UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO MUNICIPAL Y SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA DEL VALLE DEL MEZQUITAL: EXPLORANDO EL NEXO AGUA-ENERGÍA

Para obtener el grado de
Doctora en Ciencias Ambientales

PRESENTA

I.E. Ana Karen Hernández Espinosa

Directoras
Dra. Elena María Otazo Sánchez

Dra. Alma Delia Román Gutiérrez

Mineral de la Reforma, Hgo., México, septiembre de 2025

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

Mineral de la Reforma, Hgo. a 19 de agosto de 2025

Número de control: ICBI-D/1456/2025
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 Ing. Ana Karen Hernández Espinosa, alumna del Doctorado en Ciencias Ambientales, con número de cuenta 450518, autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado "Desarrollo municipal y sustentabilidad energética del Valle del Mezquital: Explorando el Nexo Agua-Energía" 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	Dra. Claudia Romo Gómez
1er VOCAL	Dra. Alma Delia Román Gutiérrez
2do VOCAL	Dr. César Abelardo González Ramírez
3er VOCAL	Dra. Silvia Chamizo Checa
1er SUPLENTE	Dr. Eric Galindo Castillo
2do SUPLENTE	Dra. Gabriela Marisol Vázquez Cuevas

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

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

VR/APDV

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, vergarar@uaeh.edu.mx

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, han sido parte de este enriquecedor viaje académico.

A mis padres, les debo todo. Gracias por creer en mí, por su amor incondicional y por darme el aliento necesario en cada etapa de mi vida. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

A mi hermana, compañera en mis mejores y peores momentos, gracias por estar siempre a mi lado en cada lucha, locura y logro. Te adoro y no habría llegado hasta aquí sin tu incondicional compañía.

A mis cuyos, que han sido la mejor compañía que la vida me ha regalado. Agradezco cada momento compartido con ustedes, su presencia ha sido un gran apoyo durante este proceso.

Quiero agradecer profundamente a mis directoras de tesis, Dra. Elena María Otazo Sánchez y Dra. Alma Delia Román Gutiérrez, por su guía, apoyo y paciencia a lo largo de estos años. Sus valiosas sugerencias y conocimientos han sido fundamentales para la culminación de este trabajo. Gracias por confiar en mí, el cariño y los momentos compartidos que siempre llevaré en mi corazón. Solo puedo desearles bendiciones en cada paso de su vida.

Agradezco también al comité de tesis por sus críticas constructivas y aportaciones que me ayudaron a mejorar este proyecto. Mi más profundo agradecimiento a la Dra. Claudia Romo, por su infinita paciencia, el conocimiento y cariño que me ha brindado a lo largo de este proceso. Al Dr. César A. Ramírez, gracias por sus valiosas contribuciones académicas y su enfoque preciso que enriqueció este trabajo. A la Dra. Silvia Chamizo, gracias por sus recomendaciones académicas y su actitud positiva, que me ayudaron a superar los momentos difíciles. Al Dr. Eric Galindo Castillo, gracias por compartir sus conocimientos y por su apoyo durante este proyecto.

A mis compañeros de investigación y amigos, gracias por su apoyo incondicional, por compartir tanto los momentos de éxito como los desafíos. Su presencia ha sido esencial para mantenerme motivada y enfocada.

Finalmente, agradezco a todas aquellas instituciones que, de alguna forma, colaboraron con este proyecto, especialmente a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y SECIHTI. Este trabajo es también fruto de su generosidad y apoyo.

A todos, muchas gracias ♡

Dedicatoria

A Kiki, por ser mi refugio, mi alegría constante y mi más fiel compañero en cada etapa de este camino. Tu presencia silenciosa, tu ternura y tu compañía incondicional fueron un consuelo en los días difíciles y una inspiración en los buenos.

Gracias por estar ahí, siempre.

CONTENIDO

RESUMEN 1
ABSTRACT 2
INTRODUCCIÓN 3
1. MARCO TEÓRICO 5
1.1. Caracterización de la zona de estudio……5
1.2. El sistema de drenaje de la Ciudad de México y su relación con el Valle del Mezquital……7
1.3. El Nexo Agua-Energía-Alimentos……...10
1.4. El Nexo Agua-Energía……14
2. ANTECEDENTES 16
2.1. Investigaciones recientes relacionadas con el Valle del Mezquital……16
2.2. Investigaciones relevantes del Nexo Agua-Energía……18
2.3. Indicadores e índices del Nexo Agua-Energía……20
2.4. Modelo de Análisis de Bajas Emisiones (LEAP)……22
3. OBJETIVOS 25
3.1. Objetivo general……..25
3.2. Objetivos específicos……...25
4. METODOLOGÍA 27
4.1. Modelo conceptual para la estimación de los volúmenes históricos……27
4.2. Modelo conceptual para el análisis socioeconómico del Valle del Mezquital……35
4.3. Modelo matemático para el análisis socioeconómico……..38
4.4. Modelo conceptual para el análisis de demanda y transformación energética……..39
4.5. Modelo matemático para el análisis de demanda y transformación energética……41
4.6. Poderes caloríficos netos de los combustibles considerados para la demanda energética……46
4.7. Densidades de los combustibles considerados para la demanda energética……47
4.8. Sector de la transformación energética……47
4.9. Ecuaciones empleadas para el cálculo del consumo energético para el año base……51
4.10. Escenarios de demanda energética……55
4.11. Datos hídricos considerados para el cálculo de indicadores del nexo……57
4.12. Indicadores para el Nexo Agua-Energía……59
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES 60
5.1. VOLUMEN HÍDRICO HISTÓRICO RECIBIDO POR EL VALLE DEL MEZQUITAL PROVENIENTE DEL SISTEMA DE DRENAJE 60
5.1.1. Porcentajes de contribución por fuente a cada emisor del drenaje 61
5.1.2. Volúmenes históricos de agua residual que han ingresado al Valle del Mezquital por río…….63
5.1.3. Validación del modelo 63
5.2. ANÁLISIS SOCIOECONÓMICO MUNICIPAL……..65

5.2.1. Evolución demográfica del Valle del Mezquital en el periodo 1985-2020 65
5.2.2.Resultados del proceso de clusterización mediante el algoritmo k-medias 68
5.3. ESCENARIOS DE DEMANDA ENERGÉTICA……...85
5.3.1.Sector residencial 85
5.3.2.Servicios públicos..... 96
5.3.3.Sector agrícola..... 100
5.3.4.Sector de la manufactura 100
5.3.5.Demanda energética total del Valle del Mezquital, en el año 2015..... 109
5.4. SECTOR DE LA TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA……...117
5.4.1.Refinería Miguel Hidalgo..... 117
5.4.2.Generación eléctrica del área de estudio 119
5.4.3.Emisiones del sector de la transformación 124
5.5. EL NEXO AGUA-ENERGÍA……...128
5.5.1.Indicador de intensidad energética de la demanda de agua 128
5.5.2.Tendencia de la intensidad hídrica en la generación eléctrica..... 136
5.5.3.Tendencia de la intensidad hídrica de la energía en la Refinería de Tula..... 140
6. CONCLUSIONES……142
7. REFERENCIAS 146
8. RECOMENDACIONES ACADÉMICAS 164
9. RECOMENDACIÓNES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS..... 165
10. ANEXOS..... 167

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
I	Relaciones funcionales entre los ejes de análisis de la tesis……	4
1	Mapa de localización geográfica de la zona de estudio……..	7
2	Localización geográfica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y su conexión con el Valle del Mezquital…….	9
3	Esquema del Nexo Agua-Energía-Alimentos…….	11
4	Objetivos del desarrollo sostenible enfocados al Nexo Agua-Energía-Alimentos…….	13
5	Crecimiento de las investigaciones relacionadas al Nexo Agua-Energía en el periodo 2002-2025…….	15
6	Esquema de las entradas de agua residual al sistema de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México……..	27
7	Esquema general de la metodología para el análisis socioeconómico……	37
8	Esquema de la demanda energética del Valle del Mezquital considerado para el modelo conceptual……	41
9	Volúmenes en hm^3 de agua residual transportada por cada emisor en el periodo 2015-2050…….....	60
10	Comparación de la contribución porcentual por fuente a cada emisor en el periodo 1995-2020…….....	61
11	Porcentajes de aportación de agua de cada emisor al sistema de drenaje en 1995 y 2020…….	62
12	Tasa de crecimiento anual promedio municipal periodos 1985-2010 y 2010-2020…….	67
13	Clústeres de los municipios referentes al parámetro de población. Las zonas con agua importada se destacan en verde…….	70
14	Clústeres de Área agrícola de riego y empleados en el sector primario……	72
15	Clústeres de industrias manufactureras, empleados, comercios y empleados en comercio…….	76
16	Clústeres de centros médicos, educativos, vehículos y empleados en servicios……...…….	81
17	Demanda energética de actividades del sector residencial en 2015…….	85
18	Consumo de insumos energéticos del sector residencial en 2015...	86
19	Demanda energética del sector residencial, escenario inercial, 2015-2050……	88
20	Emisiones de GEI en el sector residencial, escenario inercial, 2015-2050……	90
21	Demanda energética en escenario de reemplazo de luminarias, sector residencial, 2015-2050……	91
22	Demanda energética con calentador solar, sector residencial, 2015-2050……	93
23	Emisiones de GEI con uso de calentador solar vs. escenario inercial, 2015-2050…….	95
24	Demanda energética de los servicios públicos en 2015……..	97

25	Demanda energética de servicios públicos, escenario inercial, 2015-2050……..	98
26	Demanda energética del sector industrial en 2015……	101
27	Consumo de insumos energéticos del sector industrial en 2015……..	102
28	Demanda energética de la manufactura, escenario inercial, 2015-2050……..	104
29	Emisiones de GEI en industria manufacturera, escenario inercial, 2015-2050..	106
30	Demanda energética con sistemas de cogeneración, 2015-2050…….	107
31	Demanda energética total del Valle del Mezquital en 2015……..	109
32	Consumo de insumos energéticos por sector en 2015……..	110
33	Porcentajes de consumo energético por sector en 2015……	111
34	Demanda energética total sectorial, escenario inercial, 2015-2050…..……	114
35	Emisiones de CO_2 por demanda sectorial, escenario inercial, 2015-2050……	116
36	Emisiones de GEI por demanda sectorial, escenario inercial, 2015-2050……	116
37	Producción estimada de la refinería Miguel Hidalgo, 2015–2050.....	118
38	Proyección de generación eléctrica, 2015–2050……..	122
39	Emisiones de CO_2 del sector de transformación energética, escenario inercial, 2015-2050…….	125
40	Emisiones de GEI del sector de transformación energética, escenario inercial, 2015-2050……	126
41	Tendencia de la intensidad energética de la demanda de agua, escenario BAU……..	128
42	Intensidad energética de demanda de agua caliente: calentador solar vs. BAU……	133
43	Intensidad energética de la demanda de agua, escenario con cogeneración industrial……...	135
44	Intensidad hídrica de la energía para generación eléctrica en el Valle del Mezquital, 2015-2050……..	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
1	Investigaciones recientes relacionadas con el Valle del Mezquital…….	16
2	Estudios de caso relacionados con el Nexo Agua-Energía alrededor del mundo……..	19
3	Relación de indicadores del Nexo Agua-Energía……	20
4	Investigaciones relevantes que utilizan el modelo LEAP……...	23
5	Aspectos considerados para bases de datos y fuentes consultadas…….	29
6	Municipios y delegaciones que vierten agua residual a cada emisor del drenaje……..	30
7	Descripción de base de datos para análisis municipal ……	37
8	Datos utilizados en el modelo matemático para el cálculo de demanda energética en el Valle del Mezquital……..	41
9	Supuestos considerados para el modelo matemático del cálculo de demanda y transformación energética en el Valle del Mezquital……	44
10	Poderes caloríficos netos de los combustibles considerados para la demanda energética del Valle del Mezquital……	46
11	Densidades de los combustibles considerados para la demanda energética del Valle del Mezquital……	47
12	Datos de caracterización de la refinería “Miguel Hidalgo” para el año 2015…….	47
13	Datos del consumo y generación anual de la termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos”……	48
14	Datos del consumo y generación anual del ciclo combinado viejo……	48
15	Datos del consumo y generación anual del ciclo combinado NTG Tula II, fase 1……	49
16	Datos del consumo y generación anual del ciclo combinado NTG Tula II, fase 2……	49
17	Datos de la generación de la hidroeléctrica “Ing. Fernando Hiriart Balderrama”…….	49
18	Datos de las centrales de energía renovable presentes en los municipios del Valle del Mezquital……	50
19	Tasas de crecimiento sectorial consideradas para el escenario inercial BAU…….	55
20	Consumo hídrico de la demanda del Valle del Mezquital del periodo 2017-2050 [Mm³/anuales]……...	57
21	Consumo hídrico [hm³/anuales] de la transformación del Valle del Mezquital para el año base 2015…….	58
22	Volúmenes históricos de agua residual [hm³] que han ingresado al Valle del Mezquital por cada río y el total acumulado, durante el periodo 1985–2020…….	63
23	Comparación entre los volúmenes calculados y los reportados [hm³] de agua residual que han ingresado al Valle del Mezquital provenientes del sistema de drenaje ……..	64
24	Número de municipios en cada clúster, municipio atípico y rango de porcentajes de crecimiento en cada parámetro	69

25	Consumo de insumos energéticos para la demanda energética del sector residencial, en Tera Joules, año base 2015…….	87
26	Proyección del crecimiento de la demanda del sector residencial en el escenario inercial, en Tera Joules, periodo 2015-2050……	89
27	Proyección del crecimiento de la demanda energética en el escenario de implementación de uso de luminarias LED para el sector residencial, en Tera Joules, periodo 2015-2050……..	92
28	Proyección del crecimiento de la demanda energética en el escenario de implementación de uso de calentador solar en el sector residencial, en Tera Joules, periodo 2015-2050……	94
29	Proyección del crecimiento de la demanda energética de los servicios públicos en el escenario inercial, en Tera Joules, periodo 2015-2050……	99
30	Consumo de insumos energéticos para la demanda energética del sector manufacturero, en Tera Joules, año base 2015……	103
31	Proyección del crecimiento de la demanda energética del sector manufacturero en el escenario inercial, en Tera Joules, periodo 2015-2050…….	105
32	Proyección del crecimiento de la demanda energética en el escenario de implementación de sistemas de cogeneración para la industria manufacturera, en Tera Joules, periodo 2015-2050…….	108
33	Consumo de insumos energéticos para la demanda energética total sectorial, en Tera Joules, año base 2015…….	112
34	Proyección del crecimiento de la demanda energética total del Valle del Mezquital en el escenario inercial, en Tera Joules, periodo 2015-2050…..	115
35	Producción estimada de petrolíferos de la refinería Miguel Hidalgo para el escenario inercial, en Tera Joules, periodo 2015-2050……	119
36	Generación eléctrica según energético principal utilizado, en Tera Joules, periodo 2015–2050……..	121
37	Consumo de agua por tecnología de generación eléctrica en el escenario tendencial (2015–2050), en m^3/GJ…….	138

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AE	Agua-Energía
BAU	Escenario Inercial (Bussines As Usual por sus siglas en inglés)
bl	Barril
BM	Banco Mundial
BTU	Unidad Térmica Británica (British Thermal Unit)
CLEWS	Sistemas de Clima, Tierra, Energía y Agua (Climate, Land, Energy and Water Systems por sus siglas en inglés)
COAS	Cédulas de Operación Anual
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAVI	Comisión Nacional de Vivienda
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social
CRE	Comisión Reguladora de Energía
DR	Distrito de Riego
Ec	Ecuación
EFIPEM	Estadística de Finanzas Públicas Estatales y Municipales
ENCEVI	Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos
FEM	Foro Económico Mundial
FIDE	Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica
GEI	Gases de Efecto Invernadero
Gg	Gigagramo
GWh	Gigavatio (gigawatt-hora)
h	Hora
IEA	Intensidad Energética del Agua
Mbd	Miles de barriles diarios
Mm^3	Millones de metros cúbicos
mmpcd	Millones de pies cúbicos diarios
MW	Mega Watts
NOM	Norma Oficial Mexicana
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
P_1	Peso 1
P_2	Peso 2
PCN	Poder Calorífico Neto
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PRODESEN	Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional
PROFECO	Procuraduría Federal del Consumidor
PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual
REF	Refinería
REPDA	Registros Públicos del Agua
SEDG	Comité Consultivo Nacional de Normalización de Gas LP
SEI	Instituto Ambiental de Estocolmo (Stockholm Environment Institute por sus siglas en inglés)
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera

