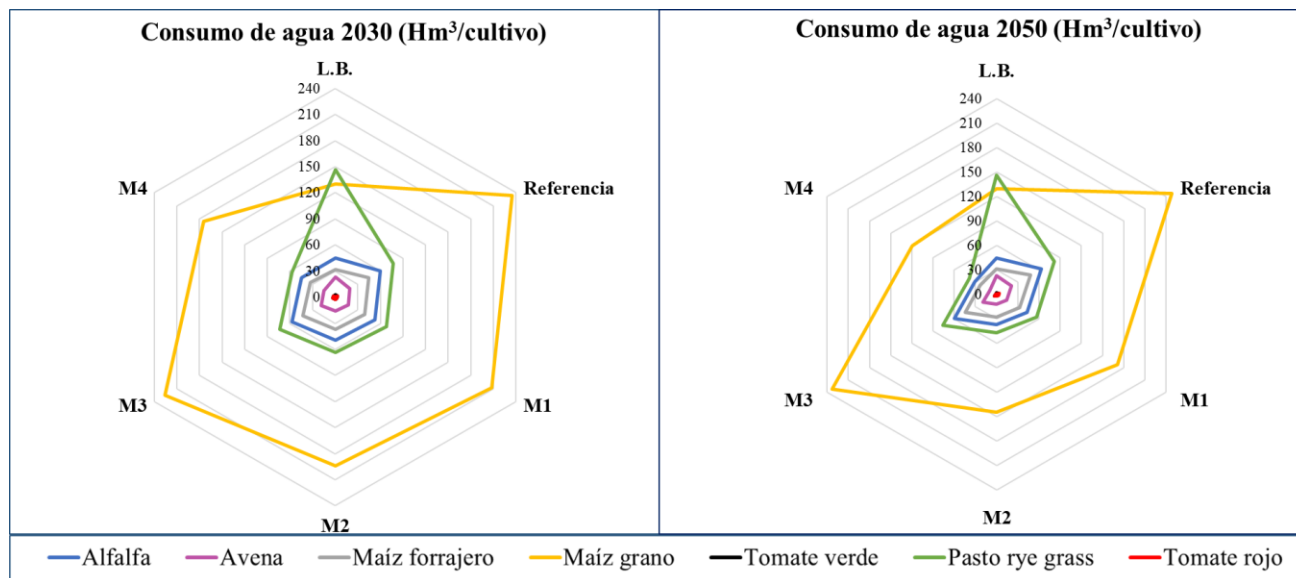
6.4. Indicadores de sustentabilidad del Nexo agua-alimentos en el valle de Tulancingo

6.4.1. Consumo de agua

Se realizó el análisis de la cantidad de agua consumida en la producción de los siete cultivos representativos del valle de Tulancingo, para con ello establecer medidas que ayuden a lograr una sustentabilidad entre el Nexo agua-alimentos. En este sentido, en la Figura 37 podemos observar el comportamiento del consumo de agua durante el 2030 y 2050.

Destaca la producción de pasto *Rye grass* como el principal consumidor de agua en el valle de Tulancingo en el año 2013. Posteriormente considerando el crecimiento poblacional y las perturbaciones debidas al cambio climático en 2030 y 2050, la producción de maíz grano sobresale significativamente (234.48 hm³ y 248.04 hm³ respectivamente), en relación al consumo de agua de los demás cultivos (Figura 37).





L.B: Línea base (año 2013), M1: Incremento en la eficiencia de conducción de riego, M2: Incremento en la eficiencia de aplicación de riego, M3: Sustitución del uso de agua subterránea por agua superficial, M4: M1+M2+M3

Figura 37. Indicador consumo de agua 2030 y 2050 en diferentes escenarios del Valle de Tulancingo

Considerando las medidas de mitigación propuestas en la investigación, se puede observar que el escenario M2, el cual hace referencia a un aumento en la eficiencia del riego agrícola, mediante el uso gradual de sistemas de riego por aspersión, es el escenario que para el año 2050 muestra una reducción significativa en cuanto al uso del agua en los cultivos del valle de Tulancingo.

Específicamente en la producción de maíz grano se logra una reducción en el uso del agua para el año 2050 de 103.7 hm³. Lo anterior refleja que dicha medida es una ventana de oportunidad para lograr un uso eficiente del recurso hídrico y un paso a seguir para lograr la sustentabilidad hídrica y alimentaria del valle.

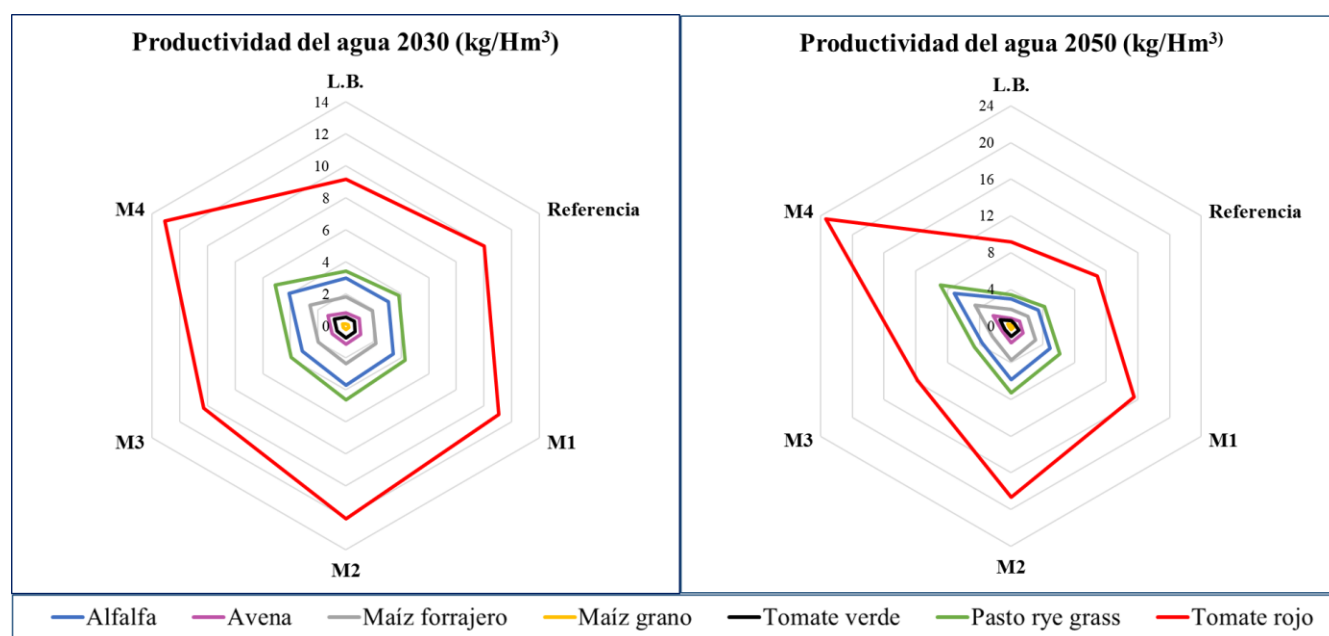
6.4.2. Productividad del agua

Se evaluó la productividad del agua en el valle de Tulancingo, para conocer el comportamiento del rendimiento de los cultivos, en relación al consumo de agua y con ello evaluar si se está realizando un uso eficiente del agua.



En la Figura 38 se observa que la mayor productividad del agua se lleva a cabo en la producción de tomate rojo, desde año base (2013) hasta finalizar el periodo de simulación en el 2050. Sin embargo, debe considerarse que este cultivo no se puede comparar en relación con los cultivos forrajeros, debido a que difieren en contenido de agua, función alimentaria, aporte energético, entre otros factores.

En consonancia con lo anterior, al comparar el comportamiento de la productividad del agua en los cultivos forrajeros del valle de Tulancingo, se observa que el mayor rendimiento se presenta en la producción de pasto *Rye grass* con valores que van desde 3.44 kg/hm³ en el año base, hasta 8.90 kg/hm³ en el escenario M4 para el 2050. Seguido de la producción de alfalfa y el maíz forrajero, como se detalla en la Figura 38.



L.B: Línea base (año 2013), M1: Incremento en la eficiencia de conducción de riego, M2: Incremento en la eficiencia de aplicación de riego, M3: Sustitución del uso de agua subterránea por agua superficial, M4: M1+M2+M3

Figura 38. Indicador productividad del agua en 2030 y 2050 en diferentes escenarios del Valle de Tulancingo

Respecto al comportamiento de los escenarios de mitigación propuestos, se observa que el escenario M4, donde se considera un aumento de eficiencia global del riego agrícola y una sustitución de la demanda de agua subterránea por superficial, es aquel donde se logra la máxima



productividad del agua de todos los cultivos representativos del valle de Tulancingo. Lo anterior refleja que implementar estas medidas garantiza un uso eficiente del recurso hídrico y un aumento en el rendimiento de los cultivos, al obtenerse mayores rendimientos con menor cantidad de agua, a pesar de las perturbaciones ocasionadas por el cambio climático y el crecimiento inercial de los tres sectores.

6.4.3. Productividad económica del agua agrícola

Este índice reveló los cultivos que pueden proporcionar más ganancias netas al consumir menos agua y por lo tanto los que se consideran más sustentables para su producción en el valle de Tulancingo. En este sentido, en la Figura 39 se observa que la producción de tomate rojo es la que proporciona la mayor productividad económica del agua iniciando con una ganancia de \$33.21/m³ en el año base.

A su vez, haciendo un análisis en todos los escenarios modelados para los años 2030 y 2050, se observa que el escenario M2 donde se propone un aumento de eficiencia en la aplicación del riego agrícola para la producción de tomate rojo, es aquel que logra la máxima productividad económica del agua (\$87.69/m³ en el año 2030 y \$244.33/m³ en el 2050), tal como se detalla en la Figura 39.

En contraste, se puede observar que la producción de avena y maíz forrajero presentaron los menores valores de productividad económica del agua en el año base de análisis, con valores de \$0.01/m³ y \$0.15/m³, respectivamente (Figura 39). Lo anterior refleja que dichos cultivos generan una utilidad muy baja, menos de un peso por metro cúbico de agua empleada después de pagar los insumos. Lo que significa que los cultivos no están aprovechando el agua de manera económicamente eficiente. Esto indica baja rentabilidad hídrica y sugiere revisar aspectos como la eficiencia del riego, costos de producción y rendimientos.

En sistemas forrajeros, un margen económico deseable está más cerca de 1–3 pesos/m³, valores que se lograrían alcanzar en el año 2030 si se implementa el escenario M2 con un aumento de eficiencia en la aplicación del riego a través de sistemas de aspersión para la producción de pasto *Rye grass*. Se generaría una productividad económica del agua de \$1.00/m³ y para el año 2050 esta aumentaría a \$2.72/m³ (Figura 39).



En el caso de la producción de alfalfa (cultivo de gran importancia económica en el valle de Tulancingo), dicho margen se lograría alcanzar hasta el año 2050 implementando el mismo escenario, con una utilidad de \$1.61/m³.

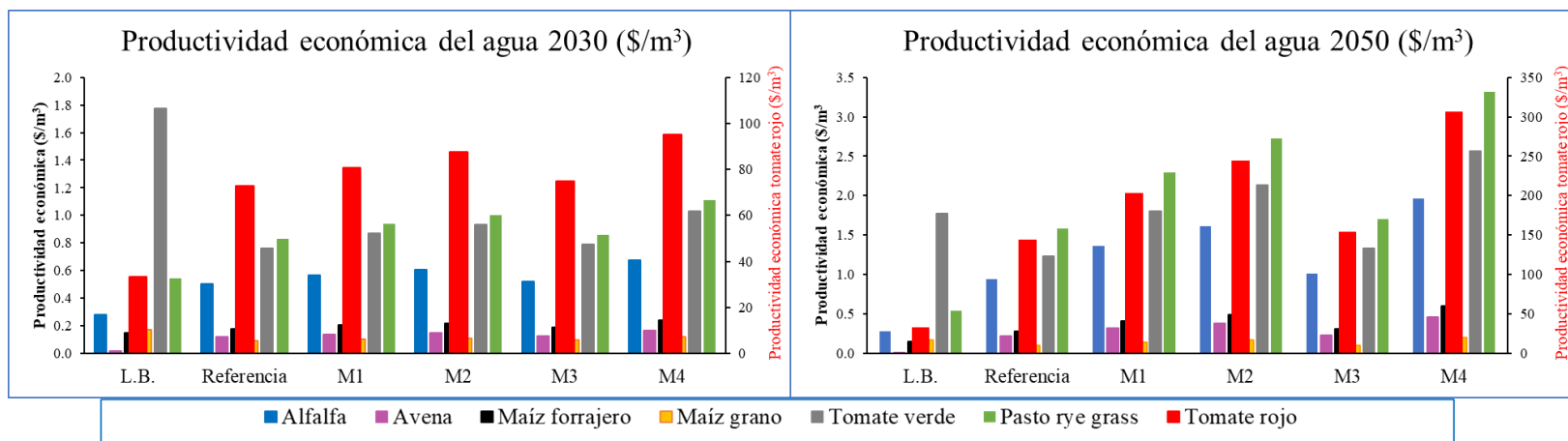
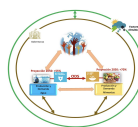


Figura 39. Indicador productividad económica del agua en 2030 y 2050 del Valle de Tulancingo

Nota: El eje secundario hace referencia a la productividad económica del agua para tomate rojo. M1: Incremento en la eficiencia de conducción de riego, M2: Incremento en la eficiencia de aplicación de riego, M3: Sustitución del uso de agua subterránea por agua superficial, M4: M1+M2+M3.