IEA	Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency por sus siglas en inglés)
IHE	Intensidad Hídrica de la Energía
INDESOL	Instituto Nacional de Desarrollo Social
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Intergovernmental Panel of Climate Change por sus siglas en inglés)
kg	Kilogramo
kJ	Kilojulio (kilojoule)
kWh	Kilovatio-hora (kilowatt-hora)
LEAP	Plataforma de Análisis de Bajas Emisiones (Low Emissions Analysis Platform por sus siglas en inglés)
LED	Diodo Emisor de Luz (Light Emitting Diode por sus siglas en inglés)
LP	Licuado del Petróleo
m^3	Metro cúbico
mbd	Miles de barriles diarios
MJ	Megajulio (Megajoule)
t	Tonelada
TCPA	Tasa de Crecimiento Promedio Anual
TEC	Túnel Emisor Central
TEO	Túnel Emisor Oriente
TEP	Túnel Emisor Poniente
TJ	Terajulio (Terajoule)
VM	Valle del Mezquital
W	Vatio (Watt)
WEAP	Sistema de Evaluación y Planificación de Agua (Water Evaluation and Planning System por sus siglas en inglés)
WEF	Nexo Agua-Energía-Alimentos (Water-Energy-Food por sus siglas en inglés)
Wh	Vatio-hora (Watt-hora)
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

RESUMEN

La presente tesis analiza el desarrollo socioeconómico del Valle del Mezquital entre 1985 y 2020, así como su relación con los recursos hídricos. Se presenta el estudio de la evolución histórica del desarrollo municipal (1985–2020) y los escenarios futuros de demanda y transformación energética (2015–2050), así como su relación con la disponibilidad hídrica en la región mediante técnicas de análisis multivariado y algoritmos de agrupamiento (*t*-SNE y *k*-medias), y la identificación de coincidencias espaciales para asociar la disponibilidad hídrica. Se modeló la demanda energética del año base 2015 en cuatro sectores mediante el software LEAP, y se exploran escenarios futuros que consideran la incorporación de energías renovables en la generación eléctrica. Finalmente, se cuantifican indicadores del nexo agua-energía para los escenarios con el objetivo de evaluar la sostenibilidad del Nexo Agua-Energía.

Los resultados obtenidos identificaron patrones de desarrollo socioeconómico en municipios del Valle del Mezquital (1985–2020), asociados a la disponibilidad de agua residual mediante una nueva metodología. Se evidenció un alto crecimiento industrial, con Tula, Atotonilco de Tula e Ixmiquilpan como polos más importantes, y una disminución del empleo del sector primario a pesar del aumento del área de riego agrícola. Las disparidades municipales reflejan una brecha entre crecimiento económico y bienestar social.

Se prevé un aumento del 129% en la demanda energética del Valle del Mezquital para 2050, liderado por el sector industrial, mientras que las emisiones de GEI totales podrían triplicarse comparado con el año 2015, alcanzando 4.44 Mt en el escenario inercial. Medidas de mitigación como la implementación de calentadores solares y luminarias LED en el sector residencial; y la cogeneración industrial para reducir el consumo energético, así como las emisiones. La intensidad energética del uso del agua en el sector industrial se incrementaría en un 49.5 % hacia 2050, pero la adopción de sistemas de cogeneración podría reducirlo hasta 48.9 %. En el sector residencial, la implementación de tecnologías como calentadores solares permitiría disminuir el indicador un 46 %. Por otro lado, la intensidad hídrica asociada a la generación eléctrica disminuiría en un 56.6 % hacia 2030, gracias a la incorporación de tecnologías más eficientes como el ciclo combinado y fuentes de energía renovable.

ABSTRACT

The presented thesis analyzes the socioeconomic development of the Mezquital Valley from 1985 to 2020, along with its relationship to water resources. It presents both the historical evolution of municipal development (1985–2020) and future scenarios for energy demand and transformation (2015–2050), examining their connection to water availability in the region. The study uses multivariate analysis techniques and clustering algorithms (t-SNE and k-means), as well as the identification of spatial overlaps to associate patterns of water availability.

The energy demand for the base year 2015 was modeled in four sectors using the LEAP software. Based on this, future scenarios were developed that include the integration of renewable energy sources into electricity generation. Finally, indicators of the water-energy nexus are quantified for each scenario to evaluate the sustainability of the system.

The results reveal patterns of socioeconomic development in the municipalities of the Mezquital Valley (1985–2020), closely linked to the availability of wastewater, identified through a novel methodological approach. The study shows strong industrial growth, pointing to Tula, Atotonilco de Tula, and Ixmiquilpan emerging as major industrial hubs. At the same time, employment in the primary sector has declined despite an increase in irrigated agricultural land. The disparities between municipalities highlight a gap between economic growth and social well-being.

By 2050, energy demand in the Mezquital Valley is projected to increase by 129%, driven primarily by the industrial sector. In the inertial scenario, total greenhouse gas emissions could triple compared to 2015, reaching 4.44 $MtCO_2e$. However, mitigation measures such as the adoption of solar water heaters, LED lighting in the residential sector, and industrial cogeneration are expected to reduce energy consumption and emissions.

The energy intensity of water use in the industrial sector is projected to increase by 49.5% by 2050; however, the adoption of cogeneration systems could reduce this value by up to 48.9%. In the residential sector, the solar water heaters could lead to a 46% reduction in energy consumption. Meanwhile, the water intensity of electricity generation is expected to decrease by 56.6% by 2030.

INTRODUCCIÓN

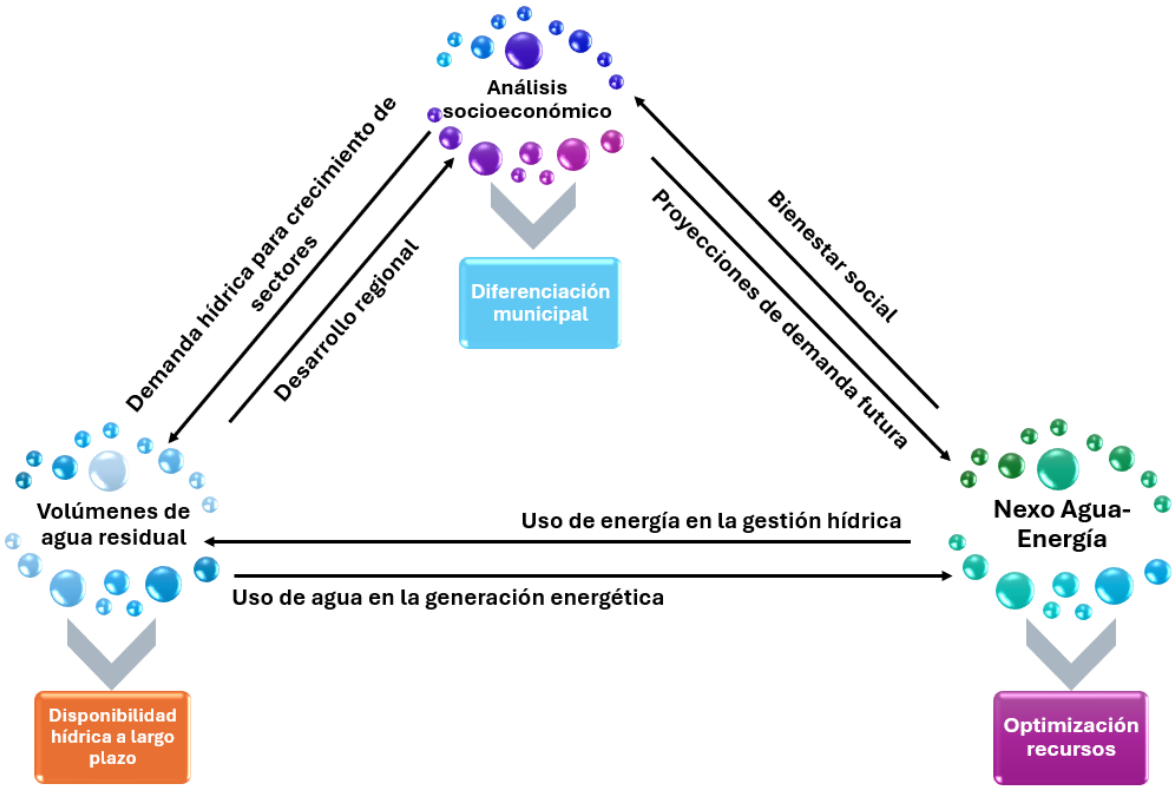
El Valle del Mezquital, ubicado al sureste del estado de Hidalgo, México, se ha caracterizado históricamente por el uso de agua residual y pluvial proveniente del sistema de drenaje de la Ciudad de México. Este recurso ha sido clave para el desarrollo agrícola, industrial y energético de la región, así como para el asentamiento y crecimiento poblacional. No obstante, los municipios que integran el Valle del Mezquital presentan condiciones socioeconómicas heterogéneas. Mientras algunos cuentan con una estructura productiva de carácter industrial, otros dependen principalmente de la actividad agrícola. A ello se suma una desigual distribución de infraestructura, servicios públicos y densidad poblacional. Sin embargo, el valle ha sido estudiado como una unidad homogénea, sin atender las particularidades territoriales ni las desigualdades municipales en la distribución del agua.

La presente tesis desarrolla un análisis integral del Valle del Mezquital, articulando las dimensiones hídrica, energética y socioeconómica desde una perspectiva temporal y territorial. En primera instancia, se reporta la evolución de los volúmenes de agua ingresados al valle a través de los ríos El Salto y El Salado durante el periodo 1985-2020. Posteriormente, se caracteriza el desarrollo municipal mediante un análisis multivariado de indicadores socioeconómicos, con el objetivo de identificar sus diferencias y similitudes, además de los patrones espaciales vinculados a la disponibilidad de agua superficial.

Por otro lado, se simula la demanda energética sectorial para el periodo 2015-2050, tomando en cuenta los crecimientos demográfico e industrial y la implementación de medidas de mitigación. También se evalúan escenarios en el sector de la transformación energética que incorporan el uso de fuentes renovables. Finalmente, el estudio concluye con el análisis de indicadores del Nexo Agua-Energía, herramienta esencial para evaluar la sostenibilidad en el uso integrado de recursos hídricos-energéticos. La relación y complementariedad entre ambos bloques se resumen en el esquema 1.

La tesis se organiza en seis capítulos. El primero introduce el marco conceptual del Nexo Agua-Energía-Alimentos, con énfasis en la relación binaria Agua-Energía. El segundo presenta una revisión de investigaciones relevantes sobre el nexo y una caracterización del área de estudio. En el tercero se muestra el objetivo general y los objetivos específicos. El

cuarto capítulo incluye las metodologías y técnicas utilizadas, incluyendo los modelos conceptuales y matemáticos aplicados para los análisis, así como las fuentes de datos utilizadas. El quinto expone los resultados y su discusión, organizados en cuatro ejes: volúmenes históricos de agua residual, análisis socioeconómico municipal, escenarios de demanda/transformación energética e indicadores del Nexo Agua-Energía. Finalmente, el sexto capítulo presenta las conclusiones generales, en función del cumplimiento de los objetivos planteados.



Esquema I. Relaciones funcionales entre los ejes de análisis de la tesis

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Caracterización de la zona de estudio

El Valle del Mezquital (VM) es una de las diez regiones que integran el estado de Hidalgo, México. Se localiza aproximadamente a 60 kilómetros al norte de la Ciudad de México y se encuentra a una altitud que oscila entre los 1,700 y 2,100 metros sobre el nivel del mar (García-Salazar, 2019). Desde el punto de vista geográfico, su territorio se extiende entre los paralelos 19º30' y 20º22' de latitud norte, y entre los meridianos 98º56' y 99º37' de longitud oeste (Lesser-Carrillo et al., 2011). Abarca una superficie de más de 6,000 km² y comprende 26 municipios del estado de Hidalgo. En esta región habitan más de 900,000 personas, entre las cuales se encuentran grupos en situación de vulnerabilidad, como comunidades indígenas otomíes y poblaciones que viven en condiciones de marginación social y económica (García-Salazar, 2019). El valle forma parte de la zona alta de la cuenca del río Moctezuma, la cual es drenada por el río Tula, que fluye en dirección sur-norte y presenta seis subcuencas dentro de la región (Chamizo-Checa et al., 2018).

El clima del valle se caracteriza por una temporada de lluvias que se extiende de mayo a octubre, aunque presenta bajos niveles de precipitación anual, en un rango de 450 a 700 mm en promedio. Esta escasez de lluvia, combinada con una elevada evapotranspiración, da lugar a un índice de aridez que oscila entre 0.23 y 0.41, lo que clasifica al valle como una zona semiárida (Lesser-Carrillo et al., 2011). En términos edáficos, los suelos de la región muestran un bajo contenido de materia orgánica, con valores generalmente inferiores al 1.5% (Durán-Álvarez et al., 2021; Sánchez–González et al., 2017).

Desde el siglo XVII, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) ha enviado su agua residual y pluvial hacia el VM (Hernández Espinosa et al., 2023). Este recurso ha sido clave para el establecimiento de tres importantes distritos de riego: el DR 003 Tula, el DR 100 Alfajayucan y el DR 112 Ajacuba. No obstante, debido a la topografía de la región, estas aguas no alcanzan las zonas más elevadas del valle, lo que ha generado desigualdades entre áreas irrigadas y zonas áridas (Contreras-Román, 2019). Estas disparidades en el acceso al agua han acelerado procesos de transformación social y

económica en ciertos municipios, promoviendo un crecimiento demográfico más dinámico y una mayor urbanización en las áreas con disponibilidad hídrica (Azrate-Salgado, 2011).

El agua importada no solo fortaleció la actividad agrícola en el VM, sino que también impulsó un crecimiento sostenido de la población, así como la expansión del sector industrial manufacturero y la transformación energética. Este proceso de desarrollo facilitó la consolidación de corredores industriales en la región (INDESOL, 2011) y propició el establecimiento de infraestructura energética estratégica, como la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos, inaugurada en 1975, y la Refinería Miguel Hidalgo, que entró en operación en 1976. Ambas instalaciones representan importantes fuentes secundarias de energía, no solo para la ZMCM, sino también para otras zonas del centro del país.

Adicionalmente, algunos municipios del valle cuentan con diversos atractivos turísticos que incluyen reservas ecológicas, sitios arqueológicos, corredores de haciendas, producción artesanal, templos religiosos y gastronomía autóctona, entre otros (López-Aguilar, 2009; Reynoso Ocampo et al., 2022). Destacan especialmente los parques acuáticos, que conforman un corredor de balnearios reconocido en la región (ver Figura 1).

La Figura 1 presenta un mapa detallado del VM, que incluye el área urbana, corredores industriales, balnearios, carreteras, cuerpos de agua y ríos, así como las fronteras con los estados vecinos. En este mapa también se identifican infraestructuras clave como la refinería "Miguel Hidalgo", la central termoeléctrica "Francisco Pérez Ríos", la central hidroeléctrica "Fernando Hiriart Balderrama" y la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Atotonilco de Tula, junto con algunos de los balnearios más representativos de la región.

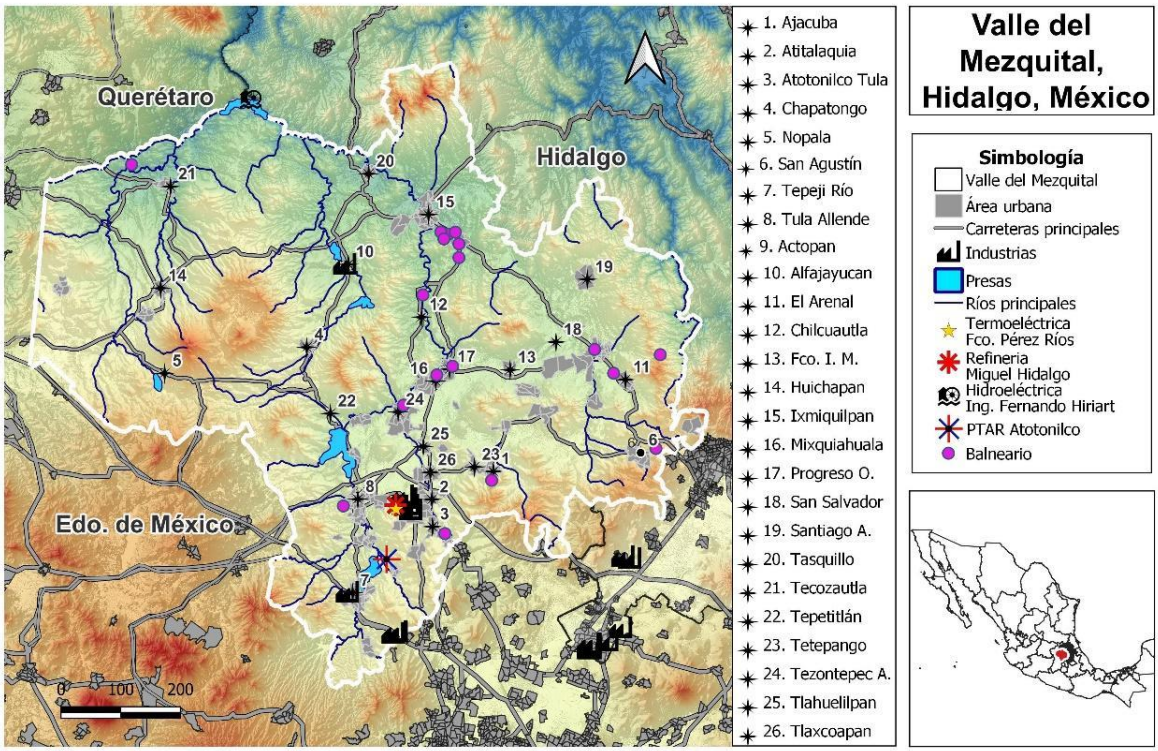


Figura 1. Mapa de localización geográfica de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.

1.2. El sistema de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y su relación con el Valle del Mezquital

Desde tiempos prehispánicos, la Cuenca del Valle de México ha enfrentado un problema persistente: el agua. Esta región, al ser endorreica, acumulaba grandes volúmenes de agua durante la temporada de lluvias, lo que ocasionaba constantes inundaciones. La antigua Tenochtitlan, construida sobre un sistema lacustre, desarrolló complejas obras hidráulicas para drenar el agua hacia ríos como El Salto y El Salado. No obstante, estas infraestructuras fueron destruidas tras la conquista española, lo que marcó el inicio de una larga lucha entre la expansión urbana y el equilibrio hídrico (CONAGUA,2018).

Con el paso de los siglos y el crecimiento poblacional, los problemas se intensificaron. La urbanización acelerada, combinada con la falta de infraestructura suficiente para el manejo de aguas residuales y pluviales, llevó a un punto crítico a finales

del siglo XIX. Como respuesta, en 1900 se construyó el Gran Canal de Desagüe, una de las obras hidráulicas más ambiciosas del país, que canalizaba las aguas hacia el río El Salado. Sin embargo, la presión demográfica en la zona oriente de la ciudad pronto superó su capacidad. Esto obligó a ampliar el canal y a construir un nuevo túnel en Tequixquiac, pensado para desviar aún más aguas residuales fuera de la cuenca (Galina-Macías, 2010; Legorreta, 2006).

Lejos de resolver el problema, se optó por trasladar las aguas contaminadas al VM, transformando la región en un vertedero hídrico involuntario. A medida que la ciudad seguía creciendo hacia el poniente, fue necesario extender aún más la infraestructura. En la segunda mitad del siglo XX, se inició la construcción del Emisor Poniente, un drenaje que complementaba al Gran Canal al evacuar las aguas del poniente de la Ciudad de México hacia el Tajo de Nochistongo, desembocando en el río El Salto. Sin embargo, el acelerado crecimiento urbano y la sobrecarga del sistema volvieron a superar su capacidad. Esto motivó la construcción del Túnel Emisor Central (TEC), inaugurado en 1975, un drenaje profundo diseñado para canalizar tanto aguas pluviales como residuales hacia el mismo destino final, el río El Salto (Hernández-Espinosa et al., 2021, 2024).

A pesar de estos avances, la falta de mantenimiento y los daños estructurales redujeron la capacidad de evacuación. Como respuesta, en 2007 se inauguró el Túnel Emisor Oriente (TEO), que actualmente canaliza parte de estas aguas hacia la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco de Tula. Esta obra se convirtió en una pieza clave del complejo sistema de drenaje que gestiona las aguas pluviales y residuales de la ZMCM (Izazola, 2001; Lesser-Illades & Cortés-Pérez, 1998; Martínez-Pereda, 1967 (Hernández-Espinosa et al., 2021, 2024)).

A lo largo del tiempo, la capacidad del sistema ha sido insuficiente frente al ritmo del crecimiento urbano, lo que ha afectado tanto a la Ciudad de México como al VM, que recibe gran parte de las aguas negras sin tratamiento. Las inundaciones y la carga hídrica residual continúan siendo un desafío estructural para la región. El desarrollo de nuevas infraestructuras, combinado con políticas integrales de planeación hídrica y urbana, será fundamental para evitar crisis futuras (Martínez-Pereda, 1967). En la Figura 2 se ilustran los principales emisores del sistema de drenaje. El Gran Canal está representado en color rojo,

el Túnel Emisor Central en verde, el Emisor Poniente en azul. Además, se indica la colindancia entre la ZMCM y el VM, reflejando la interdependencia territorial en la gestión del agua.

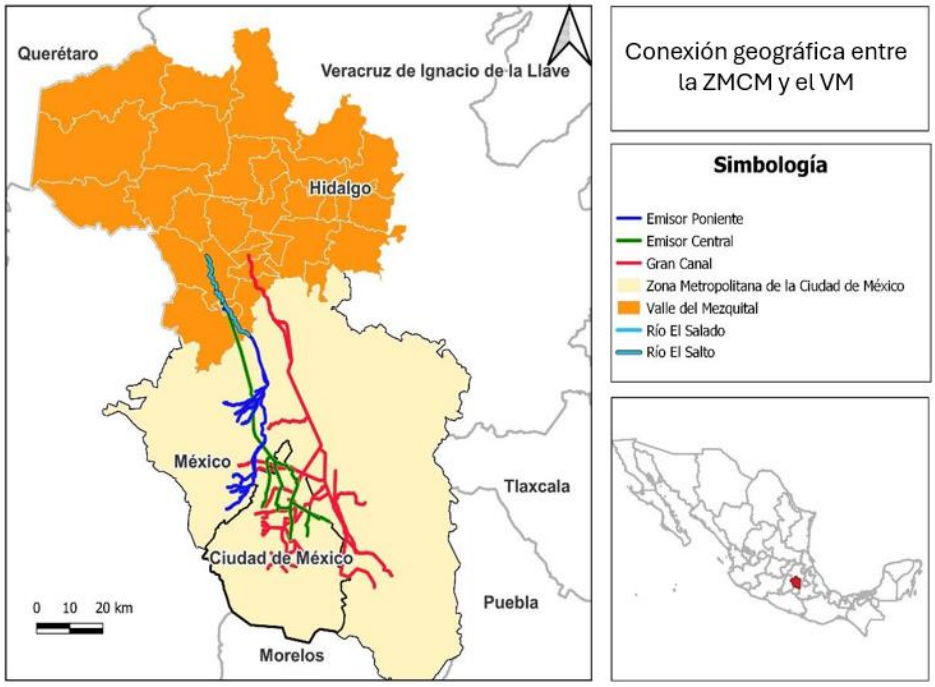


Figura 2. Localización geográfica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y su conexión con el Valle del Mezquital. Modificado de (INEGI, 2020b).

Aunque el traslado de aguas residuales al VM tiene más de un siglo de historia, persiste una preocupante carencia de datos sistemáticos sobre los volúmenes descargados a lo largo del tiempo. Esta ausencia de información representa un obstáculo fundamental para una gestión eficiente y sustentable del recurso hídrico. Sin una estrategia integral que articule la administración de aguas residuales con la planificación territorial, la producción agrícola y la generación de energía, el futuro de la región podría verse seriamente comprometido. La problemática de la sobrecarga del sistema de drenaje y la insuficiente gestión del agua residual en la ZMCM y el VM está íntimamente relacionada con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas en la Agenda 2050.

En primer lugar, el ODS 3 cobra relevancia, la falta de tratamiento adecuado y el colapso del sistema hídrico pueden generar crisis sanitarias que afectan la salud de miles de habitantes. Por otra parte, el ODS 6 se encuentra en el centro de la problemática, pues garantiza la gestión sostenible del recurso hídrico y el acceso al saneamiento básico. La implementación de modelos de gobernanza hídrica que incluyan monitoreo constante, transparencia y participación comunitaria es fundamental para alcanzar este objetivo. Además, ante los impactos crecientes del cambio climático, el ODS 13 enfatiza la urgencia de medidas adaptativas y mitigadoras para proteger el sistema hídrico frente a eventos extremos, como lluvias torrenciales o sequías prolongadas.

1.3. El Nexo Agua-Energía-Alimentos

Desde el año 2000, se han observado cambios evidentes en el clima de la Tierra, con efectos negativos en el medio ambiente. Con una población humana en aumento, que se estima que alcanzará aproximadamente los 9 mil millones para el año 2050 (Ezeh et al., 2012). Por lo cual, es probable que surjan tensiones graves debido a los recursos limitados como el agua, la energía y los alimentos (Egieya et al., 2022).

El agua, la energía y los alimentos constituyen un sistema interconectado que se denomina comúnmente WEF Nexus (Nexo Agua-Energía-Alimentos, Water-Energy-Food Nexus, por sus siglas en inglés). Este concepto emergió inicialmente en el ámbito de la política internacional como una respuesta a la crisis económica global. En 2008, durante el Foro Económico Mundial (FEM), líderes empresariales y políticos reconocieron la urgente necesidad de abordar las interrelaciones entre el crecimiento económico, la gestión integrada del agua, la energía y los sistemas alimentarios. Este enfoque busca no solo reducir la pobreza, sino también promover una mejor gobernanza de los recursos naturales en todos los sectores involucrados (Senzanje et al., 2022).

En 2011, durante la reunión internacional celebrada en Bonn como parte de los preparativos para la Cumbre de Río+20, se enfatizó la importancia de promover una gestión integrada de los recursos hídricos, energéticos y alimentarios (ONU, 2011). En el marco de esta conferencia se estableció el Acuerdo de Bonn sobre el Nexo WEF, un tratado que reconoce la interdependencia crítica entre estos tres recursos esenciales y la necesidad de

abordarlos de manera conjunta para enfrentar retos globales como el cambio climático, la seguridad alimentaria y la escasez de agua. El acuerdo propone la creación de plataformas de colaboración multilaterales y el intercambio de mejores prácticas entre países y regiones, con el objetivo de implementar soluciones sostenibles que respondan al nexo (Hoff, 2011).

En el marco del nexo, los recursos agua, energía y alimentos no se consideran como sistemas independientes, sino como subsistemas estrechamente interconectados (Wichelns, 2017). Este enfoque integral es aplicable en diferentes escalas, desde una perspectiva global hasta el nivel local, permitiendo una gestión coordinada y eficiente de los recursos (Simpson & Jewitt, 2019). La Figura 3 ilustra las interacciones que se establecen entre los componentes del nexo, destacando cómo factores externos como el cambio climático y el crecimiento poblacional afectan y modifican estas relaciones, aumentando la vulnerabilidad y complejidad de su gestión.

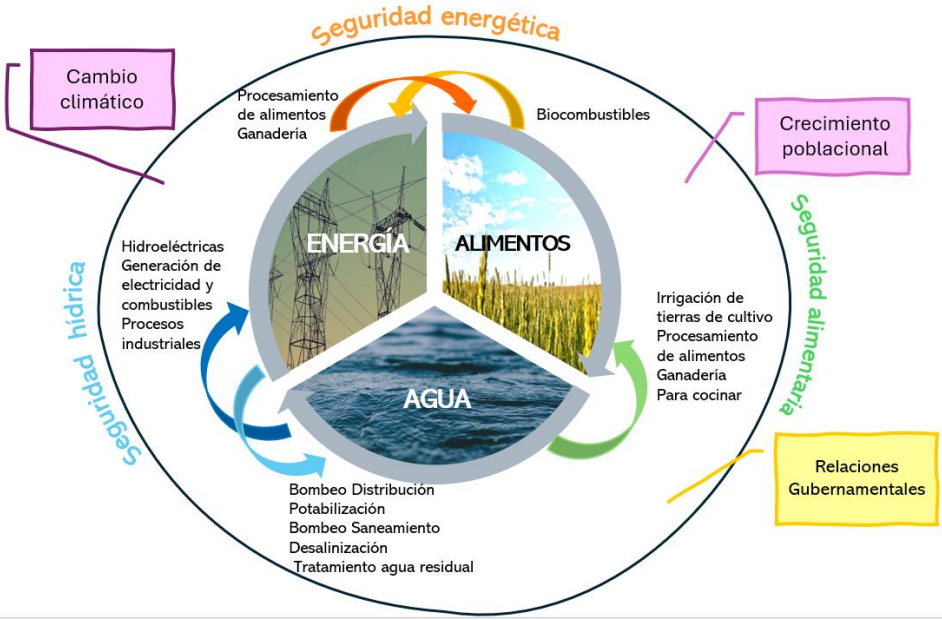


Figura 3. Esquema del Nexo Agua-Energía-Alimentos. Fuente: modificado de (Mahlknecht et al., 2020).

El agua, la energía y los alimentos, presentan interacciones complejas y requieren un estudio profundo para evitar que el consumo excesivo de uno comprometa la disponibilidad

de los otros. Un manejo equilibrado de estos recursos es esencial para garantizar su sustentabilidad a largo plazo. En este sentido, el nexo puede entenderse a través de las siguientes relaciones clave:

1. Agua para alimentos: el 70% de la extracción mundial de agua dulce se destina a la producción de alimentos. la producción alimenticia impacta el sector del agua a través de sus efectos en las condiciones de escorrentía, descarga de aguas subterráneas, calidad del agua y disponibilidad de tierra/agua
2. Agua para energía: el agua es necesaria para la generación de electricidad, refinación y procesamiento en el sector energético
3. Alimentos para energía: la agricultura es un proveedor de insumos para bioenergías
4. Energía para alimentos: directa o indirectamente para transporte de los alimentos, procesamiento, embalaje, procesos de calentamiento o enfriamiento, etc.
5. Energía para agua: bombeo (servicios de abastecimiento y saneamiento), tratamiento de aguas residuales, potabilización y desalinización

El nexo WEF representa una filosofía que promueve una visión sistémica para abordar los problemas relacionados con los recursos básicos. Este enfoque busca integrar sus interdependencias, para favorecer un desarrollo sostenible (Walker et al., 2022). Al aplicar esta perspectiva, es posible diseñar estrategias más eficaces y resilientes que optimicen los recursos. Los ODS que están directamente vinculados al enfoque del nexo agua-energía-alimentos son los enumerados 2, 6 y 7 ya que reflejan sus pilares fundamentales al intentar garantizar la seguridad alimentaria, el acceso universal a recursos hídricos, al suministro de energía limpia y accesible (Tan et al., 2022). La implementación del enfoque nexo permite visualizar cómo estos objetivos no pueden alcanzarse de manera aislada, sino a través de estrategias coordinadas e integradas entre sectores. En la Figura 4, se ilustran estas conexiones, destacando la necesidad de políticas multisectoriales para lograr un desarrollo sostenible y resiliente frente a los desafíos actuales.