Hallazgos similares reportaron Pourfallah Asadabadi, Sadeghi, Vafakhah, and Delavar (2025) en la producción de alfalfa y trigo de riego en Irán, los cuales cuentan con una alta utilización del agua y baja productividad económica del agua agrícola, es decir, la producción de estos cultivos tienen bajos ingresos y alto uso del agua. Por lo que se consideran cultivos no sustentables y se deben adaptar estrategias que impliquen un mejor manejo del agua, como un incremento de eficiencia en la aplicación del riego.



6.4.4. Disponibilidad de alimentos

Se realizó un análisis de la disponibilidad de alimentos del valle de Tulancingo, representados con la producción de maíz grano, tomate verde y tomate rojo, debido a que los demás cultivos que se producen en la zona son de tipo forrajero.

En este sentido, en la Figura 40 se puede observar que la disponibilidad de los tres cultivos es satisfactoria únicamente en las subcuencas Barranca, Metepec y Napateco, al obtenerse valores mayores a uno en los tres periodos de análisis. Esto refleja que la producción cubre el requerimiento mínimo de los habitantes de dichas subcuencas.

De igual forma, se distinguió que el tomate rojo es el cultivo con mayor disponibilidad en cinco de las seis subcuencas del valle, en los tres periodos. Únicamente en la subcuenca Tulantepec la disponibilidad es mínima, al presentarse valores menores a 0.5.

Respecto al maíz grano, la disponibilidad es mínima en las subcuencas Tulantepec y Cuauhtepic en los tres periodos, obteniendo valores menores a 0.5. Lo anterior debido a que estas subcuencas presentan la mayor densidad poblacional, lo cual limita el requerimiento mínimo necesario. No obstante, la subcuenca Cuauhtepic en el 2050 logra una disponibilidad media (0.52), debido a que la tasa de crecimiento poblacional no es muy alta.

En cuanto a la disponibilidad de tomate verde, esta es mínima en las subcuencas Acatlán, Tulantepec y Cuauhtepic, al reportarse valores entre 0.12 a 0.39, durante los tres periodos. El valor máximo se obtiene en el año 2050 en la subcuenca Barranca (4.07), debido a que en esta subcuenca se presenta la menor población y el mayor número de hectáreas destinadas a la producción de dicho cultivo.



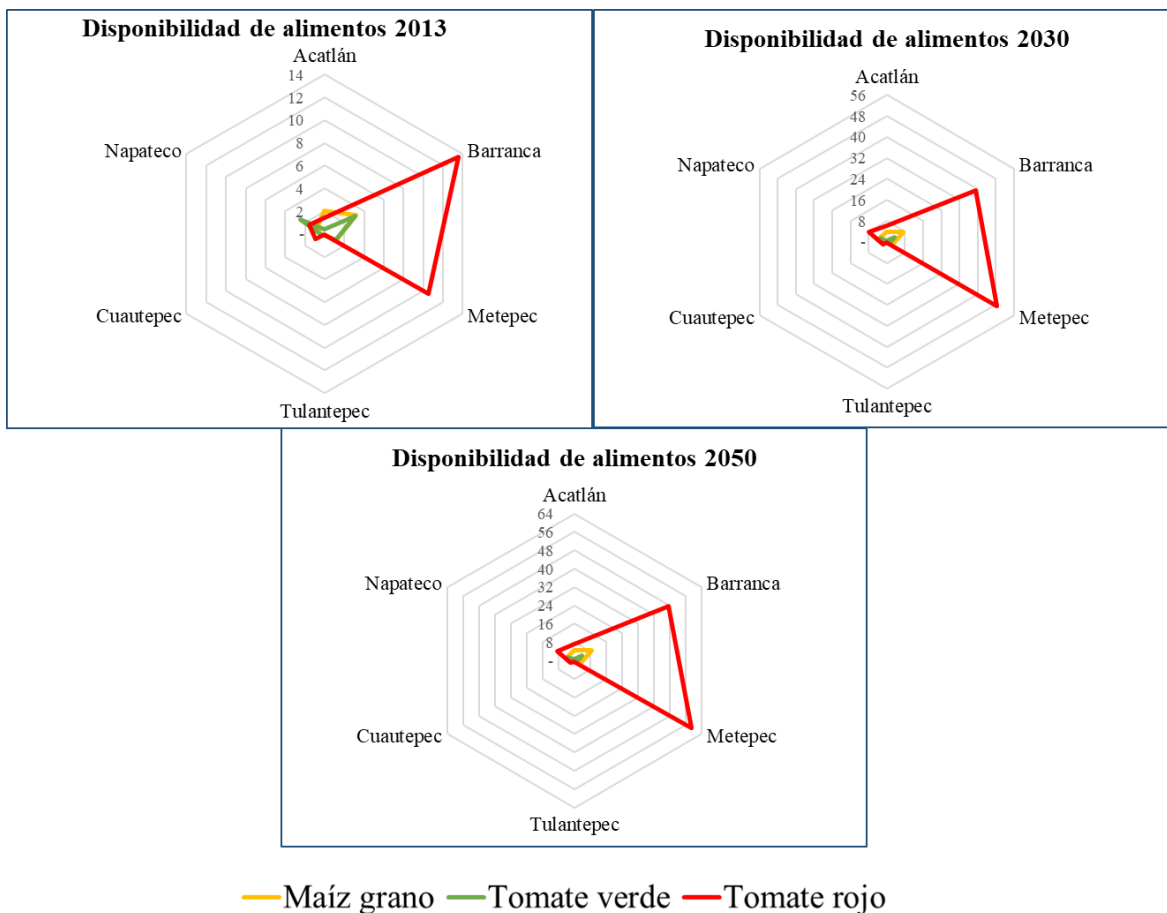


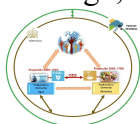
Figura 40. Indicador disponibilidad de alimentos del Valle de Tulancingo: escenario de referencia 2030 y 2050

En este sentido, se deben implementar medidas que ayuden a obtener un mayor rendimiento, específicamente en la producción de maíz grano de las subcuencas Tulantepec y Cuautepec, debido a que presentan graves problemas de disponibilidad de los tres cultivos.

Asimismo, se debe hacer un análisis más a fondo para saber si en las subcuencas donde se presenta una disponibilidad adecuada, también existe una accesibilidad a dichos alimentos, para garantizar existe una seguridad alimentaria en el valle de Tulancingo.

6.4.5. Índice del Nexo agua-alimentos en el valle de Tulancingo

La finalidad de este índice es fomentar la agricultura sustentable, minimizar el daño ambiental y garantizar una distribución justa de los recursos. Resaltando que el indicador con mayor impacto en el Nexo agua-alimentos en el valle de Tulancingo, es el consumo de agua ($m^3/cultivo$), seguido



de la productividad del agua, la cual nos indica cuánta agua se requiere para producir un kilogramo de cada cultivo, la disponibilidad de alimentos y finalmente la productividad económica del agua. Hallazgos que se detallan en la Figura 41.

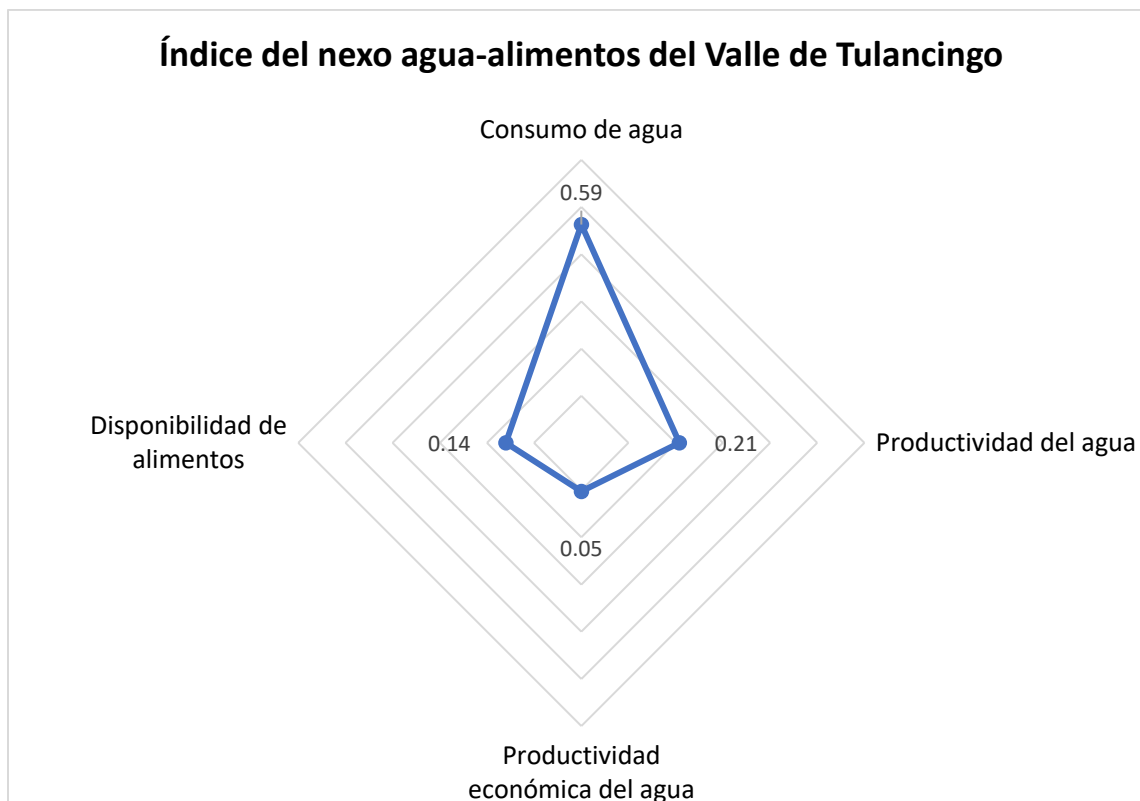


Figura 41. Índice del Nexo agua-alimentos del valle de Tulancingo

6.4.6. Resultados de indicadores para el bienestar ecológico y humano

Se identificó el uso de 37 indicadores de sustentabilidad a nivel global, de los cuales 20 son clave para determinar el Bienestar ecológico, como son: (1) huella hídrica total, (2) consumo de agua para la producción agropecuaria, (3) entorno ecológico, (4) acciones ambientales, (5) huella ecológica, (6) disponibilidad de agua, (7) extracción de agua, (8) importación de agua, (9) saneamiento de agua, (10) calidad del agua, (11) sistemas de riego, (12) eficiencia en el uso del agua, (13) recolección de agua de lluvia, (14) huella territorial, (15) recursos utilizados en la producción (agroquímicos), (16) huella de fósforo, (17) uso de la tierra, (18) generación de residuos, (19) huella de carbono y (20) huella de nitrógeno.



Con respecto al Bienestar humano se detectaron 17 indicadores: (1) acceso a los alimentos (considerándose como eje central de la inseguridad alimentaria), (2) acceso al agua, (3) consumo de alimentos, (4) gasto per cápita en alimentos, (5) precio del agua, (6) costos de producción, (7) importación de alimentos, (8) producción sustentable (rendimiento de cultivos), (9) mano de obra, (10) huella material, (11) acceso a saneamiento de agua, (12) analfabetismo, (13) organización de productores, (14) asistencia técnica, (15) desempleo, (16) disponibilidad de alimentos y (17) impactos asociados a la salud.

En la Tabla 33 se detalla la dimensión, el aspecto y el porcentaje de estudios donde se emplearon cada uno de los indicadores para evaluar si existe un nivel de sustentabilidad con un enfoque de Nexo agua-alimentos.

Tabla 33. Indicadores reportados para evaluar la sustentabilidad del Nexo agua-alimentos

Enfoque	Dimensión	Aspecto	Indicador	Porcentaje (%)
Ecológico	Agua	Consumo	Huella hídrica total	35
			Agua para producción agropecuaria	28
		Dotación	Disponibilidad de agua	23
			Extracción de agua	9
			Importación de agua	5
		Saneamiento	Tratamiento de agua	9
			Calidad del agua	7
		Eficiencia física	Sistemas de riego	2
			Uso del agua	7
			Recolección de agua de lluvia	5
	Suelo	Consumo	Huella territorial	33
			Insumos para producción agrícola	12
			Huella de fósforo	2
			Uso de la tierra	14
		Gestión	Generación de residuos	7
	Aire	Consumo	Huella de carbono	23
			Huella de nitrógeno	2
	Ecosistema	Disponibilidad	Entorno ecológico	14
			Acciones ambientales	9
		Consumo	Huella ecológica	7



Enfoque	Dimensión	Aspecto	Indicador	Porcentaje (%)
Humano	Seguridad alimentaria	Autosuficiencia	Acceso a los alimentos	21
		Disponibilidad	Acceso al agua	28
			Consumo de alimentos	12
	Economía	Cantidad	Gasto per cápita en alimentos	5
			Precio del agua	5
			Costos de producción	2
		Dotación	Importación de alimentos	9
			Producción sustentable	16
		Cobertura	Mano de obra	2
	Consumo	Huella material	2	
	Población	Cobertura	Acceso a saneamiento de agua	14
			Analfabetismo	2
			Organización de productores	2
			Asistencia técnica	2
			Desempleo	5
	Salud	Gestión	Disponibilidad de alimentos	21
			Impactos asociados a la salud	16

Fuente: elaboración propia con base en bibliografía especializada consultada.

En la dimensión Bienestar ecológico, se detectó que el 35% de los artículos comentan que la huella hídrica total es el indicador más empleado y eficaz para determinar la sustentabilidad en el estudio del Nexo agua-alimentos.