Figura 4. Objetivos del desarrollo sostenible enfocados al Nexo Agua-Energía-Alimentos. Fuente: modificado de (ONU, 2018).

El énfasis de los ODS en el nexo WEF responde al acelerado aumento de la demanda de los tres recursos, impulsado por factores como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico, la urbanización, la globalización, la diversificación de las dietas, el agotamiento de los recursos naturales y el cambio climático (Mabhaudhi et al., 2022). A pesar de la importancia de gestionar eficientemente estos recursos para garantizar el bienestar humano, aún existen brechas alarmantes: cerca de 1000 millones de personas carecen de acceso a agua potable, 2500 millones no cuentan con saneamiento adecuado, 1400 millones viven sin electricidad y más de 850 millones sufren desnutrición crónica. A esto se suma el desperdicio de aproximadamente el 30% de los alimentos producidos a nivel mundial (Sušnik et al., 2022).

Con el tiempo, el concepto del nexo ternario ha evolucionado para adaptarse a los nuevos desafíos globales. Si bien inicialmente se centraba exclusivamente en la interrelación entre agua, energía y alimentos, hoy se reconoce que estas conexiones deben ampliarse e incluir otros factores clave como el uso del suelo, la biodiversidad, el medio ambiente, la gobernanza, las emisiones y el cambio climático. Asimismo, el enfoque se ha diversificado en nexos binarios (Agua-Energía o Agua-Alimento) que permiten estudios más específicos y han cobrado especial interés dentro de la comunidad científica. Esta evolución conceptual ha enriquecido la comprensión de las interacciones entre recursos, facilitando análisis más integrales que contribuyen a una planificación más informada y sostenible.

1.4. El Nexo Agua-Energía (AE)

Tanto el agua como la energía son indispensables para la supervivencia humana y el desarrollo económico; sin embargo, los déficits en su acceso y calidad han comenzado a obstaculizar el crecimiento socioeconómico, especialmente en contextos de rápida urbanización y cambio climático (Cui et al., 2019). Esta interconexión se manifiesta en múltiples formas: la energía es necesaria para captar, potabilizar, transportar y tratar el agua; mientras que el agua es esencial para la generación energética, ya sea para enfriar reactores, accionar turbinas hidroeléctricas o servir como fluido de trabajo en diversas tecnologías (Zhou et al., 2018). Debido a estas sinergias operativas, es fundamental que los sistemas de gestión hídrica y energética se aborden de manera conjunta, buscando maximizar eficiencias, reducir impactos ambientales y promover la resiliencia de las infraestructuras críticas.

Dentro del nexo AE, los recursos hídricos abarcan tanto aguas superficiales como subterráneas, utilizadas en múltiples aplicaciones como el riego agrícola, la generación de energía, el abastecimiento urbano, la navegación, entre otros. De forma paralela, las fuentes de energía comprenden tanto recursos primarios como fuentes secundarias, entre las que destaca la energía eléctrica, debido a su papel central en el transporte, tratamiento y distribución del agua (Kang et al., 2024).

La utilización humana del agua requiere energía, con aproximadamente el 8% de la generación total de energía mundial destinada al bombeo y tratamiento de agua (Kang et al., 2024). La producción y transmisión de energía también dependen del agua, especialmente en el caso de las centrales hidroeléctricas, nucleares y térmicas (Xu et al., 2019). Cerca del 15% del consumo mundial de agua se destina a sectores relacionados con la energía (Gold & Webber, 2015).

Dada la estrecha interdependencia entre el agua y la energía, sus estrategias de gestión deben estar alineadas. Ambos recursos enfrentan desafíos crecientes derivados del aumento poblacional, el desarrollo económico y las necesidades sociales (Gold & Webber, 2015). Se prevé un incremento significativo en la demanda de agua y energía, lo que intensifica la preocupación global por su escasez. En este contexto, es fundamental proteger los recursos hídricos, impulsar tecnologías eficientes de tratamiento y promover la generación de energía limpia. Estos enfoques integrados no solo permiten satisfacer de forma sostenible los

consumos de agua y energía, sino que también favorecen la conservación de los ecosistemas y el desarrollo sostenible (Meng et al., 2023).

El Nexo Agua-Energía se ha consolidado como el enfoque binario más estudiado dentro del análisis sistémico de recursos. Estas investigaciones incluyen desde la generación de electricidad y la gestión de sistemas de abastecimiento hídrico, hasta el diseño e implementación de políticas públicas orientadas a la sostenibilidad. La Figura 5 muestra el crecimiento sostenido en la cantidad de publicaciones científicas relacionadas con el Nexo AE en los últimos 20 años, con base en datos recopilados de la plataforma *Scopus*, lo que refleja el creciente interés académico y político en esta interdependencia crítica.

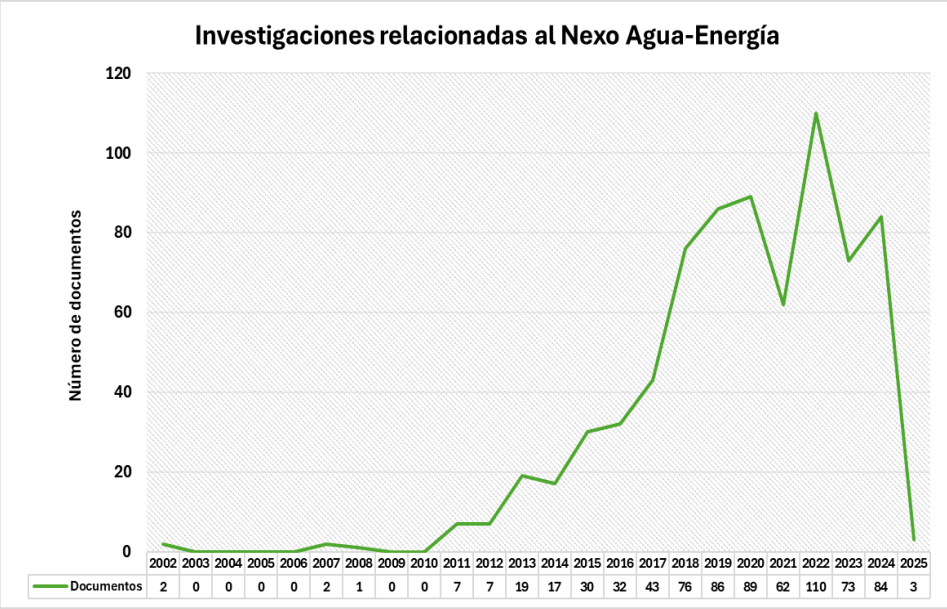


Figura 5. Crecimiento de las investigaciones relacionadas al Nexo Agua-Energía en el periodo 2002-2025. Fuente: elaboración propia mediante datos de Scopus.

Entre 2002 y 2010, las publicaciones científicas relacionadas con el Nexo AE fueron escasas o prácticamente inexistentes. No obstante, a partir de 2011 (tras la reunión internacional de Bonn) hubo mayor interés por este enfoque. Desde 2013, el crecimiento ha sido constante, alcanzando su punto máximo en 2022 con un total de 110 publicaciones anuales. Este aumento sostenido refleja la creciente conciencia sobre la necesidad de comprender y gestionar de forma integrada la interrelación entre los recursos.

2. ANTECEDENTES

2.1. Investigaciones recientes relacionadas con el Valle del Mezquital

El VM ha sido objeto de numerosos estudios científicos debido a su compleja interacción entre factores ambientales, sociales y económicos. Si bien el interés investigativo se ha concentrado principalmente en los efectos ambientales de la contaminación del aire, agua y suelo, también han emergido estudios centrados en la gestión de recursos naturales, las prácticas agrícolas, las condiciones sanitarias y el tejido social de las comunidades locales. La revisión de estas investigaciones permite comprender el contexto multidimensional del territorio y resalta la necesidad de enfoques integrados como el Nexo AE para avanzar hacia un desarrollo más sostenible. En la Tabla 1 se sintetizan algunas de las investigaciones más representativas, destacando sus principales enfoques y hallazgos.

Tabla 1. Investigaciones recientes relacionadas con el Valle del Mezquital

Caso de estudio	Metodología utilizada	Resultados	Referencias
Hídricos			
Analizar los efectos del crecimiento poblacional y cambio climático en la disponibilidad hídrica	Cálculo de parámetros hidrológicos se mediante WEAP	En 2050 habrá escasez. Se disminuirá la disponibilidad en todo el valle	(Chamizo-Checa et al., 2018)
Analizar contaminantes orgánicos en aguas residuales, manantiales y fuentes subterráneas	Muestreo de 17 pozos, 4 manantiales y 9 canales de riego	Detección de compuestos orgánicos volátiles y semi volátiles	(Lesser et al., 2018)
Evaluar el riesgo de salinización de los suelos irrigados	Determinar la concentración de los iones, pH y conductividad eléctrica	Sodio intercambiable presente en suelo arenoso, franco y arcilloso	(Pérez-Díaz et al., 2019)
Determinar las enfermedades gastrointestinales por el uso de agua contaminada	Modelo logístico binomial considerando variables sociodemográficas	La enfermedad es causada por fuente de abastecimiento o por carencia de drenaje	(Lara-Figueroa & García-Salazar, 2019)
Rastrear cinco compuestos farmacéuticos utilizados contra el COVID-19	Monitoreo durante 30 meses, en la salida del Emisor Central	Concentración de fármacos cercanas o mayores al ochenta por ciento	(Durán-Álvarez, 2023)
Análisis de riesgo por exposición a aguas residuales	Muestreo del agua residual antes y después de tratamiento	El riesgo aumentó más en una sección tratada que en una no tratada	(Espira et al., 2024)

Sociales			
Analizar la centralización gubernamental sobre manejo del agua	Considerar el Derecho al Agua mediante ecología política e historia ambiental	Los campesinos son: regantes de aguas contaminadas y consumidores del acuífero	(Suárez, 2016)
Determinar cómo el uso de aguas residuales configuró el espacio agrícola	Revisión literatura sobre la problemática del agua residual	El agua trajo desarrollo, problemas de salud pública y ambientales	(García-Salazar, 2019)
Historia del VM desde la década de 1930	El indigenismo, agrarismo y proyecto migratorio	El espacio sociocultural se basa en clase y etnicidad	(Contreras-Román, 2019)
Comprender la relación entre la comunidad rural y el mezquite	Medición de Sistemas de Gestión por indicadores	La comunidad no propaga el mezquite, confía en su regeneración natural	(Pérez-Serrano et al., 2021)
Analizar el sistema socio ecológico del valle	Examinación de subsistemas biofísicos y socioeconómicos	El agua propició altos rendimientos agrícolas a expensas del medio ambiente	(Durán-Álvarez et al., 2021)
Conocer las razones contra el programa de transferencia de derechos de riego	Investigación cualitativa basada en historia, entrevistas y reuniones	Los agricultores asumen costos sin subsidios para el filtrado del agua residual	(Suárez, 2024)
Cambio climático			
Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero y carbono negro	Crear inventarios de emisiones según la metodología del IPCC de 1996	Las principales fuentes de CO_2 fueron la transformación y la manufactura	(Montelongo-Reyes et al., 2015)
Factores de emisión de N_2O de un terreno irrigado con aguas residuales	Medir emisiones de N_2O en una parcela irrigada con aguas residuales	La alfalfa produjo menores emisiones de N_2O. El maíz, perdió nitrógeno como N_2O	(González-Méndez et al., 2020)
Biológicos			
Enlistar los anfibios y reptiles en diferentes zonas del valle	Analizar la distribución en diferentes tipos de microhábitats	La mayoría estaban una en zona templada y otra de riego	(Fernández-Badillo & Goyenechea, 2010)
Describir los artrópodos que habitan a los garambullos	Recolectar individuos, agrupados en familias y órdenes	Hymenoptera registró el mayor número de morfoespecies y de individuos	(Sanjuan-Trejo et al., 2020)
Determinar la calidad fisicoquímica de los xoconostles cultivados y silvestres	Tratamiento de datos con el programa JMP V8 y análisis de varianza	Los xoconostles silvestres mostraron más calidad respecto a cultivados	(Gutiérrez-Rojas et al., 2022)
Suelo			
Cuantificar la concentración de metales pesados en suelo y en alfalfa	Análisis bajo un diseño de azar con arreglo factorial 2^2	La alfalfa posee Ni y Cd que sobrepasaron el valor de la norma	(Cornejo-Oviedo, 2012)
Determinar el grado de absorción de Cd y Pb en suelos de cultivo	Muestreo de suelo tres días antes de la cosecha	La concentración de Pb en el suelo 0.45 mg/kg y de Cd 0.07 mg/kg	(Lara-Viveros, 2015)
Configuración de un mosaico vegetal en un municipio del VM	Medición de distancias entre el árbol más antiguo y los cercanos	El árbol más longevo es el nodo inductor de plantas vecinas	(Monroy-Ata et al., 2023)

Hasta la fecha no se ha realizado una investigación específica que aborde la relación entre el agua y la energía en el VM, a pesar de contar con recursos hídricos significativos, tanto superficiales como subterráneos, que resultan fundamentales para el abastecimiento de agua a la población y para diversas actividades productivas, particularmente en la agricultura y la industria (Chamizo-Checa, 2018; Durán-Álvarez et al., 2021; Durán–Álvarez & Jiménez–Cisneros, 2014; García-Salazar, 2019). Asimismo, la región alberga dos importantes infraestructuras de transformación energética: la central termoeléctrica Francisco Pérez Ríos y la refinería Miguel Hidalgo, y presenta una alta demanda energética y gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), impulsada por los corredores industriales asentados en la zona (Elizagaray-Mandujano, 2021; Montelongo-Reyes, 2015; Montelongo-Reyes et al., 2015). Comprender la interrelación entre estos recursos es clave para desarrollar estrategias que optimicen su uso y contribuyan a un desarrollo sostenible del valle.

2.2. Investigaciones relevantes del Nexo Agua-Energía

En la Tabla 2 se recopilan algunas investigaciones relevantes a nivel mundial sobre el Nexo AE, destacando especialmente los estudios realizados en años recientes. Estas investigaciones abordan múltiples perspectivas, que van desde análisis de casos específicos en ciudades hasta comparaciones entre diferentes regiones o países. Asimismo, se exploran diversos aspectos relacionados con la gestión eficiente de los recursos, la sostenibilidad ambiental y las implicaciones frente al cambio climático, reflejando la complejidad y la relevancia global del nexo

Los estudios presentados en la tabla demuestran una creciente atención global al nexo, con aplicaciones en diversas regiones y contextos. Un tema recurrente es la implementación de energías renovables, para reducir costos operativos y emisiones GEI. Otros estudios amplían la visión al considerar aspectos sociales y de género, señalando la responsabilidad diferenciada en el uso del agua y la energía en los hogares. En conjunto, estas investigaciones confirman la importancia de adaptar el nexo a las condiciones locales para optimizar el uso del agua y la energía, reduciendo su huella ambiental y contribuyendo a los ODS.

.

Tabla 2. Estudios de caso relevantes relacionados con el Nexo Agua-Energía.

Área geográfica	Caso de estudio	Resultados	Referencias
Texas, Estados Unidos	Implementación de sistemas desalinización alimentados por energía renovable	Se pueden reducir los costos de electricidad en verano e invierno	(Gold & Webber, 2015)
Ciudad de México, México	Evaluar la demanda energética y las emisiones en sistemas de suministro y tratamiento de agua	Se puede ahorrar electricidad y mitigar emisiones reduciendo las fugas o modificando la tarifa domestica	(Valek et al., 2017)
Hasanlu, Irán	Uso de energía renovable en plantas de tratamiento en zonas áridas	La energía solar cubriría el consumo eléctrico total disminuyendo costos	(Sarikhani et al., 2023)
Guanajuato, México	Suministro de agua y energía en comunidades rurales por índice de Shannon Wiener	Para maximizar el índice se debe aumentar la energía fotovoltaica y eólica	(Fuentes-Cortés et al., 2023)
Huainan, China	Aplicación del nexo centrales carboeléctricas	El consumo de agua y energía del Escenario de Sostenibilidad será menor que el Base y el de Crisis	(Wu et al., 2023)
Tehran, Irán	Aplicación del nexo para una central de ciclo combinado	Las propuestas disminuyen el consumo y las emisiones de NOx	(Kahe et al., 2023)
China	Se monitorearon plantas de tratamiento de aguas residuales para cuantificar emisiones GEI	La huella de carbono más alta provino de emisiones relacionadas con la electricidad	(He et al., 2023)
Santa Elena, Ecuador	Utilización del software LEAP para evaluar el nexo	La mayor demanda energética fue para bombeo de agua y el sector residencial	(Chengot et al., 2024)
Mongolia, China	Evaluación y predicción del nexo a escala provincial	El nexo disminuyó de 2012 a 2016 por la baja producción energética	(Kang et al., 2024)
Incheon, Corea del Sur	Análisis de sistemas de desalinización por ósmosis inversa alimentados con energía renovable	Reducción en los costos operativos y de las emisiones, además de mejorar la eficiencia	(Ba-Alawi et al., 2024)
Ciudad Juárez, Chihuahua, México	Análisis de viabilidad económica de instalar paneles solares en estaciones de bombeo de agua	Los paneles con o sin baterías son económicamente viables para el bombeo	(Delgado et al., 2024)
Shanghái, China	Utilizar métodos etnográficos para conocer las prácticas que consumen energía y agua en un hogar	En las labores relacionadas al nexo las mujeres tienen más responsabilidad, contribuyendo en prácticas de higiene y sanidad	(Larrington-Spencer et al., 2024)
Santa Lucia, Australia	Evaluar y comparar el consumo de agua-energía residencial	El consumo residencial es el 27% del total de energía primaria y entre el 20-50% de la energía urbana total	(Hall et al., 2025)
China	Interconexión del agua-energía en áreas urbanas y su relación con los ODS	Desempeño deficiente en los ODS 8 a 11, lo que sugiere la necesidad de tomar acciones	(Yu et al., 2025)

2.3. Indicadores del Nexo Agua-Energía

A lo largo del tiempo, diversos estudios han propuesto indicadores para cuantificar y comprender la relación entre el agua y la energía dentro de distintos contextos mediante indicadores e índices. Estos permiten evaluar el desempeño, la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas en los que ambos recursos interactúan. En la Tabla 3 se presentan algunos de los indicadores más relevantes encontrados en la literatura, proporcionando una visión de la interrelación entre agua y energía en distintos escenarios de análisis.

Tabla 3. I ndicadores del Nexo Agua-Energía

Indicador	Descripción	Referencias
1) Energía producida por agua consumida **2)** Agua obtenida por energía consumida	*1)* $e_a = \frac{(e_{out} - e_{in})}{a_{in}}$; 2) $w_e = \frac{(a_{out} - a_{in})}{e_{in}}$ **Donde:** e_a energía producida; w_e agua obtenida; e_{out} energía de salida; e_{in} energía de entrada; a_{in} agua de entrada; a_{out} agua de salida	(Voinov, 2009)
Energía consumida por el sector económico	$v_i^{ene} = \sum_{m=1} e_i^m$ **Donde:** v_i^{ene} es la suma de los energéticos consumidos por sector; e_i^m tipo de energético (gasolina, diésel, electricidad, gas natural, etc.),	(Chen & Chen, 2016)
Demanda hídrica del sector económico	$v_i^{agua} = \sum_{m=1} a_i^m$ **Donde:** v_i^{agua} es la suma de los tipos de agua utilizados por sector; a_i^mes el tipo de agua (superficial, de pozo, desalinizada, tratada, etc)	
1. Energía requerida por el sistema hídrico **2.** Agua requerida para generar energía	1. $v_i^{a-ene} = \sum_{m=1} a_i^m * e^{-m}$ 2. $v_i^{e-agua} = \sum_{m=1} e_i^m * a^{-m}$ **Donde:** v_i^{a-ene} energía requerida por el sistema hídrico; v_i^{e-agua} es el agua requerida para generar energía; a_i^m agua consumida por energía generada; e_i^m energía consumida por unidad de agua; i es el sector económico; a es el recurso hídrico; e es el recurso energético	
1. Energía hibrida (energía para suministro de agua) **2.** Agua hibrida (agua consumida para generar energía)	1. $v_i^{h-ene} = v_i^{ene} + v_i^{a-ene}$ 2. $v_i^{h-agua} = v_i^{agua} + v_i^{e-agua}$ **Donde:** v_i^{h-ene} energía híbrida; v_i^{h-agua} agua híbrida; v_i^{agua} es la suma de los tipos de agua utilizados por sector; v_i^{ene} es la suma de los energéticos consumidos por sector; v_i^{a-ene} energía requerida por el sistema hídrico; v_i^{e-agua} es el agua requerida para generar energía	
Productividad del Nexo Agua-Energía	$WEP_A = \frac{\sum_{i=1}^{Y} HE_i}{\sum_{i=1}^{Y} EV_i}$ Donde: WEP_A es la Productividad Agua-Energía anual (GWh / Mm^3), HE_i es la generación de energía hidroeléctrica en el i-ésimo día del año (GWh), EV_i es la evaporación del yacimiento en el i-ésimo día del año (Mm^3) e Y es el número de días del año.	(Basheer & Ahmed Elagib, 2019)

La Tabla 3 evidencia el desarrollo de una variedad de indicadores diseñados para cuantificar la interdependencia entre los sistemas hídricos y energéticos desde distintas perspectivas. Además, se incluyen métricas sectoriales que integran el consumo de distintos tipos de agua y energía por sector económico, que ofrecen una visión más completa del intercambio entre ambos recursos. En conjunto, estas herramientas constituyen una base metodológica sólida para una gestión integrada y sostenible del nexo en diversos contextos territoriales y climáticos.

No obstante, entre los indicadores presentados, los más adecuados para evaluar el Nexo de manera directa son la productividad del nexo Agua-Energía, la energía producida por agua consumida y el agua obtenida por energía consumida, permiten una cuantificación precisa de la interdependencia entre ambos recursos. Sin embargo, según los objetivos específicos del estudio o proyecto.

Además de los indicadores, existen modelos específicos para evaluar el nexo. Entre los más destacados se encuentra Climate, Land, Energy and Water Systems (CLEWS), que integra el análisis de clima, agua, energía y tierra desde una perspectiva sistémica. Las herramientas de evaluación publicadas por el Banco Mundial (World Bank Climate and Disaster Risk Screening Tools) también aportan al análisis al identificar riesgos climáticos y geofísicos en proyectos vinculados al nexo (Dargin et al., 2019). Sin embargo, los modelos más recomendados por el IPCC para los informes que envían los países a la comisión del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) son WEAP-LEAP, que predicen la demanda y el suministro de agua o energía, teniendo en cuenta los impactos intersectoriales y ambientales.

A continuación, se describe en detalle el modelo de Análisis de Bajas Emisiones LEAP (Low Emissions Analysis Platform), el cual será utilizado para analizar la demanda y transformación energética en el valle. Este análisis constituye un paso clave para evaluar posteriormente el Nexo Agua-Energía, permitiendo identificar patrones de consumo, fuentes de generación y su relación con el uso del recurso hídrico.

2.4. Plataforma de análisis para el cálculo de emisiones, demanda y generación energética (LEAP)

Existen diversos métodos para el análisis de escenarios de demanda y transformación energética, muchos de ellos centrados únicamente en costos o en el sector eléctrico. No obstante, en los últimos años ha ganado relevancia el modelo LEAP, desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI), el cual se ha consolidado como una herramienta clave para evaluar escenarios energéticos integrales y estrategias de mitigación de emisiones de GEI. Su enfoque flexible y multisectorial lo convierte en un aliado importante en la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles (Raza et al., 2022; Heaps, 2022).

LEAP es un modelo matemático que permite generar proyecciones futuras sobre la generación y demanda de energía, así como el cálculo de las emisiones de GEI y contaminantes a la atmósfera. Este modelo ofrece un análisis detallado de sectores específicos como la industria (Talaei et al., 2018), los hogares (Tietie et al., 2021), los edificios públicos (Zha et al., 2023), el transporte (Yang et al., 2023), entre otros. Además, LEAP incorpora módulos adicionales para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de recursos naturales, las emisiones no energéticas, y tiene la capacidad de integrarse con el modelo WEAP, que calcula escenarios de demanda-disponibilidad hídrica. Esta vinculación permite calcular indicadores clave para evaluar el Nexo Agua-Energía de manera más completa y precisa.

LEAP fue concebido originalmente como una herramienta para modelar únicamente escenarios de demanda energética y costos, bajo el nombre de Long-Range Energy Alternatives Planning System. Su objetivo inicial era apoyar la planificación energética a largo plazo mediante análisis sectoriales. Sin embargo, con el tiempo y en respuesta al creciente interés por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de GEI, se incorporaron módulos adicionales para estimar emisiones y su potencial de mitigación, reflejando su ampliada capacidad para abordar no solo aspectos energéticos, sino también ambientales y de sostenibilidad.

En la actualidad, LEAP es empleado en más de 190 países por una amplia gama de actores, incluyendo agencias gubernamentales, instituciones académicas, organizaciones no gubernamentales, consultoras y proveedores de servicios energéticos (Wen et al., 2024). Su

versatilidad le permite aplicarse en distintos niveles de análisis, desde contextos locales hasta escenarios nacionales y globales. Además, su sitio web oficial alberga una base de datos con múltiples estudios de caso que evidencian su aplicabilidad en diversas realidades socioeconómicas y climáticas. En la Tabla 4 se presentan algunas investigaciones más recientes realizadas con LEAP.

Tabla 4. Investigaciones relevantes que utilizan el modelo LEAP

Área geográfica	Caso de estudio	Resultados	Referencias
Bogotá, Colombia	Analizar la demanda energética y emisiones en cuatro sectores	Para 2050, el transporte será mayor consumidor energético	(Nieves et al., 2019)
Laos, Nigeria	Examinar medidas políticas para transformar el sistema de transporte	Para una reducción de emisiones, la antigüedad de los vehículos debe ser menor a 40 años	(Maduekwe et al., 2020)
Shanghai, China	Analizar el consumo de energía y sus emisiones desde 2021 hasta 2060	Las emisiones entran en un período de estabilización después de 2035, con un declive posterior	(Ren et al., 2022)
Ghana, África	Aplicación de una política enfocada al uso mayoritario de energía solar	Aumentar la capacidad instalada de energía solar podría mitigar 13 millones de toneladas de CO_2	(Amo-Aidoo et al., 2022)
Egipto	Análisis de demanda y generación energética en el período 2020-2050	El uso de gas natural en la generación disminuirá 61.5% para 2050	(El-Sayed et al., 2023)
China	Predicción del pico de emisiones en los edificios públicos de China	Controlar el área de los edificios reducirá las emisiones, que alcanzarán su pico en 2029	(Zhang & Luo, 2023)
China	Predecir la demanda energética industrial de 2022 a 2060	La demanda aumentó antes de 2039, y luego disminuye a partir de 2049	(Li et al., 2024)
Beijing, China	Investigar la demanda hidrógeno y su impacto en la reducción de emisiones	La demanda máxima de hidrógeno será en 2060 y las emisiones GEI reducirán	(Shi et al., 2024)
Henan, China	Se pronosticaron las emisiones de contaminantes para el período de 2020 a 2035	Para 2035, las emisiones GEI disminuirán	(Zhang et al., 2025)

En general, los resultados coinciden en la importancia de implementar estrategias de mitigación, como la adopción de energías renovables, la modernización de tecnologías y el control del uso de recursos, para lograr la reducción de emisiones a mediano y largo plazo. Además, se observa una tendencia común hacia la estabilización y posterior disminución de emisiones a partir de ciertas fechas clave, como 2035 o 2040, lo que resalta el impacto positivo de las políticas energéticas y ambientales adecuadas. Estos estudios proporcionan una base para la planificación estratégica orientada a un desarrollo energético sostenible y la mitigación del cambio climático.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Estudiar el desarrollo socioeconómico municipal en el pasado (1985-2020), los escenarios de demanda- transformación energética hacia futuro (2015-2050) además de su relación con los recursos hídricos en el Valle del Mezquital, mediante modelos, softwares especializados para identificar las tendencias de crecimiento sectorial, evaluar el potencial de mitigación de emisiones y consumo energético sectorial, por último, reportar los indicadores del Nexo Agua-Energía correspondientes. Los resultados obtenidos serán de utilidad para los tomadores de decisiones en políticas públicas y la elaboración de programas específicos para sus municipios.

3.2. Objetivos específicos

- **Estimación de los volúmenes históricos de agua residual de la Ciudad de México importada por el Valle del Mezquital (1985-2020)**

Determinar los volúmenes de agua residual y pluvial provenientes de la Ciudad de México, que han ingresado al Valle del Mezquital en el período 1985-2020 cada cinco años, mediante un modelo basado en la distribución espacial del sistema de drenaje, precipitación, escorrentías, caudales de ríos que aportan a los emisores y las aguas residuales, para obtener datos concretos del recurso hídrico que ha ingresado a la región que serán de utilidad para estudios futuros, debido a que no existen datos oficiales publicados.

- **Desarrollo socioeconómico de los municipios del Valle del Mezquital (1985-2020)**

Analizar el desarrollo socioeconómico y agrícola de los 26 municipios del VM, con datos oficiales agrícolas, industriales, comerciales y sociales, para diez parámetros 1985 hasta 2020, para cada municipio, utilizando los algoritmos t-SNE y k-medias para detectar similitudes, diferencias entre ellos e irregularidades. La coincidencia geográfica de los clústers obtenidos con las áreas con disponibilidad del agua permitirá observar si se relaciona

con la evolución de cada parámetro. Estos resultados serán útiles para la toma de decisiones en la formulación de políticas públicas.

- **Escenarios de demanda y transformación energética del Valle del Mezquital (2015-2050)**

Estimar la demanda energética de los sectores residencial, industrial, agrícola y servicios del VM en el año base 2015 y en diferentes escenarios hasta el 2050 mediante el software LEAP, considerando el crecimiento poblacional, de los sectores mencionados y las medidas de mitigación de la demanda, así como de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes. Calcular el potencial de mitigación de emisiones en el sector de la transformación energética del VM hasta el año 2050 con el software LEAP, considerando los proyectos de energía renovable previstos en la región.

- **Indicadores del Nexo Agua-Energía en el Valle del Mezquital (2015-2050)**

Reportar los indicadores del Nexo Agua-Energía para la demanda y transformación energética en el VM, utilizando los resultados de energía obtenidos y los datos oficiales de volúmenes de agua consumidos por la industria de la transformación energética y los reportados en la literatura por sectores, para analizar la sustentabilidad de la interacción entre ambos recursos.

4. METODOLOGÍA

4.1. Modelo conceptual para la estimación de los volúmenes históricos

El modelo se centra en estimar los volúmenes de descarga de agua que ingresan a tres emisores principales del sistema de drenaje, los cuales reciben aportes de cinco fuentes distintas: población, industria, servicios, agua pluvial y agua proveniente de ríos (ver Figura 6). Las estimaciones se realizaron en intervalos de cinco años, para el periodo comprendido entre 1985 y 2020. Finalmente, los volúmenes calculados fueron agrupados según el afluente por el cual ingresan al VM, facilitando así el análisis espacial y temporal de las descargas hídricas en la región.

Figura 6. Esquema de las entradas de agua residual al sistema de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Fuente elaboración propia

4.1.1. Premisas del modelo conceptual

- El periodo de tiempo considerado en el modelo es de 1985 al 2020. Se eligió 1985 como año de inicio debido a que en 1982 el sistema Cutzamala entró en funcionamiento, dando lugar a las condiciones que prevalecen actualmente en cuanto al agua potable que recibe la población.