En segundo orden de relevancia, se identificaron los indicadores huella territorial (33%) y huella de carbono (23%) como aquellos más empleados en investigaciones que evalúan la sustentabilidad en el Nexo. Se destaca el estudio realizado por Vanham y Bidoglio (2013), en el cual se sistematizaron los estudios de huellas publicados y se definió una familia de huellas que pudieran usarse para la evaluación de la sustentabilidad ambiental. También se identificaron superposiciones entre diferentes huellas y se analizó cómo se relacionan con los nueve límites planetarios para identificar la sustentabilidad local y planetaria.

Al igual que Hatjiathanassiadou et al. (2023), ponen como ejemplo el empleo de las huellas ambientales para evaluar el impacto ambiental a escala global. También sobresale el trabajo de Arthur et al. (2019), en el cual se revisa el estado del arte sobre los indicadores del nexo urbano,



clasificando los indicadores en tres grupos: aquellos que miden los flujos de recursos (52%); los que cuantifican los impactos ambientales (13%) y los que involucran aspectos de eficiencia (29%).

En tercer orden de implementación, destacan los indicadores que hacen referencia al consumo y disponibilidad de agua, reportándose el empleo de este indicador en un 28% y 23% respectivamente de los artículos revisados. Es fundamental hacer hincapié tanto en la gestión inteligente del agua como en la agricultura de precisión, el uso extensivo de tecnologías para capturar gases de efecto invernadero, la implementación de fuentes de energía renovable en la producción, así como la protección de los ecosistemas terrestres. Todo ello con el objetivo de lograr una gestión ecológicamente racional de los recursos naturales y los residuos generados (López-López y Cruz-Mejía, 2019; Papadopoulou et al., 2022).

Asimismo, Ferreira De Melo y Vieira Guimarães (2018), a través de la construcción de un índice para determinar el nivel de cada una de las dimensiones de la sustentabilidad, destacan el uso de indicadores como: porcentaje de pérdida de cobertura vegetal original, disponibilidad de agua potable, acceso a saneamiento de agua y recolección de residuos, mismos que fueron identificados en esta investigación. Respecto al bienestar humano, los indicadores más mencionados en la revisión fueron, en primer lugar, el acceso al agua (28%), al considerarse este recurso vital tanto para la sobrevivencia humana como para lograr un impacto positivo en el desarrollo sustentable de una región.

En segundo lugar, destacaron los indicadores de acceso y disponibilidad de alimentos, analizándose cada uno de ellos en 21% de los artículos, como un indicador clave para determinar la seguridad alimentaria de una población. Finalmente, los indicadores producción sustentable y los impactos asociados a la salud (16%) recibieron el mismo número de menciones, subrayando su importancia en la evaluación del Bienestar humano y necesarios para identificar la sustentabilidad en el Nexo.

De igual forma, López-López y Cruz Mejía (2019) resaltan que para determinar la sustentabilidad de una región en la dimensión económica es de suma importancia el empleo de indicadores como acceso a una alimentación adecuada, lo cual tiene concordancia con los hallazgos encontrados en esta investigación para determinar el Bienestar humano.



Se demuestra que emplear una metodología de clasificación como es la barométrica permite una mejor selección de los indicadores, en este caso en dos grandes dimensiones: bienestar ecológico y bienestar humano, los cuales están estrechamente relacionados y cuentan con los mismos principios que el enfoque Nexo agua-alimentos.

6.4.7. Indicadores de sustentabilidad con enfoque Nexo agua-alimentos a nivel regional

Al realizar un análisis de la implementación, datos necesarios y, tomando en cuenta el aspecto y la dimensión del Barómetro de la sustentabilidad, de los 37 indicadores que se utilizan a nivel global, se consideró que, son nueve indicadores los más factibles regionalmente para verificar la sustentabilidad del Nexo agua-alimentos.

Destacando que, en México, no se han realizado estudios donde se empleen indicadores de sustentabilidad con un enfoque de Nexo a nivel regional. Esto brinda la oportunidad de utilizar los recursos de manera eficiente y, con ello, poder implementar medidas de adaptación o mitigación que contribuyan a lograr la seguridad hídrica y alimentaria en la zona a evaluar.

En este sentido, en la Tabla 34 se presentan las posibles ventajas y limitantes de aplicar cada uno de los indicadores seleccionados y las fuentes de información oficiales en México, para obtener los datos requeridos en una evaluación a nivel regional.



Tabla 34. Ventajas y limitantes de indicadores de sustentabilidad del nexo agua-alimentos

Enfoque	Indicador y Nivel de aplicación	Ventajas	Limitantes	Obtención de información y datos requeridos
Bienestar ecológico	Huella hídrica total Nivel: regional	<p>Evalúa el consumo total y contaminación del agua dulce.</p> <p>Considera el componente verde, azul y gris del uso del agua del cultivo.</p>	<p>Se requiere información a escala municipal, local o unidad de producción.</p> <p>No evalúa el impacto ambiental.</p>	<p>Comisión Nacional del Agua, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Servicio Meteorológico Nacional.</p> <p>Datos: Climáticos; parámetros productivos, rendimiento de cultivo; mapas de suelo, riego; tasas de aplicación de fertilizantes, pesticidas; fracción de lixiviación y escorrentía; concentraciones naturales en masas de agua receptoras y agua extraída.</p>
	Huella territorial Nivel: nacional y regional	Cuantifica la presión ejercida por el uso del suelo para la producción de alimentos.	No cuantifica la toxicidad humana y ambiental.	<p>Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.</p> <p>Datos: Superficie cultivada; rendimiento y población total.</p>
	Huella de carbono Nivel: nacional y regional	Se puede aplicar en diferentes escalas. Se relaciona con las causas del calentamiento global.	No considera otros problemas ambientales.	<p>Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.</p> <p>Datos: Cantidad de gases GEI emitidos por cada tipo de actividad.</p>
	Entorno ecológico Nivel: nacional y regional	Se mide desde una perspectiva de valor agregado considerando la cobertura forestal como vegetación natural potencial.	Sólo cuantifica la degradación o pérdida del suelo y no el nivel total de perturbación del ecosistema.	<p>Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Sistemas de Información Geográfica.</p> <p>Datos: Uso de suelo y vegetación.</p>



Enfoque	Indicador y Nivel de aplicación	Ventajas	Limitantes	Obtención de información y datos requeridos
Bienestar humano	Acceso a los alimentos (inseguridad alimentaria) Nivel: nacional y municipal	Permite conocer si se cuenta con acceso físico y económico del recurso a nivel municipal.	No proporciona información del aprovechamiento del recurso en forma sustentable.	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. Literatura especializada. Datos: Niveles de inseguridad alimentaria estatal o municipal.
	Acceso al agua Nivel: regional	Indica la proporción de bienestar humano de una población y el impacto positivo en el desarrollo sustentable.	Información disponible en número de viviendas y se debe estimar el número de habitantes por vivienda.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Datos: Número de personas que cuentan con acceso al agua potable en su vivienda.
	Producción sustentable Nivel: nacional y regional	Proporciona información detallada de las técnicas sustentables que emplean los agricultores para la producción de alimentos.	Se requiere información a escala de unidad de producción y establecer criterios que determinen si el sistema es sustentable o no.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía, unidades de producción. Datos: Rendimiento de los cultivos, insumos empleados en la producción.
	Acceso a saneamiento de agua Nivel: regional	Permite conocer la calidad del agua, su reúso y las fuentes de abastecimiento.	La información se proporciona a nivel de plantas de tratamiento y todos los procesos que se llevan a cabo son bajo esta misma escala.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Datos: Número de personas beneficiadas con el saneamiento del agua en su zona.
	Disponibilidad de alimentos Nivel: nacional	Se puede adaptar y emplear a cualquier escala. Aporta información sobre desnutrición y tipo de alimentación.	Estimación de energía dietética requerida por una persona, basada en la literatura especializada.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Secretaría de Salud. Datos: kcal/persona/día; población total.

Fuente: elaboración propia con base en información documental.



Cabe señalar que específicamente en México se han implementado acciones para lograr un desarrollo sustentable y una mejor gestión del recurso agua, a través de iniciativas como la implementación de indicadores del Programa Hídrico Nacional 2020-2024 en México. Estos se han enfocado en evaluar la cobertura, calidad y saneamiento del agua a nivel nacional. Destacando el avance de proyectos de infraestructura hidráulica, la modernización del sector agrícola mediante la rehabilitación y tecnificación de distritos de riego y la priorización del abastecimiento de agua para consumo humano.

En este contexto, dichos esfuerzos resultan fundamentales para el desarrollo sustentable del territorio, dado que abordan de manera directa la disponibilidad y el uso eficiente de un recurso vital.

6.4.8. Indicadores de sustentabilidad en el Nexo agua-alimentos y su relación con los ODS

En la Figura 42 se puede apreciar la asociación que existe entre cada indicador identificado en los artículos analizados y la meta a cumplir de los ODS, detectándose que el tema impacta en 10 ODS de los 17 que se propusieron a nivel global. Impactando sobre todo en el ODS 6 que hace referencia a lograr se tenga acceso y disponibilidad a agua limpia y saneamiento; el ODS 2 hambre cero; ODS 1 fin de la pobreza; ODS 3 salud y bienestar; ODS 4 educación de calidad; ODS 8 trabajo decente y crecimiento económico; ODS 9 industria, innovación e infraestructura, ODS 12 producción y consumo responsable; ODS 13 acción por el clima y ODS 15 vida de ecosistemas terrestres.



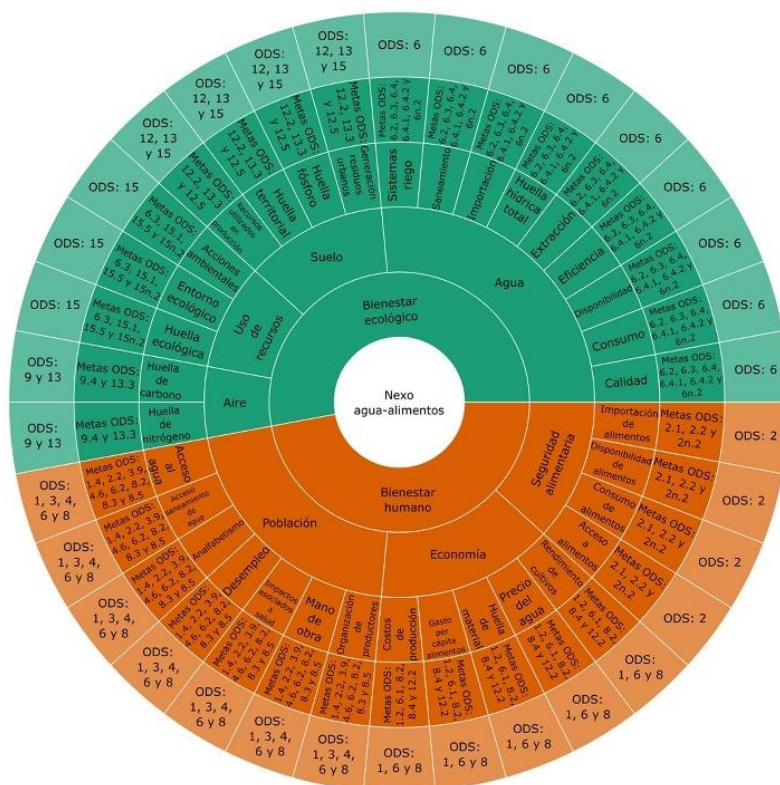
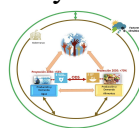


Figura 42. Indicadores de sustentabilidad del Nexo agua-alimentos y su relación con los ODS
 Fuente: elaboración propia a partir de resultados utilizando el *software* Python (2023) versión 3.12 y biblioteca de visualización Plotly (2025) versión 5.20.

Cabe destacar que se considera que los indicadores huella hídrica, huella territorial, huella de carbono y huella ecológica cumplen con la medición del progreso hacia los Objetivos de Desarrollo Sustentable debido a que estos “tienen la capacidad para cuantificar las presiones ambientales a lo largo de la cadena de suministro y su relación con el nexo agua-energía-alimentos-ecosistema” (Vanham et al., 2019).

Identificar estas herramientas de análisis ha facilitado la comprensión de las interdependencias, interconexiones e interacciones entre los recursos, fortaleciendo la coordinación, las complementariedades y las sinergias entre ellos. Un ejemplo es la huella hídrica de los cultivos, que tiende a aumentar con el tiempo y cuya evaluación implica considerar una serie de variables ambientales, económicas, sociales y culturales.



En este contexto, es importante destacar que el enfoque Nexo agua-alimentos, debido a su complejidad multidisciplinaria y a la amplia variedad de indicadores propuestos para evaluar la sustentabilidad, se beneficiaría aplicando una escala de indicadores (Corona-López, et al., 2021).

Del mismo modo, es crucial implementar indicadores de sustentabilidad a nivel regional para lograr un bienestar ecológico y social. Por ejemplo, en el Medio Oriente y Norte de África se ha evaluado el Nexo agua-energía-alimentos utilizando indicadores de pobreza alimentaria, pobreza hídrica, productividad agrícola y sustentabilidad ambiental (Jemmali et al., 2021). Asimismo, (Papadopoulou et al., 2022) exploraron indicadores locales y recomendaron políticas que podrían mejorar la implementación de los ODS en Grecia.

Qian y Liang (2021) emplearon el sistema de evaluación científica bajo el marco presión-estado-respuesta. Luego, recurrieron a un modelo de grado de obstáculo para evaluar la evolución espacio-temporal y los obstáculos del índice de sustentabilidad del nexo provincial agua-energía-alimentos en una provincia de China.