- Los cálculos fueron realizados para los años terminados en 5 y 0, dentro del periodo de estudio.
- Se exceptúa del análisis el Túnel Emisor Oriente, debido a que entró en funcionamiento en 2019, lo cual no cumple con los requisitos de tiempo.
- En las delegaciones donde comparten territorio el Túnel Emisor Central y el Gran Canal, se consideró que toda la población vierte sus aguas residuales hacia el Emisor Central, debido al amplio sistema de colectores que posee.
- Se consideró que toda la población tiene la misma dotación de agua potable (190 Litros/habitante/día), tomando como referencia el consumo estimado por clima predominante proveniente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2019a). El modelo considera esto constante en el tiempo.
- Se asumió que el 75% del agua potable suministrada a la población va al drenaje, de acuerdo con lo especificado en el Manual de Agua, Alcantarillado y Saneamiento (CONAGUA, 2019a).
- Las descargas totales de ríos, lluvia, agua residual poblacional, industrial y de servicios, no están separadas dentro del sistema de drenaje.
- Los volúmenes de agua residual de industria y servicios que han ingresado al sistema de drenaje fueron obtenidos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).
- Se consideró que todos los días del año hay descargas industriales y de servicios, debido a que en el sistema REPDA no se especifica.
- Se asumió que en aquellos lugares donde no había suficientes datos en los reportes del REPDA, se tomaría en cuenta para todos los años el valor más alto reportado para la industria y servicios.
- El cálculo de agua pluvial se realizó con los reportes de estaciones climatológicas que estuvieran dentro de las áreas de escurrimiento, tomando como referencia el trabajo realizado por Saikia, Ryan, Nuyts, & Clifford, (2022), además de considerar las recomendaciones del “Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento” (CONAGUA, 2019b)

- Las áreas de escurrimiento de las zonas se calcularon de los mapas del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) para cada uno de los emisores, teniendo como base el trabajo de Godínez-Brizuela, (2018) .
- El coeficiente de escorrentía urbana para el agua de lluvia (0.80) se tomó del Manual de Agua Potable y Saneamiento.
- Las estaciones hidrométricas solo fueron consideradas para los ríos que vierten sus aguas al Emisor Poniente y el Gran Canal.
- Se asume que toda el agua residual ingresa al VM a través de los ríos El Salado y El Salto.
- No se contabilizaron los volúmenes de agua provenientes de las presas y vasos reguladores, para no duplicar los volúmenes de agua provenientes de los ríos.
- Los emisores se denominaron mediante las siguientes siglas: Gran Canal (GC), Túnel Emisor Central (TEC) y Túnel Emisor Poniente (TEP).

4.1.2. Bases de datos recabadas para el modelo matemático

Las bases de datos empleadas en este estudio fueron principalmente obtenidas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En la Tabla 5 se presentan de manera detallada las fuentes de información consultadas para la recopilación de datos.

Tabla 5. Aspectos considerados para bases de datos y fuentes consultadas.

	Aspectos considerados	Fuente	Referencias
Población	Habitantes totales de los municipios y delegaciones que vierten agua residual a los emisores del sistema de drenaje.	Censos de población y vivienda Anuarios estadísticos	(INEGI, 1970, 1980, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020a)
Industria y servicios	Reportes de descargas industriales y de servicios en los municipios y delegaciones seleccionados.	Reportes del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA)	(CONAGUA, 2022)

Agua pluvial	Promedio de precipitación por décadas en mm, reportada por las estaciones climatológicas consideradas para cada emisor.	Reportes del Servicio Meteorológico Nacional	(CONAGUA, 2019c, 2020a)
	Áreas de escurrimiento en m^2 para cada emisor.	Mapas del Simulador de Flujos de Agua por Cuencas Hidrográficas	(INEGI, 2022b)
Ríos	Caudales históricos de los ríos que forman parte del Túnel Emisor Poniente y Gran Canal.	Reportes de estaciones hidrométricas	(CONAGUA, 2019c)

4.1.3. Estimación de descargas de agua residual de la población a cada emisor

Mediante la superposición de mapas en el software QGIS, se desagregó la población específica que descarga sus aguas residuales en cada emisor del sistema de drenaje. Para ello, se utilizaron dos cartografías vectoriales a escala 1:250,000: el mapa del sistema de drenaje dividido por emisores y la División Municipal de la República Mexicana (INEGI, 2020b).

El área de estudio abarca 31 municipios del Estado de México y las 16 delegaciones de la Ciudad de México. Posteriormente, estos se agruparon según el emisor al que tributan sus descargas de agua residual, tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Municipios y delegaciones que vierten agua residual a cada emisor del drenaje de la Ciudad de México

	Estado de México		Ciudad de México
Gran Canal de Desagüe	Apaxco Atenco Atizapán Chalco Chicoloapan Chimalhuacán Ecatepec Ixtapaluca Jaltenco La Paz	Naucalpan Nextlalpan Nezahualcóyotl Tecámac Temamatla Tequixquiac Texcoco Valle de Chalco Zumpango	Álvaro Obregón Benito Juárez Magdalena Contreras Milpa Alta Tláhuac Tlalpan Xochimilco
19 municipios **7 delegaciones**			
Túnel Emisor Central	Coyotepec Cuautitlán Izcalli Huehuetoca Tepotzotlán Tlalnepantla		Azcapotzalco Coyoacán Cuauhtémoc Gustavo A. Madero Iztacalco Iztapalapa Miguel Hidalgo Venustiano Carranza
7 municipios **8 delegaciones**			
Túnel Emisor Poniente	Cuautitlán Huixquilucan Naucalpan	Teoloyucan Tultitlán	Cuajimalpa
5 municipios **1 delegación**			

Para estimar las descargas poblacionales se consideraron varios factores que permiten un cálculo más preciso y realista: porcentaje de población con acceso a agua potable y drenaje, consumo promedio diario de agua por habitante, y porcentaje de agua vertida al drenaje por habitante. Estos datos fueron obtenidos de reportes de las comisiones de agua del Estado de México y de la Ciudad de México (CONAGUA, 2005, 2010, 2015, 2020b).

Dado que antes del año 2000 no existen reportes sobre cobertura de servicios, se utilizaron los datos del 2000 como referencia inicial. Se estima que la población de la Ciudad de México tiene aproximadamente un 10% más de cobertura en ambos servicios que la del Estado de México (Jiménez-Ramón, 2018).

Se asumió un consumo promedio de agua potable de 190 L por habitante por día para ambas poblaciones. Además, se consideró que el 75% de este consumo se descarga al sistema de drenaje (CONAGUA, 2019a).

Conociendo el número total de habitantes que descargan agua en cada emisor y aplicando los porcentajes mencionados, se calcularon los volúmenes de agua residual en metros cúbicos que genera la población utilizando las siguientes ecuaciones:

- Población real que tributa agua al sistema de drenaje.

$$PR = HT * HAP * HAD \qquad \textbf{(Ec. 1)}$$

Donde: PR población de la ZMCM que vierte agua al sistema de drenaje, HT habitantes totales por año establecido, HAP porcentaje de habientes con acceso a agua potable, HAD porcentaje de habitantes con acceso a la red de drenaje (CONAGUA, 2019b)

- Estimación de volúmenes anuales de consumo de agua potable de la población.

$$VRC = \frac{PR * CR * DA}{FC} \qquad \textbf{(Ec. 2)}$$

Donde: VRC volúmenes anuales de consumo de agua potable [m3/año], CR dotación de agua a la población [L/hab/d], PR población, DA días totales en un año, FC factor de conversión de litros a metros cúbicos

- Volúmenes de agua residual poblacional que ingresan al sistema de drenaje.

$$VRD = VRC * DSD \quad \textbf{(Ec. 3)}$$

Donde: VRD volúmenes anuales de agua residual poblacional que ingresan al drenaje [m^3/año], VRC volúmenes anuales de consumo de agua potable [m^3/año], DSC porcentaje de agua potable que ingresa al drenaje [0.75] (CONAGUA, 2019b)

4.1.4. Estimación de volúmenes de agua residual proveniente de descargas industriales y servicios que ingresan a cada emisor del drenaje

Para estimar los volúmenes de descargas industriales y de servicios se consultaron los Registros Públicos de Derechos de Agua (REPDA), buscando por tipo de aprovechamiento (descargas residuales) y ubicación específica. Las bases de datos utilizadas abarcan desde 1995, año en que inició operaciones el REPDA (CONAGUA, 2020a).

Los datos se procesaron según las industrias y servicios ubicados en los municipios y delegaciones que aportan agua a cada emisor. Dado que no toda la información estaba disponible para todos los años, se asumió el valor máximo reportado en el periodo para los años faltantes. Para el cálculo de los volúmenes de vertidos industriales, se consideraron únicamente los años terminados en cero y cinco, aplicando la ecuación 4.

- Volúmenes de agua residual industrial y de servicios que ingresan al sistema de drenaje.

$$VDI = VRD * DA \qquad \textbf{(Ec. 4)}$$

Donde: VDI volúmenes anuales de agua residual industrial y de servicios que ingresan al drenaje [m^3/año], VRD volúmenes de descarga de la industria y los servicios [m^3/día], DA días totales de un año

4.1.5. Estimación del agua pluvial que ingresa a cada emisor del sistema de drenaje

Para estimar el volumen de agua pluvial se emplearon los promedios anuales por década (mm) desde 1980 hasta 2020, basados en los registros de estaciones climatológicas ubicadas en las zonas de estudio.

La selección de estaciones climatológicas para cada emisor se realizó mediante superposición de mapas en QGIS. Se usaron capas vectoriales de estaciones climáticas de CONAGUA (2020b) y mapas KML de áreas de escurrimiento de emisores reportados por (INEGI, 2022), ambos con escala 1:250,000. Se excluyeron estaciones climatológicas fuera de operación y se seleccionaron aquellas con mayor representatividad según polígonos de Thiessen. Finalmente, se consideraron 129 estaciones para el sistema de drenaje: 41 para el Gran Canal (GC), 62 para el Túnel Emisor Central (TEC) y 26 para el Túnel Emisor Poniente (TEP).

- Volúmenes de agua pluvial que ingresan al sistema de drenaje.

$$VAP = \frac{PPD * AE}{FC} \qquad \textbf{(Ec. 5)}$$

Donde: VAP volúmenes anuales de agua pluvial que ingresan al drenaje [m^3], PPD promedio de precipitación [L/m^2], AE áreas de escurrimiento [m^2], FC factor de conversión de litros a metros cúbicos [1000]

4.1.6. Estimación de los volúmenes aportados por los ríos que forman parte del sistema de drenaje

Se consideraron los ríos del poniente de la ciudad que desembocan en el TEP (CONAGUA, 2018b), así como aquellos que forman parte del cauce del GC. Los volúmenes de descarga se calcularon con la ecuación 6, utilizando los caudales promedio [m^3/s] reportados por las estaciones hidrométricas cada cinco años.

El GC recibe aguas provenientes de varios ríos, entre ellos el río de la Piedad, Churubusco, de los Remedios y San Buenaventura, así como los escurrimientos procedentes de la zona oriente del Estado de México.

El TEP está conectado a diversos afluentes, entre los que se encuentran: El Sordo, Hondo, San Joaquín, Tacubaya, Becerra, Mixcoac, Tarango, Las Flores, Dolores, Colorado, Totolica, Los Arcos, Los Cuartos, La Mina, Tequilasco, Anzaldo, Texcalatlaco, El Capulín, Ruiz Cortines, Pilares, Tecamachalco, El Tornillo y El Periodista.

- Volúmenes de agua residual de los ríos que forman parte del sistema de drenaje.

$$VAP = CPR * STA \quad \textbf{(Ec. 6)}$$

Donde: VAR volúmenes anuales de agua residual de los ríos parte del drenaje [m^3/año], CPR caudales promedios reportados por las estaciones hidrométricas [m^3/s], STA segundos totales de un año

Finalmente, los volúmenes estimados se agruparon según el emisor correspondiente por el cual ingresan al VM: el TEC y el TEP aportan sus descargas a través del río El Salto, mientras que el GC lo hace mediante el río El Salado. El acceso al agua ha influido directamente en el desarrollo del valle; las zonas con mayor disponibilidad hídrica, como la región centro-sur, presentan un desarrollo más avanzado, en contraste con áreas con restricciones en el suministro, como la zona norte.

Además de sus recursos hídricos, el VM cuenta con una industria manufacturera y energética que juega un papel clave en el desarrollo regional. Esta industria depende directamente del agua residual disponible en la zona, lo que resalta la necesidad de gestionar ambos recursos de forma eficiente. La integración adecuada del agua y la energía podría ofrecer una alternativa sostenible para el valle. Para analizar la demanda energética se empleó el software LEAP. Posteriormente, se calcularán los indicadores del Nexo AE utilizando los volúmenes reportados por Chamizo-Checa (2018).

4.2. Modelo conceptual para el análisis socioeconómico del Valle del Mezquital

- El periodo de análisis abarcó de 1985 a 2020, considerando únicamente los años terminados en 5 y 0.
- Los municipios considerados para el trabajo fueron: Actopan, Ajacuba, Alfajayucan, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Chapatongo, Chilcuautla, El Arenal, Francisco I. Madero, Huichapan, Ixmiquilpan, Mixquiahuala, Nopala, Progreso de Obregón, San Agustín Tlaxiaca, San Salvador, Santiago de Anaya, Tasquillo, Tecozautla, Tepeji del Río, Tepetitlán, Tetepango, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Tula de Allende.
- Los datos son obtenidos de fuentes oficiales, como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) y el Gobierno del Estado de Hidalgo.
- Se obtiene una base de datos compuesta por 16 parámetros para ser utilizados como indicadores de cada municipio del VM. Estos fueron: población, kilómetros de carreteras, número de pozos, total de usuarios para cada una de las tarifas eléctricas, unidades médicas (1ro a 3er nivel), unidades educativas (escuelas primarias, secundarias y preparatorias), vehículos inscritos, número de empleados en los sectores manufactura, servicios, comercio y actividades primarias, total de industrias, comercios, finanzas públicas municipales (EFIPEM), superficie (ha) destinada a agricultura de riego, superficie (ha) de zonas urbanas, índices de pobreza, marginación y rezago. No se tienen reportes del Producto Interno Bruto (PIB) a nivel municipal.
- La base de datos es depurada previo análisis de las líneas de tiempo de cada indicador a nivel municipal, eliminando a) los indicadores que carecían de información confiable, como los kilómetros de carreteras y las hectáreas de área urbana, b) aquéllos que no contaban con todos los datos para el periodo de tiempo requerido: el número de pozos, total de usuarios de las diversas tarifas eléctricas, los índices de pobreza, marginación y rezago.

- El número de empleados fue el único indicador para el cual se realizaron extrapolaciones para el año 2020, debido a la ausencia de datos. En los indicadores total de industrias manufactureras y área agrícola de riego, se realizaron interpolaciones para obtener los años 1985, 1990 y 1995.
- La base de datos utilizada fue conformada finalmente por 8 indicadores: población total, empleados en los sectores manufacturero, de servicios, comercio y actividades primarias; vehículos en circulación, total de industrias manufactureras, comercios, área agrícola de riego, unidades médicas y escuelas.
- Se asume que el sector social puede ser representado por datos que reflejan el bienestar de la población y su calidad de vida: unidades médicas, unidades educativas, empleos en servicios, parque vehicular.
- Se asume que el sector económico puede ser representado por indicadores relacionados con actividades económicas y productivas dominantes en la región: número de industrias manufactureras, de comercios, empleados en manufactura y en comercios. El total de industrias considera tanto las manufactureras como las artesanales, a pesar de las diferencias cualitativas entre ellas.
- Se asume que la agricultura puede ser representada por el número de hectáreas agrícolas de riego y los empleados del sector primario. Las hectáreas agrícolas incluyen los distritos y las unidades de riego, abarcando los ciclos de cultivo de primavera-verano y otoño-invierno. Los empleados del sector primario incluyen a personas dedicadas a la agricultura, ganadería, apicultura y acuacultura, pues no solo se registra el número de agricultores.
- Los datos de finanzas municipales no fueron considerados debido a su poca confiabilidad.

4.2.1. Base de datos

Se consideraron 2,080 datos distribuidos entre los 11 parámetros seleccionados, cuya organización, consideraciones y fuentes de información se detallan en la Tabla 7. Igualmente, en la Figura 7 se presenta un esquema detallado del procedimiento realizado para el análisis de datos y el proceso de clusterización.

Tabla 7. Descripción de la base de datos recopilada para análisis municipal

Parámetro[#]	Unidades	Observaciones
Población	# habitantes	
Sector agrícola		
Área agrícola de riego[&]	Hectáreas	Unidades y distritos de riego
Empleados en el sector primario	# empleados	Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca
Sector económico		
Industrias de la manufactura[≠]	# industrias	No incluye refinería y termoeléctrica
Comercios[≠]	#comercios	
Empleados en el sector secundario	# empleados	En industrias de manufactura
Empleados en comercio	# empleados	
Sector social		
Centros educativos públicos	# centros	Nivel básico, medio y superior
Centros de salud públicos	# centros	Atención primaria y hospitales de primer nivel
Parque vehicular[≠≠]	# vehículos	
Empleados en servicios	# empleados	

[#] INEGI, 1980, INEGI, 1990, INEGI, 1995, INEGI, 2000, INEGI, 2005, INEGI, 2010, INEGI, 2015, INEGI, 2020a. [&] (SIAP, 2005, 2010, 2015, 2020), (INEGI, 1970, 1991). [≠] INEGI, 1999, INEGI, 2004, INEGI, 2009, INEGI, 2014, INEGI, 2019. [≠≠] (INEGI, 2020c)

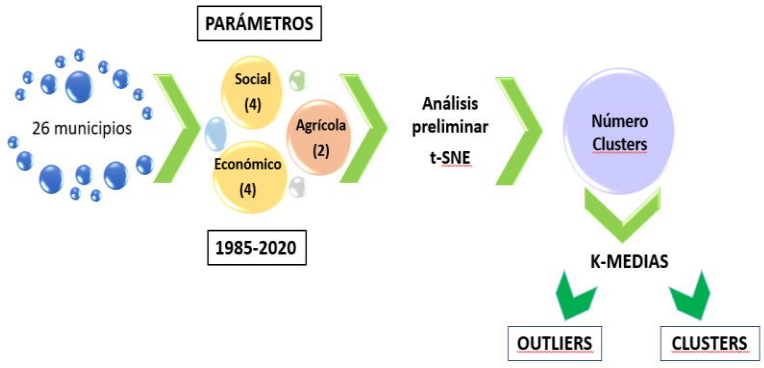


Figura 7. Esquema general de la metodología para el análisis socioeconómico. Fuente elaboración propia

4.3. Modelo matemático para el análisis socioeconómico

Cada indicador se analizó por separado. Se utilizaron todos los valores de la variable analizada de cada quinquenio en todos los municipios combinados. La variable se representa por un vector, y cada componente del vector es el valor de ésta en un año particular, de manera que los municipios quedan agrupados en un mismo clúster debido a las siguientes causas: 1.- Comportamiento temporal similar. 2.- Correlación de tendencias similares ante factores externos. 3.- Dinámicas compartidas cuando la variable está influenciada por factores comunes.

4.3.1. Análisis preliminar por t-SNE

Se aplicó el algoritmo de disminución de dimensiones t-SNE o t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding en inglés (Van der Maaten and Hinton, 2008), para determinar el número de clústeres y la identificación de municipios atípicos, a partir de los gráficos obtenidos que relacionan parámetros con población. Cada parámetro fue analizado por separado, considerando su comportamiento en función de la población e incluyendo todos los valores correspondientes al periodo de estudio.

4.3.2. Aplicación de k-medias

El objetivo de k-medias (MacQueen, 1967) es agrupar los datos en k clústers, con la propiedad de que datos en el mismo agrupamiento tienen una similitud mayor entre ellos que datos en agrupamientos distintos. El algoritmo es eficiente en tiempo por lo que puede ser aplicado a grandes cantidades de datos. El usuario debe proveer el valor de k, es decir, la cantidad de agrupamientos que el algoritmo generará. El algoritmo genera inicialmente k puntos iniciales como centroides de los agrupamientos, estos pueden ser generados de manera aleatoria. Una vez definidos los centroides se asigna cada punto (dato) al centroide más cercano. Todos los puntos estén asignados a un centroide, la ubicación de este es actualizado como el centro de masa de los datos asignados a él. Estos dos pasos se repiten hasta que los centroides ya no cambian de lugar. Para la implementación del algoritmo de k-medias se usa

la función KMeans de skit-learn (Pedregosa, 2011) en lenguaje Python. Se seleccionó un valor de k = 5.

Con base en los resultados preliminares obtenidos mediante el procedimiento de correlación utilizando el algoritmo t-SNE, se observó que la mayoría de los parámetros presentaban dos o tres clústeres, así como uno o dos municipios atípicos en cada análisis. Estos municipios atípicos se distinguieron por comportamientos o características significativamente diferentes al resto, lo que sugiere particularidades económicas, sociales o demográficas que merecen un análisis más detallado.

4.3.3. Generación de mapas

Para analizar espacialmente los resultados generados por k-medias, se crearon mapas utilizando el software QGIS (versión 2023) (QGIS, 2023). Estos mapas permiten visualizar los clústeres de municipios mediante diferentes colores y tonalidades que facilitan la interpretación espacial de los datos. Los municipios con valores altos, medios y bajos se representan en azul fuerte, azul medio y azul claro, respectivamente, mientras que los municipios con valores muy bajos se muestran en tonos rosados. Por otro lado, aquellos municipios que presentan valores atípicos y que no se agrupan en ningún clúster se destacan en color rojo, indicando valores muy altos fuera del patrón común.

4.4. Modelo conceptual para el análisis de demanda y transformación energética

- Para calcular la demanda energética se consideraron cinco sectores clave: residencial, industrial, agrícola, industria de transformación energética y servicios públicos. Estos fueron seleccionados por su relación directa con el Nexo Agua-Energía.
- El año base para el cálculo de la demanda y generación energética se estableció en 2015, sirviendo como punto de referencia para el análisis y las proyecciones posteriores.
- Aunque el sector transporte consume energía, se excluyó porque su dependencia del agua es indirecta y su impacto en el nexo es secundario frente a los otros sectores analizados.

- En el sector residencial se contemplaron las actividades más comunes en los hogares: calentamiento de agua, preparación de alimentos, uso de electrodomésticos y dispositivos electrónicos, así como iluminación.

- Para el sector industrial se consideraron las principales industrias del VM: químico, materiales de construcción, alimenticio, metalmecánico, papel-cartón y textil.

- En los servicios públicos se incluyeron aquellos vinculados directamente al Nexo Agua-Energía, como el bombeo y potabilización de agua potable y residual, el tratamiento de aguas y el alumbrado público.

- En el sector agrícola se analizó únicamente el bombeo de agua para riego. Aunque la agricultura es una actividad económica importante en la región, se excluyó el consumo de combustibles asociados a otros procesos agrícolas por no tener relación directa con el nexo.

- Para la transformación energética se consideraron la refinería Miguel Hidalgo y las centrales eléctricas, incluyendo la termoeléctrica Francisco Pérez Ríos y la central de ciclo combinado.

- Para el cálculo de indicadores, la demanda y la industria de transformación se analizaron por separado. No se utilizaron conceptos híbridos, pues no se ajustaban a los objetivos del estudio.

En la Figura 8 se presenta el esquema que ilustra los sectores considerados en el análisis de la demanda energética, junto con sus respectivas subdivisiones.

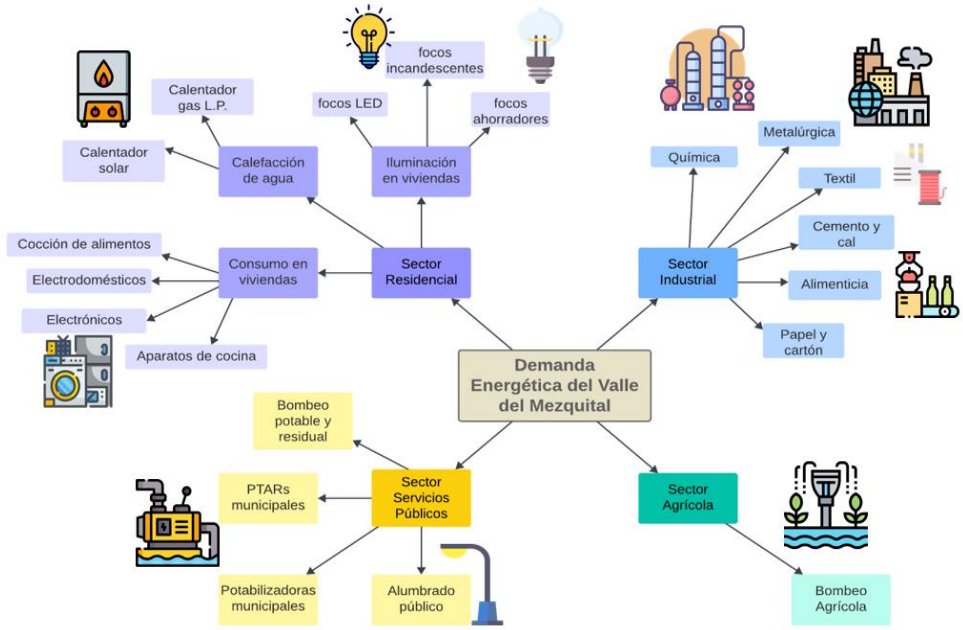


Figura 8. Esquema de la demanda energética del Valle del Mezquital considerado para el modelo conceptual. Fuente: elaboración propia

4.5. Modelo matemático para el análisis de demanda y transformación energética

4.5.1. Datos y supuestos para el cálculo de demanda energética en el Valle del Mezquital

En las Tablas 8 y 9 se presentan los datos y supuestos utilizados para la demanda y transformación energética. Estos insumos permiten establecer una base para el análisis y proyección del consumo energético en los diferentes sectores de la región.

Tabla 8. Datos utilizados en el modelo matemático para el cálculo de demanda energética en el Valle del Mezquital

Sector	*Aspecto considerado*	*Tipo de energético*	*Consumo estimado*	*Observaciones*	*Referencias*
Residencial	Cocción de alimentos	Leña	4 kg	**Fogón** Consumo promedio diario por vivienda Poder calorífico: 14,486 MJ/t	(Secretaría del Bienestar, 2016) (SENER, 2015a)

	Gas LP	Estufa 6388.43 BTU/h (quemador), 17619.29 BTU/h (horno)	**Estufa gas LP** Basado en NOM-004-SEDG-2004	(SENER, 2004)
	Electricidad	151.66 kWh	**Parrilla eléctrica** Consumo promedio mensual	(CRE, 2019) (INEGI, 2018)
Electrodomésticos	Electricidad	385 kWh	**Refrigerador** 97% de las viviendas tienen refrigerador (ENCEVI) Consumo promedio anual (FIDE)	(INEGI, 2018) (FIDE, 2015)
	Electricidad	122 Wh	**Lavadora** 77% de las viviendas tienen lavadora (ENCEVI) Consumo promedio mensual (PROFECO)	(INEGI, 2018) (PROFECO, 2013) (INEGI, 2018)
	Electricidad	1300 W	**Microondas** Uso: 22 días/mes, 10 min/día 37.7% de los hogares tienen uno	(INEGI, 2018) (FIDE, 2015)
	Electricidad	350 W	**Licuadora** Uso: 27 días/mes, 7 min/día 87.5% de los hogares tienen una	(INEGI, 2018) (FIDE, 2015)
	Electricidad	900 W	**Cafetera** Uso: 30 días/mes, 15 min/día 9.5% de los hogares tienen una	(INEGI, 2018) (FIDE, 2015)
	Electricidad	850 W	**Tostador** Uso: 7 días/mes, 7 min/día 9.7% de los hogares tienen uno	(INEGI, 2018) (FIDE, 2015)
	Electricidad	1250 W	**Horno eléctrico** Uso: 7 días/mes, 7 min/día 5.9% de los hogares tienen uno	(INEGI, 2018) (FIDE, 2015)
Electrónicos	Electricidad	75 W	**Televisión** Uso: 30 días/mes, 5 horas/día	(INEGI, 2015b)

				89.8% de los hogares tienen una	(INEGI, 2018) (FIDE, 2015)
		Electricidad	250 W	**Computadora** Uso: 25 días/mes, 3.1 horas/día 34% de los hogares tienen una	(INEGI, 2015b) (INEGI, 2018) (FIDE, 2015)
	Calentamiento de agua	Gas LP	240 kg/año (40 kg/persona)	**Calentador gas LP** 54.63% de las viviendas tienen boiler de gas LP Densidad promedio gas LP: 0.54 kg/litro Poder calorífico gas LP: 25.94 MJ/litro	(INEGI, 2015a) (SENER, 2015a) (SENER, 2011)
		Leña	3 kg diarios por habitante	**Fogón** Poder calorífica leña: 14,486 MJ/t	(Alvarado-Machuca et al., 2018) (SENER, 2015a)
	Iluminación	Electricidad	7 focos por vivienda	Uso: 3 horas/día, 365 días al año Consumos: Incandescente 60 W Fluorescente 23 W LED 8 W	(INEGI, 2018)
Servicios públicos	Bombeo potable y residual	Electricidad	59.37 GWh	Basado en Anuario estadístico Hidalgo	(INEGI, 2016)
	Potabilización	Electricidad	0.48 kWh/m³	Se consideraron solo las plantas en funcionamiento en el año del "Inventario nacional municipal de potabilizadoras y PTARs" 14 potabilizadoras	(CONAGUA & SEMARNAT, 2015) (Florentino-Vázquez A., 2021)
	PTARs municipales	Electricidad	0.36 kWh/m³	Se consideraron solo las plantas en funcionamiento en el año base del "Inventario nacional municipal de potabilizadoras y PTARs" 15 PTARs	(Calderón-Mólgora, 2015) (CONAGUA & SEMARNAT, 2015)
	Iluminación publica	Electricidad	48.66 GWh	Basado en Anuario estadístico Hidalgo	(INEGI, 2016)
Agrícola	Bombeo Agrícola	Electricidad	40.95 GWh	Basado en Anuario estadístico Hidalgo	(INEGI, 2016)
Industrial	Consumo energético industrial	Electricidad Combustibles		Basado en las Cédulas de Operación Anual (COAs)	(SEMARNAT, 2015)

Tabla 9. Supuestos considerados para el modelo matemático del cálculo de demanda y transformación energética en el Valle del Mezquital

Sector	Aspecto considerado	Supuesto	Referencias
Residencial	Cocción de alimentos	-Se asumió que cada hogar posee un único fogón o estufa de leña. -Cada hogar cuenta con una estufa de 4 quemadores y un horno. El uso promedio de los quemadores es de 4.5 horas diarias, y el horno se usa una vez por semana (2 horas). -Se consideró una parrilla eléctrica de 1000 Watts, por ser las más comunes en el mercado. -El consumo de queroseno para la cocción de alimentos, se consideró despreciable	(Secretaría del Bienestar, 2016) (SENER, 2015a) (Abaroa-Silva, 2011) (INEGI, 2018)
	Electrodomésticos	-Cada hogar posee un solo refrigerador. -Cada hogar cuenta con una lavadora automática, con uso estimado de 2 horas por ciclo, 12 ciclos al mes (3 veces por semana). -Se asumió que cada hogar posee un único aparato electrodoméstico de la lista incluida en el cálculo.	(INEGI, 2018)
	Electrónicos	-Se asumió que cada hogar posee un único aparato electrónico de la lista incluida en el cálculo.	(INEGI, 2018)
	Calentamiento de agua	-Cada hogar tiene un solo boiler, utilizado una vez al día, todos los días del año. -El porcentaje de viviendas que utilizan leña para calentar agua se calcula restando las que usan gas LP.	
	Iluminación	-Cada hogar cuenta con 7 focos. -El uso de queroseno para iluminación se consideró despreciable, así como el uso de luminarias de halógeno y gases nobles.	
Industrial	Industrias sin reportes	-Se asumió que las industrias que no informaron su consumo en 2015 mantienen un patrón similar en los reportes de 2016 y 2017.	
	Bancos pétreos	-No se incluyeron en el cálculo de la demanda energética industrial debido a su baja relación con el nexo agua-energía.	
	Coeficientes de emisión	-Los coeficientes de emisión para la madera, el aserrín y la leña son los mismos.	