Das et al. (2020) desarrollaron el Índice Nexo- Sustentabilidad (INE) que integra diferentes aspectos de la sustentabilidad en tres dimensiones clave: 1) ambiental: el uso de agua, energía; 2) social: el uso de la tierra, la mano de obra; 3) económica: indicadores de rendimiento, producción de alimentos per cápita. Este índice destaca cómo estas tres dimensiones se combinan para ofrecer una evaluación integral de la sustentabilidad.

Es importante destacar que la falta de datos multidimensionales a menudo complica el abordaje adecuado del Nexo y la integración de las tres dimensiones de la sustentabilidad (Arcoverde Balué et al., 2023).

En algunos casos, se detecta un número elevado de indicadores que podrían servir para evaluarla. Sin embargo, es crucial tener claro el objetivo de la investigación, los datos disponibles y la escala espacial del análisis. Esto permitirá desarrollar medidas que contribuyan a asegurar la seguridad hídrica y alimentaria en la región en cuestión. Además, una adecuada selección de indicadores representa una oportunidad para crear índices de sustentabilidad innovadores que estén alineados con el enfoque Nexo agua-alimentos.



VII. PERSPECTIVAS Y RECOMENDACIONES DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende tres sectores principales de uso del agua, lo que complejiza la gestión de los recursos hídricos. Las acciones de mitigación propuestas requerirán acciones de infraestructura adicionales, y se deberá calcular la relación beneficio-costos correspondiente para jerarquizar las primeras acciones, con el fin de prevenir el deterioro irreversible de los acuíferos y aumentar la recarga natural. Todo ello a través de la implementación de una gobernanza compleja y medidas complementarias.

Las acciones prioritarias incluyen planes de gestión de cuencas que promuevan el uso eficiente y racional tanto de las aguas subterráneas como de las superficiales, la gestión integrada del riego para reducir las pérdidas de suministro y la conservación de bosques y cuerpos de agua, todo ello esencial para la sostenibilidad hídrica.

A su vez, mejorar la infiltración mediante la recarga gestionada de acuíferos o transferir una porción de agua de las subcuencas superiores a las inferiores a través de una gobernanza coordinada y la participación de las partes interesadas son estrategias viables (Ríos Sánchez et al., 2024; Bassi & Chaturvedi, 2024; Abd Rani & Md Khalid, 2025).

Por otra parte, se deben implementar regulaciones de aguas residuales y gestión de la escorrentía urbana. La regulación eficaz de la generación y eliminación de aguas residuales en los sectores industrial y urbano es fundamental para prevenir la degradación ambiental. Lo anterior, debido a que los vertidos mal gestionados y la infraestructura urbana impermeable reducen la capacidad de infiltración. Medidas sostenibles a largo plazo para la gestión de la escorrentía urbana, como jardines de lluvia y sistemas de biorretención, se han utilizado en zonas semiáridas para mitigar los impactos ambientales y sociales (Majid et al., 2025; Lizárraga-Mendiola y Vázquez-Rodríguez, 2021).

Participación de las partes interesadas y gestión de la demanda. El éxito de cualquier técnica de ahorro de agua depende de una mayor concientización entre las partes interesadas (Zheng et al., 2024). Las campañas educativas desde la infancia y los instrumentos de gestión de la demanda, como las tarifas escalonadas para el sector servicios, son opciones viables para promover la conservación.



Como consideraciones puntuales, los hallazgos de la investigación conllevan a las siguientes acciones:

- ✚ Considerar que ciertas externalidades como son los eventos climáticos extremos o recurrentes, pueden afectar el modelo en el futuro.
- ✚ Es necesario un análisis a nivel de subcuenca para una adecuada gestión hídrica, debido a que sus características son diferentes.
- ✚ Se requiere un programa de reforestación o aumento de cobertura forestal en las subcuencas Barranca y Metepec, debido a que están a 0.99% y 3.32% respectivamente, de superficie forestal para lograr un entorno ecológico sostenible (Tan et al., 2022) y continuar sin estrés hídrico a largo plazo.
- ✚ La subcuenca Acatlán requiere mejorar la eficiencia de conducción y aplicación de riego agrícola, debido a que en ella se lleva a cabo la mayor actividad agropecuaria. Además de un revestimiento gradual de los canales de riego, se deben generar más sistemas de captación de agua, así como modificaciones en los sistemas hidráulicos ya existentes, para un uso más eficiente del recurso hídrico.
- ✚ La subcuenca Napateco debe mejorar el uso de agua superficial mediante el DDR28, debido a que el 75% de su extensión se localiza en esta subcuenca, lo cual disminuiría significativamente las extracciones subterráneas.
- ✚ Aumentar la eficiencia física urbana, así como la captación de agua dulce y la prevención de su contaminación, son medidas necesarias en las subcuencas Tulantepec y Cuauhtepec. Lo anterior porque al contar con la mayor densidad poblacional y ubicarse al sur del valle de Tulancingo, son la entrada de agua dulce del valle.
- ✚ Una vez identificadas las principales áreas de captación de agua de lluvia, como la subcuenca Cuauhtepec, se puede desarrollar un ordenamiento territorial de las áreas arboladas, mediante un rediseño del manejo de bosques para la captación de agua de lluvia y con ello, lograr un sistema más eficiente en el uso y gestión del agua.
- ✚ Considerar la implementación de invernaderos como una estrategia sustentable en el uso del agua, incorporando un riego eficiente, energías renovables y una recirculación. Debido a que el modelo de gestión que se emplee, va a determinar el grado de sustentabilidad que se logre.



VIII. CONCLUSIONES

El Valle de Tulancingo se consolida como una región de marcada vocación agropecuaria, donde más de la mitad de su superficie territorial se destina a la agricultura de temporal (50.3%) y una proporción relevante a la agricultura de riego (14.9%). En términos productivos, sobresale el cultivo de maíz grano blanco en todos los municipios que integran el valle, seguido por pastos y praderas, cebada y alfalfa, lo que evidencia una fuerte orientación hacia la producción de forrajes y granos básicos.

Paralelamente, el sector pecuario presenta una participación significativa, con un volumen de producción de ganado en pie de 31 mil toneladas y una producción lechera anual cercana a 79 millones de litros. Asimismo, la dinámica económica regional se complementa con una importante actividad industrial, integrada por 257 industrias textiles, 177 empresas del sector alimentario y 209 dedicadas a la fabricación de materiales de construcción.

Desde la perspectiva del Nexo, el recurso agua constituye el eje estructurante del sistema productivo regional. El río Grande Tulancingo es su afluente principal, con un flujo de agua de sur a norte y su salida principal es la barranca de Metztlán. La región cuenta además con el Distrito de Riego 028, que cubre 824 hectáreas con agua superficial y dispone de un volumen anual concesionado de 13.3 hm³. Sin embargo, la principal fuente de abastecimiento es el acuífero de Tulancingo, del cual depende el suministro de agua potable para más de 250,000 habitantes. La distribución sectorial del volumen extraído refleja una marcada presión del sector primario, debido a que el 79% se destina a actividades agrícolas y ganaderas, mientras que el 19% corresponde al abastecimiento público urbano y apenas el 2% al uso industrial.

En conjunto, estas condiciones productivas e hídricas evidencian una alta demanda sobre los recursos disponibles, lo que ha impactado de manera directa en la disponibilidad del agua. La creciente presión derivada de las actividades agropecuarias, urbanas e industriales, aunada a la limitada oferta hídrica superficial, plantea un escenario de vulnerabilidad para el valle y el acuífero. En consecuencia, la sostenibilidad del recurso hídrico se perfila como un desafío prioritario, especialmente ante escenarios futuros de mayor demanda y posibles variaciones climáticas, que podrían comprometer el equilibrio entre disponibilidad y uso del agua en la región. Asimismo,



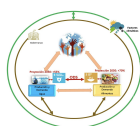
cualquier variación en la disponibilidad del recurso hídrico impactará simultáneamente la seguridad alimentaria y la estabilidad económica regional.

El modelo desarrollado se fundamentó en los conjuntos de datos oficiales disponibles. Cabe señalar que el valle de Tulancingo presenta una red meteorológica limitada, tanto en densidad espacial, como en continuidad temporal de los registros. La ausencia de series históricas completas y consistentes restringe la capacidad de generar proyecciones robustas de precipitación y temperatura, lo que incide directamente en la estimación de la evapotranspiración y, por ende, en la precisión del balance hídrico modelado. Las estaciones hidrométricas experimentan problemas operativos o daños en los instrumentos, lo que reduce la precisión de las mediciones de caudal y limita la precisión a escala de subcuenca.

No obstante, para reducir la incertidumbre asociada a estas restricciones, la investigación seleccionó el año 2013, debido a que contó con condiciones hidrometeorológicas favorables para llevar a cabo la calibración del modelo, lo que permitió obtener resultados consistentes dentro del marco de información disponible. Asimismo, se incorporó un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez del modelo ante variaciones en los parámetros y datos de entrada.

Si bien el modelo matemático desarrollado logró representar de manera adecuada la dinámica hidrológica del Valle de Tulancingo, los resultados obtenidos revelan una situación estructuralmente vulnerable. La evapotranspiración, que representa el 74% de los flujos de salida, confirma la dependencia del sistema a las condiciones agroclimáticas, lo que incrementa su exposición ante escenarios de variabilidad y cambio climático. La infiltración supera la escorrentía en todas las subcuencas, por el uso predominante agrícola y forestal del suelo, favoreciendo una mayor infiltración en todo el valle. Sin embargo, esta condición no garantiza una recarga suficiente frente a los niveles actuales de extracción.

El balance hídrico evidencia una tendencia preocupante: la demanda de agua subterránea (81.8%) supera ampliamente el aprovechamiento de fuentes superficiales, consolidando una fuerte dependencia del acuífero como eje del sistema productivo y urbano. Esta situación se agrava al considerar que el sector agropecuario concentra el 91% de la demanda hídrica total, proporción



significativamente mayor al promedio mundial (70%), lo que refleja una presión intensiva y poco diversificada sobre el recurso.

Más allá de la representatividad del modelo, los hallazgos ponen en evidencia un patrón de uso hídrico potencialmente insostenible. La creciente variabilidad de las precipitaciones, la reducción del 4% en los cuerpos de agua y la pérdida del 1.4% de la superficie forestal, configuran un escenario que compromete la capacidad de recarga natural y la resiliencia del sistema. En este contexto, la ausencia de estrategias integrales orientadas a equilibrar la extracción con la disponibilidad real del recurso podría profundizar los procesos de sobreexplotación y degradación ambiental.

En consecuencia, no se trata únicamente de optimizar el uso del agua, sino de replantear el modelo de gestión hídrica bajo criterios de sostenibilidad y corresponsabilidad sectorial. De no adoptarse medidas estructurales, el Valle de Tulancingo podría enfrentar desequilibrios cada vez más marcados entre oferta y demanda, con implicaciones directas para la seguridad hídrica, alimentaria y económica de la región.

Los modelos predictivos desarrollados en esta investigación proyectan un escenario de alta vulnerabilidad hídrica para el Valle de Tulancingo. Bajo la hipótesis de crecimiento continuo de la demanda en los sectores agropecuario, urbano e industrial, sumado a los efectos del cambio climático, se estima un déficit acumulado de 187.04 hm³ para el año 2050. Este escenario comprometería de manera directa la disponibilidad tanto de agua subterránea como superficial.

El análisis de subcuencas y sectores permitió la integración o adaptación de medidas específicas orientadas a reducir la sobreexplotación del acuífero de Tulancingo y disminuir las extracciones de agua superficial, promoviendo una transición hacia balances hídricos más sostenibles en el mediano y largo plazo.

Los resultados de simulación demuestran que la implementación conjunta de las medidas de mitigación propuestas, pueden revertir la tendencia deficitaria. Se proyecta un superávit acumulado de 252 hm³ al término del periodo de simulación, lo que evidencia que la sostenibilidad hídrica no depende únicamente de la disponibilidad natural del recurso, sino de la transformación



del modelo de gestión. No obstante, este resultado está condicionado a la adopción efectiva y sostenida de las medidas propuestas.

Entre las estrategias con mayor impacto destaca el incremento progresivo de la eficiencia global del riego agrícola al ser una zona de predominancia agrícola. De manera complementaria, las acciones orientadas a mejorar la eficiencia urbana e industrial, como la reducción de fugas, la captación de agua pluvial, la reutilización de aguas grises y la ampliación de plantas de tratamiento, constituyen medidas técnicamente viables y estratégicamente necesarias para reducir la presión sobre el acuífero.

En conjunto, los resultados sugieren que el futuro hídrico del Valle de Tulancingo no está determinado exclusivamente por factores climáticos, sino por decisiones de gestión y gobernanza. La inacción frente a las tendencias actuales podría profundizar los desequilibrios entre oferta y demanda; en contraste, una planificación integral y multisectorial, siguiendo el enfoque Nexo agua-alimentos, permitiría garantizar la disponibilidad sostenible del recurso hasta 2050 sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras.

A su vez, los indicadores que conforman el índice del Nexo agua-alimentos desarrollado en esta investigación constituyen una herramienta estratégica para analizar de manera integral la relación entre consumo hídrico, productividad agrícola y rentabilidad económica. A través de estos indicadores fue posible identificar cómo se distribuye el uso del agua por cultivo, evaluar el rendimiento en función del volumen consumido, determinar qué cultivos generan mayores beneficios netos con menor demanda hídrica y analizar la disponibilidad de alimentos en el valle. Todos estos indicadores se reflejaron en cada una de las medidas de mitigación propuestas, con la finalidad de fomentar la agricultura sustentable, minimizar el daño ambiental y garantizar una distribución justa de los recursos.

Asimismo, la evaluación de selección de indicadores de bienestar ecológico y humano para su futura aplicación en el valle de Tulancingo, guarda correspondencia con 10 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), lo que refuerza la pertinencia del enfoque adoptado. En este sentido, la articulación del enfoque Nexo agua-alimentos con las metas de los ODS demuestra ser una herramienta multidisciplinaria robusta para evaluar la sustentabilidad regional. Más allá del



análisis sectorial tradicional, este enfoque permite valorar de manera integrada el desarrollo hídrico y alimentario, evidenciando su viabilidad como instrumento para la planificación y la toma de decisiones orientadas al desarrollo sostenible.

Finalmente, dada la alta productividad y el continuo crecimiento del valle, restringir cualquiera de los tres sectores no es una opción factible. Es esencial una gestión eficiente e inclusiva de los recursos hídricos que optimice el agua disponible para satisfacer las necesidades de todos los sectores. Las estrategias propuestas buscan mantener la sostenibilidad al tiempo que apoyan el desarrollo de cada sector en el valle de Tulancingo.



IX. REFERENCIAS

- Abd Rani, M. N., & Md Khalid, R. (2025). Legal frameworks and mechanisms for resolving transboundary water disputes in Malaysia: insights from the Kedah-Penang Muda River dispute. *International Journal of Water Resources Development*, 41(3), 625–646. <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2443766>
- Adom, P. K., Nsabimana, A. and Reid, M. (2022). Rural access to electricity and welfare outcomes in Rwanda: Addressing issues of transitional heterogeneities and between and within gender disparities. *Resource and Energy Economics*, 70, 101333. doi:<https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2022.101333>
- Aguilar-Estrada, A. E. C.-C., Ignacio; Barrios-Puente, Gerónimo; Ortiz-Rosales, Miguel Ángel. (2019). ¿Hambre en México? Una alternativa metodológica para medir seguridad alimentaria. *Estudios Sociales*, 29(53), 1-22. doi:10.24836/es.v29i53.716
- Ahmad, R., Liu, G., Ur Rehman, S. A., Gao, Y., Meng, F., Zhou, X., . . . Cristiano, S. (2025). Integrated Systems Modeling for Assessing the Water–Energy Nexus in Pakistan: Lessons Learned From Coupling LEAP–WEAP Planning Approaches. *Engineering*. 50. 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.02.013>
- Ahmad, S., Waseem, M., Wahab, H., Khan, A. Q., Jehan, Z., Ahmad, I., & Leta, M. K. (2024). Assessing water demand and supply in the Upper Indus Basin using integrated hydrological modeling under varied socioeconomic scenarios. *Applied Water Science*, 15(1), 5. doi:10.1007/s13201-024-02310-3
- Almulla, Y.; Ramirez, C.; Pegios, K.; Korkovelos A.; Strasser, L.; Annukka Lipponen, A. and Howells, M. (2020). A GIS-Based Approach to Inform Agriculture-Water-Energy Nexus Planning in the North Western Sahara Aquifer System (NWSAS). *Sustainability*, 12, 7043. doi:10.3390/su12177043
- Al-Zu'bi, M., Mabhaudhi, T., Daher, B., & Brouziyne, Y. (2025). Inclusive policy development from the ground up: Insights from the household water-energy-food nexus. *Environmental Science & Policy*, 169. doi:10.1016/j.envsci.2025.104084
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper. No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- Ansari, A., Pranesti, A., Telaumbanua, M., Alam, T., Taryono, Wulandari, R. A., . . . Supriyanta. (2023). Evaluating the effect of climate change on rice production in Indonesia using a multimodal approach. *Heliyon*, 9(9), e19639. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19639>
- Aquae, 2021. Causas de la escasez de agua en el mundo. Available from: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/escasez-de-agua-en-el-mundo-naciones-unidas-advierte-que-la-demanda-crecera-hasta-un-30-por-ciento-en-2050/>
- Araya-Portuguez, K., & Fuentes-Quirós, G. F.-Q. (2024). Sistema de riego automatizado para zonas rurales. *Revista Tecnología en Marcha*, 37, 92-102. <https://doi.org/10.18845/tm.v37i5.7222>
- Árcega, I., Otazo, E., Galindo, E., Acevedo, O. y Romo, C. (2015). Determinación del índice de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC Caso: Acuífero del Valle de Tulancingo, Hidalgo, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(7). 39-49.
- Arcoverde Balué, Gustavo Felipe; Menezes Alves, Julia; Paz Arteiro, Mariana Gutierrez; Barros Danta, Jocilene; Guidolini Ferreira, Janaína; Branco Albiach, Evandro; De Andrade Ribeiro, Pedro; Pulice Paiva, Sergio Mantovani y Ometto Balbaud, Jean Pierre Henry (2023). Sustainability assessment of Cerrado and Caatinga biomes in Brazil: A proposal for collaborative index construction in the context of the 2030 Agenda and the Water-Energy-Food Nexus. *Frontiers in Physics*, 10, 1-25. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1060182>



- Arenas, M., Femeena, P. V., & Brennan, R. A. (2021). The Water-Energy-Food Nexus Discovery Map: Linking Geographic Information Systems, Academic Collaboration, and Large-Scale Data Visualization [Article]. *Sustainability*, 13(9), Article 5220. <https://doi.org/10.3390/su13095220>
- Armengot, Laura; Beltrán, María J.; Schneider, Monika; Simón, Xavier y Pérez-Neira, David (2021). Food-energy-water nexus of different cacao production systems from a LCA approach. *Journal of Cleaner Production*, 304, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126941>
- Arthur, Mercy; Liu, Gengyuan; Hao, Yan; Zhang, Lixiao; Liang, Sai; Asamoah, Ernest Frimpong y Lombardi, Ginevra Virginia (2019). Urban food-energy-water nexus indicators: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104481>
- Ascencio Ramirez, C., Burgos, A. M., & Lopez, K. (2020). Revisión sistemática de literatura en el uso de fluidos supercríticos para lograr una producción más limpia en la industria textil. *Ingeniería Industrial*(039), 119-140. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2020.n039.4918>
- Avila-Castañeda; Georgina Itandehui; Otazo-Sánchez, Elena María; Román-Gutiérrez, Alma Delia y Acevedo-Sandoval, Otilio Arturo. (2023) ¿Qué es el nexa agua-energía-alimentos?. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20), 29-35. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.10135>
- Azabache, Y., Rojas, K., Irigoín, S., Rodríguez, R. & Quispe, B. (2020). Proposal for a hydraulic system for reusing gray water that would reduce drinking water consumption in family homes. *Manglar* 17(2): 169-176. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2020.026>
- Azanaw, A., Birlie, B., Teshome, B., & Jemberie, M. (2022). Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100230>
- Bassi, N. and Chaturvedi, V. (2024). Balance hídrico y enfoque de distribución de beneficios para reducir el déficit hídrico en una cuenca fluvial de la India. *Revista Internacional de Desarrollo de Recursos Hídricos* , 40 (4), 604–626. <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2304291>
- Bayat, F., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, S. M. (2025). An integrated risk-based water-food-energy nexus assessment framework for surface water operation governance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 229, 109659. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109659>
- Bian, Z., & Liu, D. (2021). A Comprehensive Review on Types, Methods and Different Regions Related to Water-Energy-Food Nexus [Review]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), Article 8276. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168276>
- Bois, A. S., Boix, M., & Montastruc, L. (2024). Multi-actor integrated modeling approaches in the context of Water-Energy-Food Nexus systems: Review. *Computers & Chemical Engineering*, 182, 108559. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108559>
- Borge-Diez, D., Garcia-Moya, F. J., & Rosales-Asensio, E. (2022). Water Energy Food Nexus Analysis and Management Tools: A Review. *ENERGIES*, 15(3). doi:10.3390/en15031146
- Borrok, D. M., Chen, J., Eldardiry, H., & Habib, E. (2018). A Framework for Incorporating the Impact of Water Quality on Water Supply Stress: An Example from Louisiana, USA. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 54(1), 134-147. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12597>
- Botai, J. O., Botai, C. M., Ncongwane, K. P., Mpandeli, S., Nhamo, L., Masinde, M., . . . Mabhaudhi, T. (2021). A Review of the Water-Energy-Food Nexus Research in Africa [Review]. *Sustainability*, 13(4), Article 1762. <https://doi.org/10.3390/su13041762>
- Brouwer, Floor (2022). *Handbook on the Water-Energy-Food Nexus*. Edward Elgar Publishing. <https://bitly.cx/7MQd2>
- Calizaya, Mendoza and Copa. (2025). Hydrological bases for the natural resources conservation in the Lake Moa catchment, Bolivia. *Region - Water Conservancy*, 8(1), 78-93. <https://doi.org/10.32629/rwc.v8i1.3528>



- Cansino-Loeza, Brenda; Sánchez-Zarco, Xate Geraldine; Mora-Jacobo, Edgar Geovanni; Saggiante-Mauro, Frida Elizabeth; González-Bravo, Ramón; Mahlknecht, Jürgen y Ponce-Ortega, José María (2020). Systematic Approach for Assessing the Water–Energy–Food Nexus for Sustainable Development in Regions with Resource Scarcities. *Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(36), 13734-13748. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04333>
- CONAGUA. (2013). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales del acuífero Valle de Tulancingo, clave 1317. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5320583&fecha=04/11/2013#gsc.tab=0
- CONAGUA. (2014). Registro Público de Derechos de Agua. <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>
- CONAGUA. (2021). Monitor de sequía de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- CONAGUA. (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero valle de Tulancingo (1317), Estado de Hidalgo. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/hidalgo/DR_1317.pdf
- CONAGUA. (2025). Manuales de Operación y Especificaciones Técnicas del Programa de Apoyo a la Infraestructura Hidroagrícola S217. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/manuales-de-operacion-y-especificaciones-tecnicas>
- Conde-Báez, L., Castro-Rosas, J., Páez-Lerma, J.B., Villagómez-Ibarra, J.R. y Gómez-Aldapa, C.A. (2016). Uso de lactosuero ácido para la producción sustentable de aroma a rosas (2-feniletanol) con *Kluyveromyces marxianus*. *Revista Iberoamericana de ciencias*, 3 (5). 91-97.
- Consejo Estatal de Población (COESPO). (2023). Proyecciones de población. <https://poblacion.hidalgo.gob.mx/Proyec>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2025). Anexo estadístico de pobreza en México. https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/AE_pobreza_2022.aspx
- Corona-López, Evelyn; Román-Gutiérrez, Alma Delia; Otazo-Sánchez, Elena María; Guzmán-Ortiz, Fabiola Araceli y Acevedo-Sandoval, Otilio Arturo (2021). Water–food nexus assessment in agriculture: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 1-14. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094983>
- Correa-Porcel, V., Piedra-Munoz, L., & Galdeano-Gomez, E. (2021). Water-Energy-Food Nexus in the Agri-Food Sector: Research Trends and Innovating Practices [Article]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(24), Article 12966. <https://doi.org/10.3390/ijerph182412966>
- Chamizo-Checa, S., Elena Otazo-Sánchez, E., Gordillo-Martínez, A.J., González- Ramírez, C.A., Suárez-Sánchez, Muñoz-Nava, H. (2018). El cambio climático y la disponibilidad agua en sub-cuencas del Valle del Mezquital, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 5(5). 40-51.
- Chamizo-Checa, S., Otazo-Sánchez, E., Gordillo-Martínez, A., Suárez-Sánchez, J., González-Ramírez, C., & Muñoz-Nava, H. (2020). Megacity Wastewater Poured into A Nearby Basin: Looking for Sustainable Scenarios in A Case Study. *Water*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/w12030824>
- Chang, Y., Li, G., Yao, Y., Zhang, L., & Yu, C. (2016). Quantifying the Water-Energy-Food Nexus: Current Status and Trends. *ENERGIES*, 9(2). doi:10.3390/en9020065
- Chen, D., Zhang, P., Luo, Z., Zhang, D., Bi, B., & Cao, X. (2019). Recent progress on the water-energy-food nexus using bibliometric analysis [Article]. *Current Science*, 117(4), 577-586. <https://doi.org/10.18520/cs/v117/i4/577-586>
- Dalla Fontana, M., Wahl, D., Moreira, F. d. A., Offermans, A., Ness, B., Malheiros, T. F., & Di Giulio, G. M. (2021). The Five Ws of the Water-Energy-Food Nexus: A Reflexive Approach to Enable the



- Production of Actionable Knowledge [Review]. *Frontiers in Water*, 3, Article 729722. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.729722>
- Das, Aurobrata; Sahoo, Bhabagrahi y Panda, Sudhindra Nath (2020). Evaluation of Nexus-Sustainability and Conventional Approaches for Optimal Water-Energy-Land-Crop Planning in an Irrigated Canal Command. *Water Resources Management*, 34, 2329-2351. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02547-y>
- Dau, Q. V. and Adeloje, A. J., 2021. Water security implications of climate and socio-economic stressors for river basin management. *Hydrological Sciences Journal*, 66(7), 1097–1112. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1909032>
- Dehghanpir, S., Bazrafshan, O., Ramezani Etedali, H., Holisaz, A., Collins, B., and Soil, M., & Modeling, W. (2024). [in Persian] Evaluation of water stress index and water poverty in rice production based on the water footprint concept in Iran. 4, 18-35. doi:10.22098/mmws.2023.12116.1206
- De Las Heras Gutiérrez, Daniel; Adame Martínez, Salvador; Cadena Vargas, Edel Gilberto y Campos Alanís, Juan (2019). Sustentabilidad del desarrollo urbano en la Megalópolis de México: perspectiva desde el análisis espacial. *Economía Sociedad y Territorio*, 20(62), 89-122. <https://doi.org/10.22136/est20201441>
- Dessale, B. (2025). Quantifying Water-Food Nexus (Water Footprint) for Food Crop Production: A Case Study of Addis Ababa City. *Queios*, 7, 1-16. doi:10.32388/tkks5z.2
- Dias, I. Y., Lazaro, L. L., & Barros, V. G. (2023). Water–Energy–Food Security Nexus—Estimating Future Water Demand Scenarios Based on Nexus Thinking: The Watershed as a Territory. *Sustainability*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/su15097050>
- Dias-Turetta Ana Puala, G. G. T. a. c., Elaine Cristina Cardoso Fidalgo,, & Maria Tereza Leite Montalvão, R. B. P., Cláudia Moster, Bernadete da Conceição Pedreira, Joyce Maria Guimarães Monteiro, Alba Leonor da Silva Martins (2025). Assessing food, water, and energy security in the Atlantic Forest region of Brazil through the nexus approach. *Environmental and Sustainability Indicators*, 26, 100706. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100706>
- Dlamini, N., Senzanje, A., & Mabhaudhi, T. (2023). Assessing climate change impacts on surface water availability using the WEAP model: A case study of the Buffalo river catchment, South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46, 101330. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101330>
- Endo, A., Burnett, K., Orenco, P. M., Kumazawa, T., Wada, C. A., Ishii, A., . . . Taniguchi, M. (2015). Methods of the Water-Energy-Food Nexus [Article]. *Water*, 7(10), 5806-5830. <https://doi.org/10.3390/w7105806>
- Endo, A., Tsurita, I., Burnett, K., & Orenco, P. M. (2017). A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus [Review]. *Journal of Hydrology-Regional Studies*, 11, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.010>
- Endo, A., Kumazawa, T., Kimura, M., Yamada, M., Kato, T., & Kozaki, K. (2018). Describing and Visualizing a Water-Energy-Food Nexus System [Article]. *Water*, 10(9), Article 1245. <https://doi.org/10.3390/w10091245>
- Falkenmark, M. (1989). The Massive Water Scarcity Now Threatening Africa: Why Isn't It Being Addressed?. *Ambio*, 18(2), 112–118.
- FAO. (1996). Rome Declaration on World Food Security and World Food Summit Plan of Action. World Food Summit, Rome. <https://www.fao.org/4/w3613e/w3613e00.htm>
- FAO. (2019). GEMI – Monitoreo Integrado del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6. Metodología de monitoreo paso a paso para el Indicador 6.4.2. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e6b47153-2097-403e-bc49-2db9c164c474/content>
- FAO. (2024). Ensuring food security: why agency and sustainability matter. CFS HLPE on Food Security and Nutrition HLPE-FSN Secretariat, C/O FAO. Rome, Italy. <https://www.fao.org/cfs/cfs->



- hlpe/insights/news-insights/news-detail/ensuring-food-security--why-agency-and-sustainability-matter/en?utm_source=chatgpt.com
- FAO. (2025). Mapa del Hambre. Cartografía de la subalimentación y la inseguridad alimentaria en el mundo. FAO. <https://www.fao.org/interactive/hunger-map/es/>
- Fernandes Torres, C. J., Peixoto de Lima, C. H., de Almeida Goodwin, B. S., de Aguiar Junior, T. R., Fontes, A. S., Ribeiro, D. V., . . . Pinto Medeiros, Y. D. (2019). A Literature Review to Propose a Systematic Procedure to Develop "Nexus Thinking" Considering the Water-Energy-Food Nexus [Review]. *Sustainability*, 11(24), Article 7205. <https://doi.org/10.3390/su11247205>
- Fernández, V. (2022). Iniciarán la limpieza de resumideros de Tulancingo. *El Sol de Tulancingo*. <https://oem.com.mx/elsoldetulancingo/local/iniciaran-la-limpieza-de-resumideros-de-tulancingo-19118411>
- Ferreira De Melo, Amanda Estefânia y Vieira Guimarães, Ima Célia (2018). Sustentabilidade urbana na região metropolitana de Santarém, Pará, Brasil nos anos 2000 e 2010. *Economía Sociedad y Territorio*, 18(58), 763-795. <https://doi.org/10.22136/est20181238>
- Fetio Ngoune, N., Kanouo Djousse, B. M., Djoukeng, G. H., Tsague Mouafo, S., Tagny Tapa, A. L., Gouana Tedongmo, J., . . . Tchoffo, M. (2025). Energy, water and food nexus in the west region of Cameroon: Case of the Tchouadeng watershed. *Energy Nexus*, 18, 100451. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100451>
- Fuentes, C. A. (2021). Tecnificación del riego por gravedad: de la teoría a la práctica. <https://www.riego.mx/congresos/comeii2021/files/ponencias/extenso/COMEII-21025.pdf>
- Gai, B., Hirsh, S. B., Yang, E., Li, E. Y. C., & Hong-Yi. (2022). A Comprehensive Review of the Nexus of Food, Energy, and Water Systems: What the Models Tell Us [Review]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(6), Article 04022031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001564](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001564)
- Galindo, E., *et al.*, 2010. Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (10), 65–90. Retrieved from: <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/206>
- Golfam, P., & Ashofteh, P.-S. (2025a). Evaluation of the effect of the water-energy nexus on the performance of the water-energy supply system. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(7), 4040-4060. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-35928-0>
- Golfam, P., & Ashofteh, P.-S. (2025b). Prioritization of water-energy nexus scenarios using the development of D-number theory in multi-criteria analysis method. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36105-z>
- Gómez, A.A., 2010. *Rentabilidad e impacto ambiental de la quesería en el Valle de Tulancingo*, Hidalgo. Tesis (PhD). Universidad Autónoma Chapingo.
- Guerrero, R.W.J. (2010). La contaminación ambiental en Tulancingo y los retos ante el Cambio Climático. Recuperado de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa2/n8/e1.html>
- Grafton, R. Q., Williams, J., & Jiang, Q. (2015). Food and water gaps to 2050: preliminary results from the global food and water system (GFWS) platform. *Food Security*, 7(2), 209-220. doi:10.1007/s12571-015-0439-8
- Gutiérrez-Nava, J. A., Otazo-Sánchez, E. M., Román-Gutiérrez, A. D., & Acevedo-Sandoval, A. (2025). Sustainable urban water management index for developing countries. A case study in Puebla City, Mexico. *Journal of Urban Management*, 14(1), 105-120. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.09.007>
- Haji, M.; Govindan, R. and Al-Ansari, T. (2020). Novel approaches for geospatial risk analytics in the energy–water–food nexus using an EWF nexus node. *Computers and Chemical Engineering*, 140, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106936>



- Halaytsia, O., Vracholi, M., & Sauer, J. (2024). Assessing performance of crop producers from Water-Energy-Food-Environment Nexus perspective: A composite indicator approach. *Science of The Total Environment*, 935, 173436. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173436>
- Haque, M. S., Nahar, N., & Sayem, S. M. (2021). Industrial water management and sustainability: Development of SIWP tool for textile industries of Bangladesh. *Water Resources and Industry*, 25, 100145. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100145>
- Hatami, A., Farokhzadeh, B., & Bazrafshan, O. (2025). Water footprint and stress index assessment in Mediterranean agriculture. *Environ Monit Assess*, 197(3), 301. doi:10.1007/s10661-025-13687-2
- Hatjiathanassiadou, Maria; Rolim, Priscilla Moura; Seabra Jucá y Larissa Mont'Alverne (2023). Nutrition and its footprints: Using environmental indicators to assess the nexus between sustainability and food. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1078997>
- Hirko, D. B., Du Plessis, J. A., & Bosman, A. (2025). Review of machine learning and WEAP models for water allocation under climate change. *Earth Science Informatics*, 18(3), 310. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01820-1>
- Hoekstra Arjen Y.; Chapagain, Ashok. K.; Aldaya Maite M. y Mekonnen Mesfin M. (2011). Manual de evaluación de la huella hídrica. Establecimiento del estándar mundial. AENOR Internacional, S.A.U. <https://tinyurl.com/wcezx3kw>
- Hogeboom, Rick J.; Borsje, Bas W.; Deribe, Mekdelawit M.; van der Meer, Freek D.; Mehvar, Seyedabdolhossein; Meyer, Markus A.; Özerol, Gül; Hoekstra, Arjen Y. y Nelson, Andy D. (2021). Resilience Meets the Water-Energy-Food Nexus: Mapping the Research Landscape. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 1-18. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.630395>
- Hoolohan, C., McLachlan, C., & Larkin, A. (2019). 'Aha' moments in the water-energy-food nexus: A new morphological scenario method to accelerate sustainable transformation. *TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE*, 148. doi:10.1016/j.techfore.2019.119712
- iagua. (2025). ¿Cuánta agua subterránea hay en el mundo?: distribución por continentes y países?. https://www.iagua.es/respuestas/cuanta-agua-subteranea-hay-mundo-distribucion-continentes-y-paises?utm_source=chatgpt.com
- INEGI. (2013). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie V Conjunto Nacional. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s5ugw.html>
- INEGI. (2014). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
- INEGI, 2015. Guía para la interpretación de cartografía: Edafología: Escala 1:250 000 Serie III. Available from: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825231736>
- INEGI. (2016). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie VI Conjunto Nacional. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s5ugw
- INEGI. (2019). Encuesta Nacional Agropecuaria 2019. <https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2019/>
- INEGI. (2020). Censo de población y vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- INEGI. (2021). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie VII Conjunto Nacional. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s5ugw
- INEGI. (2023a). Continuo de elevaciones mexicano y modelos digitales de elevación. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2023b). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (IPCC). (2023). IPCC WGI Interactive Atlas. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional>



- Kalashnikova, O., Niyazov, J., & Nurbatsina, A. (2024). Hydrological Modeling in Studies of Mountain River Basins of Central Asia. *Georgian Geographical Journal*, 4(2), 38-47. <https://doi.org/10.52340/ggj.2024.04.02.05>
- Karimi, Z., & Talebi, A. (2023). Presentation of management responses regarding the strategy of improving the water resources status of Zayandeh Roud Watershed. doi:10.22034/iwm.2023.2013798.1110
- Jemmali, Hatem; Morrar, Rabeh y Ben Aissa, Mohamed Safouane (2021). The dynamic nexus between climate changes, agricultural sustainability and food-water poverty in a panel of selected MENA countries. *Journal of Water and Climate Change*, 12(1), 1-17. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.309>
- Kalashnikova, O., Niyazov, and Nurbatsina. (2024). Hydrological Modeling in Studies of Mountain River Basins of Central Asia. *Georgian Geographical Journal*, 4(2), 38-47. <https://doi.org/10.52340/ggj.2024.04.02.05>
- Kang, S.-K., Choi, S., Kim, G., & Choi, C. (2022). Application of Water Stress Indicator and Evaluation of Water Resource Development Indicator for Stream Flow Management in Dry Season. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 22, 343-350. doi:10.9798/KOSHAM.2022.22.6.343
- Khourchid, A. M., Mahmood, F., Al-Ghamdi, S. G., Ayyub, B. M., & Al-Ansari, T. (2024). National-level resilience: Innovative framework for Energy-Water-Food nexus evaluation. *Sustainable Production and Consumption*, 49, 589-605. doi:<https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.07.013>
- Kuzma S., Saccoccia L. and Chertock M. (2023). 25 Countries, Housing One-Quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress. <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>
- Lazaro, L. L. B., Bellezoni, R. A., Puppim de Oliveira, J. A., Jacobi, P. R., & Giatti, L. L. (2022). Ten Years of Research on the Water-Energy-Food Nexus: An Analysis of Topics Evolution. *FRONTIERS IN WATER*, 4. doi:10.3389/frwa.2022.859891
- Leck, H., Conway, D., Bradshaw, M., & Rees, J. (2015). Tracing the Water-Energy-Food Nexus: Description, Theory and Practice. *GEOGRAPHY COMPASS*, 9(8), 445-460. doi:10.1111/gec3.12222
- Lesser, I.J.M., Arellano, I.S., González, P.D. y Lesser, C.L.E. (2019). Balance y modelo del acuífero de Tulancingo, Hidalgo. *PDF Cities and Society*, 118, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106038>.
- Li, G., Wang, Y., & Li, Y. (2019). Synergies within the Water-Energy-Food Nexus to Support the Integrated Urban Resources Governance [Article]. *Water*, 11(11), Article 2365. <https://doi.org/10.3390/w11112365>
- Li, X., Huang, G., Wang, S., Li, Y., Zhang, X. & Luo, B. (2025). Development of an optimization-driven equilibrium model for managing water consumption and their socioeconomic effects. *Sustainable Cities and Society*, 118, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106038>.
- Lima-Quispe, N., Ruelland, D., Rabatel, A., Lavado-Casimiro, W., & Condom, T. (2025). Modeling Lake Titicaca's water balance: the dominant roles of precipitation and evaporation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(3), 655-682. <https://doi.org/10.5194/hess-29-655-2025>
- Lin, Y. Ch.; Lin, Ch. Ch.; Lee, M.; Chiueha, P. T.; Lo, S. L. and Liou, M. L. (2019). Comprehensive assessment of regional food-energy-water nexus with GIS- T based tool. *Resources, Conservation & Recycling*, 15, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104457>.
- Liu, S., & Zhao, L. (2022). Development and synergetic evolution of the water-energy-food nexus system in the Yellow River Basin [Article Early Access]. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20405-9>
- Lizárraga Mendiola L, & Gabriela A. Vázquez Rodríguez, C. A. B. A. (2021). Gestión sostenible de la escorrentía urbana por medio de jardines de lluvia en zonas semiáridas de México.
- Loeb, Barry L. (2016). Water-Energy-Food Nexus. *Ozone-Science and Engineering*, 38(3), 173-174. <https://doi.org/10.1080/01919512.2016.1166029>
- López López, C., Exebio-García, A., Flores-Velazquez, J., Bolaños-González, M., & Rubiños-Panta, J. (2025). Evaluación Comparativa del Índice de Estrés Hídrico Total (TWSI) y la Eficiencia del



- Requerimiento de Riego (WREI) en Cultivos Agrícolas Utilizando Huellas Hídricas e Información Meteorológica. *Revista Terra Latinoamericana*, 43, 1-21. doi:10.28940/terra.v43i.2209
- López-López, Maximiliano y Cruz-Mejía, Oliverio (2019). Metodología incluyente para la valoración equilibrada de proyectos productivos regionales. *Economía Sociedad y Territorio*, 19(61), 405-449. <https://doi.org/10.22136/est20191336>
- Lugo-N.B. y De la Cruz, M.E. (2018). Políticas ambientales en Hidalgo, México: un primer acercamiento. *Revista FACCEA* 8(2), 95-104.
- Majid, D., et al., 2025. Eco-friendly solutions for urban wastewater: evaluating constructed wetlands and filtration methods. *Advances in Environmental Technology*, 11(2), 182-194. <https://doi.org/10.22104/aet.2025.6887.1887>
- Mahmoodzadeh, D., et al., 2025. Assessment of water resources sustainability under unilateral development projects using WEAP model in transboundary river basins. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(10), 6130-6152. doi:10.1007/s11356-025-36063-6
- Marttunen, M., Mustajoki, J., Sojamo, S., Ahopelto, L., & Keskinen, M. (2019). A Framework for Assessing Water Security and the Water–Energy–Food Nexus—The Case of Finland. *Sustainability*, 11(10). doi:10.3390/su11102900
- Meneguzzo, F., Zabini, F., Albanese, L., & Crisci, A. (2019). Novel Affordable, Reliable and Efficient Technologies to Help Addressing the Water-Energy-Food Nexus [Article]. *European Journal of Sustainable Development*, 8(4), 1-17. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2019.v8n4p1>
- Molajou, Amir; Afshar, Abbas; Khosravi, Mina; Soleimani, Elham; Vahabzadeh, Masoud y Variani, Hossein Akbari (2021). A new paradigm of water, food, and energy nexus. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 107487-107497. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13034-1>
- Moncada, A. M., Escobar, M., Betancourth, A., Vélez Upegui, J. J., Zambrano, J., & Alzate, L. M. (2020). Modelling water stress vulnerability in small Andean basins: case study of Campoalegre River basin, Colombia. *International Journal of Water Resources Development*, 37(4), 640–657. <https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1699780>
- Mondal, K., Tantuway, R. B., Chatterjee, C., & Singh, R. (2023). Development of a water-energy-food nexus model for multiscale studies. *Irrigation and Drainage*, 72(5), 1356-1373. doi:10.1002/ird.2800
- Monmeneu, V.G. (2025). Diseño de un sistema que integra destilación por membranas para el tratamiento de 50 m³/día de aguas residuales textiles del proceso de blanqueo. Technical report. Universitat Politècnica de València.
- Montojo, M. (2020). Un estudio calcula que hace falta un 1% del PIB mundial para garantizar la disponibilidad de agua y saneamiento para todos. <https://es.weforum.org/stories/2020/01/un-estudio-calcula-que-hace-falta-un-1-del-pib-mundial-para-garantizar-la-disponibilidad-de-agua-y-saneamiento-para-todos/>
- Morchid, A., Et-taibi, B., Oughannou, Z., Alami, R. E., Qjidaa, H., Jamil, M. O., . . . Abid, M. R. (2025). IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events. *Scientific African*, 27, e02527. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02527>
- Morote, S.A.F. & Hernández-Hernández, M. (2017). El uso de aguas pluviales en la ciudad de Alicante. De viejas ideas a nuevos enfoques. *Papeles de Geografía*. 7-25. <http://hdl.handle.net/10045/73014>
- Nhamo, L., Mabhaudhi, T., Mpandeli, S., Nhemachena, C., Senzanje, A., Naidoo, D., . . . Modi, A. T. (2019). Sustainability Indicators and Indices for the Water-Energy-Food Nexus for Performance Assessment: WEF Nexus in Prac. doi:10.20944/preprints201905.0359.v1
- Nhamo, Luxon; Mabhaudhi, Tafadzwanashe; Mpandeli, Sylvester; Dickens, Chris; Nhemachena, Charles; Senzanje, Aidan; Naidoo, Dhesigen; Liphadzi, Stanley y Modi, Albert T (2020). An integrative



- analytical model for the water-energy-food nexus: South Africa case study. *Environ Science and Policy*, 109, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.04.010>
- Ortiz, E., & Villaseñor, J. L. (2025). Una propuesta de actualización del mapa de vegetación potencial de México. *Botanical Sciences*, 103(2), 381-393. <https://doi.org/10.17129/botsci.3598>
- Orts, F., del Río, A. I., Molina, J., Bonastre, J., & Cases, F. (2019). Study of the Reuse of Industrial Wastewater After Electrochemical Treatment of Textile Effluents without External Addition of Chloride. *International Journal of Electrochemical Science*, 14(2), 1733-1750. <https://doi.org/https://doi.org/10.20964/2019.02.27>
- Papadopoulou, Chrysaida-Aliki; Papadopoulou, Maria P. y Laspidou, Chrysi (2022). Implementing Water-Energy-Land-Food-Climate Nexus Approach to Achieve the Sustainable Development Goals in Greece: Indicators and Policy Recommendations. *Sustainability*, 14(7), 4100. <https://doi.org/10.3390/su14074100>
- Plotly Technologies Inc. (2025). Plotly.py (version 5.20). <https://n9.cl/ij7yw>
- Pourfallah Asadabadi, S., Sadeghi, S. H., Vafakhah, M., & Delavar, M. (2025). Significance of the Water-Energy-Food Nexus on the Watershed Health Status. *Water Resources Management*, 39(5), 2217-2250. doi:10.1007/s11269-024-04064-8
- PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses). (2023, 23 de octubre). Welcome to the PRISMA website. PRISMA. <https://www.prisma-statement.org/>
- Purwanto, A., Susnik, J., Suryadi, F. X., & de Fraiture, C. (2021). Water-Energy-Food Nexus: Critical Review, Practical Applications, and Prospects for Future Research [Review]. *Sustainability*, 13(4), Article 1919. <https://doi.org/10.3390/su13041919>
- Python Software Foundation (2023). Python (version 3.12). <https://n9.cl/tk6q>
- Qian, Xiang-Yan y Liang, Qiao-Mei (2021). Sustainability evaluation of the provincial water-energy-food nexus in China: Evolutions, obstacles, and response strategies. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103332. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103332>
- Rafiei Sardooi, E., Bazrafshan, O., & Jamshidi, S. (2023). Modeling the water security in a watershed using the water footprint concept and water scarcity indicators. *Water Supply*, 24, 235-253. doi:10.2166/ws.2023.323
- Rhouma, A., Seitfudem, G., El Jeitany, J., Pacetti, T., Brouwer, F., & Gil, J. M. (2025). Connecting the water footprint with the water-energy-food-ecosystems nexus concept and its added value in the Mediterranean. *Environmental and Sustainability Indicators*, 26, 100640. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100640>
- Ríos-Sánchez, K. I. (2025). El nexo agua - uso de suelo en el Valle Cuautitlán – Pachuca. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Ríos-Sánchez, K. I., Chamizo-Checa, S., Galindo-Castillo, E., Acevedo-Sandoval, O. A., González-Ramírez, C. A., Hernández-Flores, M. D., & Otazo-Sánchez, E. M. (2024). The Groundwater Management in the Mexico Megacity Peri-Urban Interface. *Sustainability*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/su16114801>
- Robati, Maryam y Rezaei, Fatemeh (2022). Applying the Sustainability Barometer Approach to Assess Urban Sustainability. *Urban Science*, 6(4), 85. <https://doi.org/10.3390/urbansci6040085>
- Rocha D.D.A, R. C. F. d. J., Gutiérrez P.J.A., Orozco M.I. (2024). Evaluación del estrés hídrico en el estado de Guanajuato considerando las demandas y la disponibilidad de las fuentes a través del índice de escasez hídrica. *Acta Universitaria*, 34, 1-14. doi:10.15174/au.2024.4035
- Rodríguez Cote, Erika Fernanda (2021). Análisis de la sustentabilidad en la vivienda de interés social en el municipio de Cuautlancingo, Puebla. [Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional. <https://tinyurl.com/428vf2yy>
- Romero, R.D.F. (2021). Propuesta de un sistema de tratamiento de aguas residuales de la industria textil por medio de humedales artificiales. Speciality Thesis in Environmental Management.



- Sadeghi, S. H., Sharifi Moghadam, E., Delavar, M., & Zarghami, M. (2020). Application of water-energy-food nexus approach for designating optimal agricultural management pattern at a watershed scale. *Agricultural Water Management*, 233, 106071.
- SAGARPA. (2017). Planeación Agrícola Nacional 2016-2030. [PDF] Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257069/Potencial-Cebada.pdf>
- Sánchez, A.L. (2025). Hidalgo sobrevive a sequías intensas durante una década. *El Sol de Hidalgo*. <https://oem.com.mx/elsoldehidalgo/local/hidalgo-sobrevive-a-sequias-intensas-durante-una-decada-22611523>
- Sangaré, L. O., Ba, S., Hu, N., Coulibaly, D., Konté, M. S., Ly, O., & Zheng, T. (2025). Hydrological simulation scenarios for predicting the future water status of the Niger River in Bamako, Mali, for sustainable development. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(9), 4957-4974. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-35980-w>
- SEMARNAT. (2023). Atlas Digital Geográfico. <https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/agua.html>
- Servicio Meteorológico Nacional. (SMN). (2023). Información Estadística Climatológica <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- SIAP. (2014). Anuario estadístico de la producción agropecuario y pecuaria. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SIAP. (2022). Anuario estadístico de la producción agropecuario y pecuaria. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SIAP. (2024). Anuario estadístico de la producción agropecuario y pecuaria. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Sharifi Moghadam, E., Sadeghi, S. H., Zarghami, M., & Delavar, M. (2023). Developing sustainable land-use patterns at watershed scale using nexus of soil, water, energy, and food. *Science of The Total Environment*, 856, 158935. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158935>
- Sharifi, S., Asakereh, A., Kiani Deh Kiani, M., & Janatrostami, S. (2025). Investigation, modeling, and optimization nexus of water, energy, and food in paddy production in Rasht County. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388507.665580>
- Sibale, D., Kranjac-Berisavljevic, G., & Abdul-Ganiyu, S. (2025). Evaluation of water delivery performance of the Bontanga irrigation scheme in the Northern Region of Ghana. *Water Practice & Technology*, 20(2), 298-313. <https://doi.org/10.2166/wpt.2025.01>
- Sieber, J. P., D. (2015). WEAP. Water Evaluation and Planning System. User Guide. Stockholm Environment Institute US Center: . http://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf
- SIEMENS. (2025). Siemens and Spinnova drive innovation and sustainability in textile manufacturing. <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-and-spinnova-power-innovation-and-sustainability-textile-manufacturing>
- Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas (SIGACUA), Mexico, 2023. *Disponibilidad por acuífero*. Available from: <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/hidalgo/hidalgo.html>
- Silva, T. L. D., Román, R. M. S., Sarjoughian, H. S., & Fard, M. D. (2023). Nexo água-energia-alimento nas bacias hidrográficas dos rios piracicaba, capivari e jundiá (pcj) sob condições históricas e de projeções de mudanças climáticas. *IRRIGA*, 28(4), 614-632. <https://doi.org/10.15809/irriga.2023v28n4p614-632>
- Simpson, G. B., & Jewitt, G. P. W. (2019). The Development of the Water-Energy-Food Nexus as a Framework for Achieving Resource Security: A Review. *Frontiers in Environmental Science*, 7, Article 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00008>



- Simpson, G. B., Jewitt, G. P. W., Becker, W., Badenhorst, J., Masia, S., Neves, A. R., . . . Pascual, V. (2022). The Water-Energy-Food Nexus Index: A Tool to Support Integrated Resource Planning, Management and Security [Article]. *Frontiers in Water*, 4, Article 825854. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.825854>
- Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL). (2023) Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#
- Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas (SIGACUA). (2023). Disponibilidad por acuífero. <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/hidalgo/hidalgo.html>
- Sun, G., McNulty, S. G., Moore Myers, J. A., & Cohen, E. C. (2008). Impacts of multiple stresses on water demand and supply across the Southeastern United States 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(6), 1441-1457.
- Susnik, J. (2022). Editorial: (10 Years) Water-Energy-Food Nexus: Advances in W-E-F Nexus Approaches From the Global South: From Theory to Practice [Editorial Material]. *Frontiers in Water*, 4, Article 926124. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.926124>
- Tan, Nairong; Wang, Xiaolei; Wang, Hao; Gao, Zhuoqun; Chang, Xiaoying y Ma, Tao (2022). Downscaling of planetary boundaries and sustainability management: A nexus analysis of water, land and major functions at the national-provincial level. *Sustainable Horizons*, 3, 100028. <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2022.100028>
- Torres S.S.L., et al., 2020. Optimización de recursos en la producción de forrajes distrito de riego 028 Tulancingo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 24, 153-163. Retrieved from <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2366/3077>
- UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales). (1997). Mapeo analítico, reflexivo y participativo de la sostenibilidad MARPS. UICN. <https://tinyurl.com/bddhut92>
- UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification) (2023, 30 de noviembre). Los datos de la sequía muestran “una emergencia sin precedentes a escala planetaria”: ONU. UNCCD. <https://tinyurl.com/2m6me2j7>
- Vanham, Davy; Leip, Adrian; Galli, Alessandro; Kastner, Thomas; Bruckner, Martin; Uwizeye, Aimable; van Dijk, Kimo; Ercin, Ertug; Dalin, Carole; Brandão, Miguel; Bastianoni, Simone; Fang, Kai; Leach, Allison; Chapagain, Ashok; Van der Velde, Marijn; Sala, Serenella; Pant, Rana; Mancini, Lucia; Monforti-Ferrario, Fabio; Carmona-Garcia, Gema y Hoekstra, Arjen Y. (2019). Environmental footprint family to address local to planetary sustainability and deliver on the SDGs. *Science of the Total Environment*, 693, 133642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133642>
- Vanham, Davy y Bidoglio, Giovanni (2013). A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecological Indicators*, 26, 61-75. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.021>
- Vardon, M., Lien, L.T.H., Martinez-Lagunes, R., Batlokwa, P.O., Schenau, S., May, S., Quentin, G.R. (2025). Accounting for water: A global review and indicators of best practice for improved water governance, *Ecological Economics*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108396>.
- Venghaus, S., & Dieken, S. (2019). From a few security indices to the FEW Security Index: Consistency in global food, energy and water security assessment. *Sustainable Production and Consumption*, 20, 342-355. doi:<https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.08.002>
- Veettil, V., Mishra, V.A. (2018). Potential influence of climate and anthropogenic variables on water security using Blue and Green water scarcity, Falkenmark Index, and Freshwater Provision Indicators. *Journal of Environmental Management*, 228. doi:10.1016/j.jenvman.2018.09.012
- Wang, L., Ma, L., Wang, J., Zhao, X., Jing, Y., Liu, C., Xiao, Y., Li, C., Jiao, C., & Xu, M. (2024). Research Progress on the Removal of Contaminants from Wastewater by Constructed Wetland Substrate: A Review. *Water*, 16(13), 1848. <https://doi.org/10.3390/w16131848>



- Wang, Y., Xie, Y., Qi, L., He, Y., & Bo, H. (2022). Synergies evaluation and influencing factors analysis of the water–energy–food nexus from symbiosis perspective: A case study in the Beijing–Tianjin–Hebei region. *Science of The Total Environment*, 818, 151731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151731>
- Wang, Yihui; Jiao, Aiquan; Qiu, Cha; Liu, Qing; Yang, Yueyue; Bian, Shichao; Zeng, Fangye y Jin, Zhengyu (2022). A combined enzymatic and ionic cross-linking strategy for pea protein/sodium alginate double-network hydrogel with excellent mechanical properties and freeze-thaw stability. *Food Hydrocolloids*, 131, 107737. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107737>
- Wolde, Z., Wu, W., Ketema, H., Karikari, B., & Liu, X. S. (2022). Quantifying Sustainable Land-Water-Energy-Food Nexus: The Case of Sustainable Livelihoods in an East African Rift Valley. *Atmosphere*, 13(4), Article 638. <https://doi.org/10.3390/atmos13040638>
- Yupanqui, C., Dias, N., Goodarzi, M. R., Sharma, S., Vagheei, H., & Mohtar, R. (2025). A review of water-energy-food nexus frameworks, models, challenges and future opportunities to create an integrated, national security-based development index. *Energy Nexus*, 18, 100409. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100409>
- World Bank Group. (W.B.G.). (2022). Water resources management. <https://www.worldbank.org/en/topic/waterresourcesmanagement>
- Yin, C., Hsiao, B., & See, K. F. (2024). Efficiency analysis of China’s urban water supply utilities using a dynamic multiactivity network DEA model. *Structural Change and Economic Dynamics*, 71, 387-404. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2024.07.001>
- Zhang, C., Chen, X., Li, Y., Ding, W., & Fu, G. (2018). Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies. *Journal of cleaner production*, 195, 625-639. doi:10.1016/j.jclepro.2018.05.194
- Zheng, H., Wang, H., He, H., Wu, Y., Delang, C. O., Wu, J., . . . Gomez, C. (2024). Quantifying the heterogeneity of urban water resources utilization efficiency through meta-frontier super SBM model: Application in the Yellow River Basin. *Journal of Cleaner Production*, 485, 144410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144410>
- Zotarelli, L., *et al.*, 2018. Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). Agricultural and Biological Engineering Department, UF/IFAS Extension. Available from: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/ae/ae45900.pdf>



X. ANEXOS

PRODUCTOS REALIZADOS DURANTE EL DOCTORADO

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA EN EVENTOS ACADÉMICOS

Avila-Castañeda, G. I. (2024). Balance hídrico del Valle de Tulancingo, Hidalgo mediante el Sistema de Evaluación y Planificación del Agua. “3er Congreso Internacional para el manejo de la contaminación ambiental”. Organizado por la Universidad Nacional Autónoma de México el 07 de noviembre de 2024 en formato presencial.

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
La División de Ingenierías Civil y Geomática otorga la presente:

CONSTANCIA

a: *Ávila Castañeda Georgina Itandehui*

Por su participación en el 3ER CONGRESO INTERNACIONAL PARA EL MANEJO DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL, como Autor(a) del trabajo titulado "Balance hídrico del Valle de Tulancingo, Hidalgo mediante el Sistema de Evaluación y Planificación del Agua" en modalidad de Conferencia Técnica, realizado en Ciudad Universitaria, Ciudad de México el 7 de noviembre de 2024.

M.I. Octavio García Domínguez
JEFE DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA

M.I. Marisol Alfonso Romero
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

Dr. Luis Antonio García Villanueva
ORGANIZADOR RESPONSABLE DEL EVENTO
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2024

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA EN EVENTOS ACADÉMICOS

Avila-Castañeda, G. I. (2024). El Nexo agua-energía-alimentos: desafíos y soluciones para la justicia hídrica. “V Congreso Latinoamericano de Ecología Política. Ecología política y nuevos horizontes de rebeldía: enraizando saberes, r-existencias y alternativas”. Organizado por del 04 al 06 de diciembre de 2024 en formato presencial.



V Congreso Latinoamericano de Ecología Política
*Ecología política y nuevos horizontes de rebeldía: enraizando saberes,
r-existencias y alternativas*

CONSTANCIA

Georgina Itandehui Ávila Castañeda

Por haber presentado la ponencia titulada: El Nexo agua-energía-alimentos: desafíos y soluciones para la justicia hídrica, en la Mesa Temática: Justicia hídrica: conflictos socioambientales y movimientos en defensa del agua (3), en el marco del V Congreso Latinoamericano de Ecología Política, llevado a cabo del 4 al 6 de diciembre de 2024 en la Ciudad de México.

Ciudad de México a 6 de diciembre 2024

Por el Comité Organizador

Aida Luz López Gómez
Universidad Autónoma de la Ciudad de México

Mina Lorena Navarro
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla



PRODUCCIÓN CIENTÍFICA EN EVENTOS ACADÉMICOS

Avila-Castañeda, G. I. (2024). El papel de los indicadores en la construcción de un Bienestar humano y sociedades saludables. “V Congreso Latinoamericano de Ecología Política. Ecología política y nuevos horizontes de rebeldía: enraizando saberes, r-existencias y alternativas”. Organizado por del 04 al 06 de diciembre de 2024 en formato presencial.



V Congreso Latinoamericano de Ecología Política
Ecología política y nuevos horizontes de rebeldía: enraizando saberes, r-existencias y alternativas

CONSTANCIA

Georgina Itandehui Ávila Castañeda

Por haber presentado la ponencia titulada: El papel de los Indicadores en la construcción de un Bienestar humano y sociedades saludables, en la Mesa Temática: Colectivos de consumidores urbanos hacia la soberanía alimentaria, en el marco del V Congreso Latinoamericano de Ecología Política, llevado a cabo del 4 al 6 de diciembre de 2024 en la Ciudad de México.

Ciudad de México a 6 de diciembre 2024

Por el Comité Organizador

Aida Luz López Gómez
Universidad Autónoma de la Ciudad de México

Mina Lorena Navarro
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla



PRODUCTO CIENTÍFICO PUBLICADO

Avila-Castañeda; G.I.; Otazo-Sánchez, E.M.; Román-Gutiérrez, A.D. y Acevedo-Sandoval, O.A. (2023) ¿Qué es el nexos agua-energía-alimentos?. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20), 29-35. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.10135>



DESDE 2013
<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive>
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI



ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 10 No. 20 (2023) 29-35

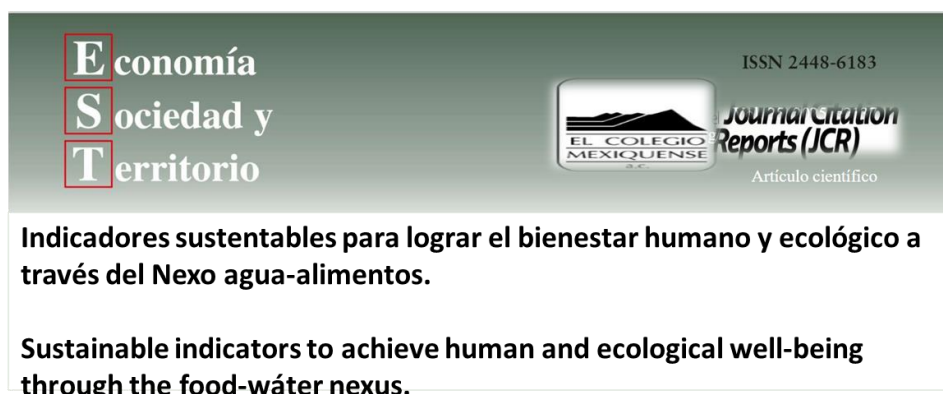
¿Qué es el nexos agua-energía-alimentos?
What is the water-energy-food nexus?

G.I. Avila-Castañeda^{a*} , A.D. Román-Gutiérrez^a , E.M. Otazo-Sánchez^a , O.A. Acevedo-Sandoval^a 



PRODUCTO CIENTÍFICO ACEPTADO

Avila-Castañeda, G.I., Román-Gutiérrez, A.D., Otazo-Sánchez, E.M. (2026). Indicadores para la sustentabilidad del Nexo agua-alimentos: hacia el bienestar humano y ecológico en México. *Economía, Sociedad y Territorio*, Vol. 26. 1-24.



Economía
Sociedad y
Territorio

ISSN 2448-6183

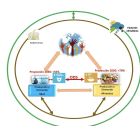
EL COLEGIO MEXIQUENSE

Journal Citation Reports (JCR)

Artículo científico

Indicadores sustentables para lograr el bienestar humano y ecológico a través del Nexo agua-alimentos.

Sustainable indicators to achieve human and ecological well-being through the food-wáter nexus.



PRODUCTO CIENTÍFICO ACEPTADO

Georgina Itandehui Avila-Castañeda^a, Elena María Otazo-Sánchez^b, Silvia Chamizo-Checa^c, Gabriela Marisol Vázquez-Cuevas^d, Alma Delia Román-Gutiérrez^e. Hydrology. Sustainable water management in a complex watershed. Case study in Tulancingo Valley, Mexico. Hydrological Sciences Journal.



Article

Sustainable water management in a complex watershed. Case study in Tulancingo Valley, Mexico

Georgina Itandehui Avila-Castañeda ¹, Elena María Otazo-Sánchez ^{1,2,*}, Silvia Chamizo-Checa ^{3,*}, Gabriela Marisol Vázquez-Cuevas ⁴ and Alma Delia Román-Gutiérrez ^{1,*}

¹ Chemistry Department, Hidalgo State Autonomous University, Carretera Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Mineral de la Reforma, Pachuca 42184, Hidalgo, Mexico; itan812009@hotmail.com (G.I.A.C.); gabriela_vazquez@uaeh.edu.mx (G.M.V.C.)

² Council of Science, Technology and Innovation of Hidalgo. Science Building, Ex Hacienda de la Concepción, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, Mexico.

³ School of Agrobiological, Autonomous University of Tlaxcala, Autopista Tlaxcala-San Martín Texmelucan Km 10.5, Tlaxcala, Mexico.

⁴ Science and Technology Park. Hidalgo State Autonomous University. San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, Mexico.

* Correspondence: elenamariaotazo@gmail.com (E.M.O.S.); silchamiz@gmail.com (S.Ch.Ch.); aroman@uaeh.edu.mx (A.D.R.G.)



ESTANCIA ACADÉMICA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
FACULTAD DE AGROBIOLOGÍA
LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES



Asunto: Conclusión de estancia académica

Dra. Claudia Romo Gómez
Coordinadora del Doctorado en Ciencias Ambientales
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
PRESENTE

Por este medio me permito hacer de su conocimiento que la estudiante del Doctorado en Ciencias Ambientales **Georgina Itandehui Ávila Castañeda**, concluyó satisfactoriamente la estancia académica en la Facultad de Agrobiología de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, bajo mi supervisión, del periodo del 1 de julio al 30 de septiembre de 2024. Durante este tiempo la estudiante realizó la Calibración del modelo matemático y elaboró escenarios en la plataforma de simulación WEAP, con información del proyecto de tesis titulado "Evaluación del Nexo agua-alimentos en el Valle de Tulancingo, Hidalgo".

Sin otro particular, quedo a sus órdenes para cualquier información adicional y le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Tlaxco, Tlaxcala; a 05 de agosto del 2024



Dra. Silvia Chamizo Checa
Docente de la Facultad de Agrobiología de la
Universidad Autónoma de Tlaxcala



Calle Benito Juárez No. 3 Antigua Casa Agrícola. Col. Centro Tlaxco,
Tlaxcala.
Tel. (01-241) 49 6 15 89