		-El factor de emisión del lubricante se asumió igual al del combustóleo debido a la falta de datos.	
Transformación	Refinación	- La totalidad del coque de petróleo producido en la refinería se destina al consumo interno dentro del estado, sin registrarse exportaciones -No se incluyeron en el análisis los procesos de reconfiguración y modernización de la refinería Miguel Hidalgo dentro del sector de transformación, debido a la ausencia de datos disponibles. - El margen de reserva de la refinería se fijó en un 15%, conforme a las recomendaciones del modelo LEAP. - En 2015, la refinería de Tula incrementó su producción diaria en 25 mil barriles por día (mbd), lo que representa un aumento del 10.59%. - La eficiencia del proceso de refinación se determinó a partir de la conversión del petróleo crudo en combustibles secundarios, alcanzando un valor del 89.7%. - Las pérdidas en el proceso de refinación se estimaron en un 44 % para la gasolina y un 28 % para el diésel, basándose en la proporción de producción debido a la falta de datos específicos. -Las exportaciones de la refinería no se reportaron para el año base; por lo tanto, se calcularon a partir de la producción registrada en el "Anuario estadístico y geográfico del estado de Hidalgo 2016", descontando los volúmenes de demanda estatal reportados en las prospectivas de petrolíferos, gas natural y gas LP. Se asumió que la diferencia corresponde a exportaciones enviadas fuera del estado.	(SENER, 2016b) (SENER, 2016c) (SENER, 2016d)
	Generación eléctrica	-Las centrales mini hidroeléctricas no se incluyeron porque dejaron de operar antes de 2015. -El margen de reserva de la termoeléctrica se estableció en 20.5%. -La eficiencia del proceso de la termoeléctrica se estimó en 41.3% -Se estableció que el funcionamiento de las centrales solares y eólicas es de 12 horas al día	(SENER, 2016)

4.6. Poderes caloríficos netos de los combustibles considerados para la demanda energética

En la Tabla 10 se muestran los Poderes Caloríficos Netos (PCN) de los combustibles utilizados en los cálculos. Estos valores provienen del Balance Nacional de Energía 2015 (SENER, 2015a), excepto el PCN de las llantas, que se obtuvo del reporte "Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México" (INECC, 2014). Los combustibles están organizados según su estado físico.

Tabla 10. Poderes caloríficos netos de los combustibles considerados para la demanda energética del Valle del Mezquital

	Combustible	Poder calorífico Neto	Unidad
Sólidos	Coque de petróleo	32685	MJ/t
	Carbón térmico	19432	MJ/t
	Leña/aserrín	14486	MJ/t
	Llantas	374	MJ/t
Gaseosos	Gas L.P.	4124	MJ/bl
	Gas natural	48268	kJ/m^3
Líquidos	Gasolina	5176	MJ/bl
	Queroseno	5881	MJ/bl
	Diésel	6294	MJ/bl
	Combustóleo	6531	MJ/bl
	Lubricantes	6331	MJ/bl

4.7. Densidades de los combustibles considerados para la demanda energética

En la Tabla 11 se presentan las densidades de los combustibles utilizados en los cálculos, obtenidas del reporte "Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México" (INECC, 2014). Para la mayoría de los combustibles, se consideró su procedencia de la ZMCM, debido a su cercanía con el VM e Hidalgo.

Tabla 11. Densidades de los combustibles considerados para la demanda energética del Valle del Mezquital

	Combustible	Poder Calorífico Neto	Unidad	Observaciones
Gaseosos	Gas L.P.	0.000526	t/m^3	Se utilizó un promedio entre los siete tipos de gas LP de la ZMVM
	Gas natural	0.001219	t/m^3	Se empleó un promedio de densidad entre el gas natural de la ZMVM1 y la ZMVM2
Líquidos	Gasolina	0.726	t/m^3	La densidad utilizada para la gasolina fue un promedio entre Magna y Premium de la ZMVM
	Diésel	0.833	t/m^3	Se consideró el Diésel PEMEX RP Tula
	Combustóleo	0.989	t/m^3	Se tomó un promedio entre el combustóleo tula y el REF. Tula
	Lubricantes	0.892	t/m^3	La densidad fue un promedio de todos los lubricantes presentados en la página 22 del reporte

4.8. Sector de la transformación energética

4.8.1. Refinaría "Miguel Hidalgo"

En 2005, la capacidad de refinación promedio de la refinería era de 296 mil barriles diarios (mbd) (Montelongo-Reyes, 2015). Para 2015, esta capacidad aumentó a 315 mbd. En la Tabla 12 se muestran los datos de consumo y producción de petrolíferos de la refinería Miguel Hidalgo.

Tabla 12. Datos de caracterización de la refinería "Miguel Hidalgo" para el año 2015

	Combustible	Cantidad	Observaciones	Referencias
Consumo	Combustóleo [Mm^3]	694	COAS federales SEMARNAT	COAS federales SEMARNAT
	Gas Natural [Mm^3]	208946	COAS federales SEMARNAT	COAS federales SEMARNAT
	*Electricidad Refinería [GWh]	670	Dato obtenido del PRODESEN 2015	(SENER, 2015c)
	Electricidad PTAR refinería [GWh]	83.455	Dato obtenido de la tesis de Grimaldo-Gallardo, (2018)	(Grimaldo-Gallardo, 2018)
Producción	Gasolina [Mm^3]	12.78	Se incluyó la producción de gasolina magna y premium.	(SENER, 2015b) (INEGI, 2016)
	Queroseno [Mm^3]	3.00	Se contempló la turbosina y otros querosenos.	
	Diésel [Mm^3]	7.34	Se incluyó el diésel PEMEX y el diésel de ultra bajo contenido de azufre	

Combustóleo [Mm^3]	11.46	Es combustóleo pesado.
Gas LP [Mm^3]	1.49	Se consideró el total de producción, no se incluyó el gas seco
Gas seco [Mm^3]	1.42	Se consideró el total de producción, no se incluyó el gas LP
Asfalto [t]	1.053	Sin comentarios
Coque de petróleo [t]	969.48	Sin comentarios

*Se asume que la generación de energía eléctrica de la refinería es para autoconsumo.

4.8.2. Central termoeléctrica "Francisco Pérez Ríos"

La planta opera mediante dos procesos diferenciados: el ciclo combinado, que utiliza únicamente gas natural, y la termoeléctrica, que emplea tanto gas natural como combustóleo suministrado por la refinería de Tula. En las Tablas 13 y 14 se presentan los datos de consumo y generación de energía eléctrica correspondientes a la termoeléctrica y al ciclo combinado durante el año 2015.

Tabla 13. Datos del consumo y generación anual de la termoeléctrica "Francisco Pérez Ríos"

Termoeléctrica			
	Combustible	**Cantidad**	**Observaciones/ Referencias**
Consumo	Gas natural [Mm^3]	388431	Este dato proviene de CFE. Solicitado mediante la plataforma nacional de transparencia
	Combustóleo [Mm^3]	1119	Plataforma nacional de transparencia (folio: 330007723000122)
	*Electricidad [GWh]	447	Este dato se obtuvo restando la energía eléctrica producida de la energía eléctrica entregada (INEGI, 2016)
Generación	Electricidad [GWh]	5946	Este dato se obtuvo del "Anuario estadístico y geográfico del estado de Hidalgo 2016" (INEGI, 2016)

Tabla 14. Datos del consumo y generación anual del ciclo combinado viejo

Ciclo combinado			
	Combustible	**Cantidad**	**Observaciones/ Referencias**
Consumo	Gas natural [Mm^3]	821852	El consumo fue obtenido de las COAS estatales.
	*Electricidad [GWh]	76	Este dato se obtuvo restando la energía eléctrica producida de la energía eléctrica entregada (INEGI, 2016)
Generación	Electricidad [GWh]	3542	Este dato se obtuvo del "Anuario estadístico del estado de Hidalgo 2016" (INEGI, 2016)

4.8.3. Central de Ciclo Combinado Tula II

En las Tablas 15 y 16, se presentan los datos de consumo y generación de energía eléctrica correspondientes a los dos módulos de la central de ciclo combinado de nueva generación "Tula II". Estos módulos fueron separadas en base a la fecha en que serán instalados.

Tabla 15. Datos del consumo y generación anual del ciclo combinado NTG Tula II, fase 1

	Cantidad	Observaciones/ Referencias
Consumo Gas natural [mmpcd]	82.79	El consumo fue obtenido de las Manifiesto de Impacto Ambiental "Proyecto CC Tula II" (CFE, 2020)
Capacidad instalada [MW]	566.69	El consumo fue obtenido de las Manifiesto de Impacto Ambiental "Proyecto CC Tula II" (CFE, 2020)
Generación anual [GWh]	3487	Obtenido "Permisos de Generación, Importación y Exportación de Energía Eléctrica" (CRE, 2023)
Eficiencia de planta [%]	60.7	El consumo fue obtenido de las Manifiesto de Impacto Ambiental "Proyecto CC Tula II Fase I" (CFE, 2020)

Tabla 16. Datos del consumo y generación anual del ciclo combinado NTG Tula II, fase 2

	Cantidad	Observaciones/ Referencias
Consumo Gas natural [mmpcd]	65.84	El consumo fue obtenido de las Manifiesto de Impacto Ambiental "Proyecto CC Tula II" (CFE, 2020)
Capacidad instalada [MW]	450.64	El consumo fue obtenido de las Manifiesto de Impacto Ambiental "Proyecto CC Tula II" (CFE, 2020)
Generación anual [GWh]	2772.9	Obtenido de "Permisos de Generación, Importación y Exportación de Energía Eléctrica" (CRE, 2023)
Eficiencia de planta [%]	60.7	El consumo fue obtenido de las Manifiesto de Impacto Ambiental "Proyecto CC Tula II Fase I" (CFE, 2020)

4.8.4. Central hidroeléctrica "Ing. Fernando Hiriart Balderrama"

En la Tabla 17, se muestran los datos de consumo y generación de energía eléctrica de la hidroeléctrica de Zimapán para el año 2015.

Tabla 17. Datos de la generación de la hidroeléctrica "Ing. Fernando Hiriart Balderrama"

	Unidades de generación	Capacidad efectiva (MW)	Energía eléctrica producida (GWh)	Energía eléctrica entregada (GWh)
Hidroeléctrica Fernando Hiriart	2	292	2 037	2 014

4.8.5. Plantas de energía renovable en el Valle del Mezquital

En la Tabla 18 se presentan los datos de las plantas generadoras de energía renovable presentes en los municipios del valle. Estos datos han sido recopilados de los Permisos de Generación, Importación y Exportación de Energía Eléctrica, proporcionados por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), (CRE, 2016a) (CRE, 2023).

Tabla 18. Datos de las centrales de energía renovable presentes en los municipios del Valle del Mezquital

Nombre de la planta	Fuente energética	Capacidad efectiva [MW]	Generación [GWh]	Factor de planta	Entrada en operación	Localización
Central Cañada 2	Solar	7.84	15.42	0.22	2021	Mixquiahuala
Guajiro 1	Solar	121	323	0.3	2017	Nopala De Villagrán
Guajiro 2	Solar	116	310	0.3	2017	Nopala De Villagrán
Vega Solar	Solar	101.4	310	0.35	2021	Nopala De Villagrán
Cuatro Solar, S. A. P. I. de C. V.	Solar	30	60	0.3	2015	Tepeji del Río
Energía Hidalgo, S. A. P. I. de C. V.	Solar	10	20	0.3	2015	Tepeji del Río
Huichapan	Eólica	120	320	0.3		Huichapan

4.9. Ecuaciones empleadas para el cálculo del consumo energético para el año base

A continuación, se presentan las ecuaciones empleadas para calcular el consumo energético en los sectores residencial y de servicios públicos. Estas fórmulas fueron adaptadas de CONAVI (2019) para estimar la demanda energética, incluyendo tanto combustibles como electricidad, en dichos sectores.

4.9.1. Sector residencial

Cocción de alimentos

- Consumo de gas L.P. para los quemadores de la estufa

$$CQ_{GLP} = (H_{EG} * C_Q * H_M) * F_C * 12 \qquad \textbf{(Ec. 7)}$$

Donde: CQ_{GLP} es el consumo anual de gas L.P. de los quemadores [Joules], H_{EG} número de viviendas que poseen una estufa de gas, CQ consumo mensual de los quemadores [BTU/h], H_M son las horas de uso mensual que se estimó para los quemadores[h], F_C es el factor de conversión de BTU a Joules [1 BTU = 1055.06 Joules] y 12 representa los meses del año.

- Consumo de gas L.P. para el horno de la estufa

$$CH_{GLP} = (H_{EG} * C_H * H_M) * F_C * 12 \qquad \textbf{(Ec. 8)}$$

Donde: CH_{GLP} es el consumo anual de gas L.P. del horno [Joules], H_{EG} número de viviendas que poseen una estufa de gas, CH consumo mensual del horno [BTU/h], H_M son las horas de uso mensual que se estimó para el horno [h], F_C es el factor de conversión de BTU a Joules [1 BTU = 1055.06 Joules] y 12 representa los meses del año.

- Consumo de leña para fogones

$$C_{LH} = H_{FL} * CL_d * PC_l * 365 \qquad \textbf{(Ec. 9)}$$

Donde: C_{LH} es el consumo anual de leña en un hogar [Joules], H_{FL} hogares que poseen un fogón, CL_d es el consumo diario de leña [t], PC_L poder calorífico de la leña [MJ/t] y 365 representa los días del año.

- Consumo eléctrico para parrillas

$$C_{EP} = H_{PE} * CE_M * 12 \qquad \textbf{(Ec. 10)}$$

Donde: C_{EP} es el consumo eléctrico anual por parrillas [kWh], H_{PE} número de hogares que poseen una parrilla eléctrica, CE_M es el consumo eléctrico mensual estimado [kWh] y 12 representa los meses del año.

Electrodomésticos para el hogar

- Consumo eléctrico para refrigeración

$$CE_R = H_R * C_{EA} \qquad \textbf{(Ec. 11)}$$

Donde: CE_R consumo eléctrico anual para refrigeración [kWh], H_R hogares que poseen refrigerador, C_{EA} consumo eléctrico anual del refrigerador [kWh].

- Consumo eléctrico para lavado

$$CE_L = H_L * C_L * H_{ML} * 12 \qquad \textbf{(Ec. 12)}$$

Donde: CE_L consumo eléctrico anual para lavado [kWh], H_L hogares que cuentan con una lavadora, C_L consumo eléctrico mensual de la lavadora [kW], H_{ML} horas de uso mensual de la lavadora y 12 representa los meses del año.

Electrodomésticos para la cocina

- Consumo eléctrico del microondas

$$CE_M = H_M * C_M * H_{MH} * 12 \qquad \textbf{(Ec. 13)}$$

Donde: CE_M es consumo eléctrico anual del microondas [kWh], H_M son los hogares que poseen un microondas, C_M es el consumo energético del microondas [kW], H_{MH} son las horas de uso mensuales [h] y 12 representan los meses del año.

- Consumo eléctrico de la licuadora

$$CE_{LC} = H_{LC} * C_{LC} * H_{MLC} * 12 \qquad \textbf{(Ec. 14)}$$

Donde: CE_{LC} es consumo eléctrico anual de la licuadora [kWh], H_{LC} el número de viviendas que tienen una licuadora, C_{LC} es el consumo energético de la licuadora [kW], H_{MLC} son las horas de uso al mes [h] y 12 representa los meses del año.

- Consumo eléctrico de la cafetera

$$CE_{CA} = H_{CA} * C_{CA} * H_{MCA} * 12 \qquad \textbf{(Ec. 15)}$$

Donde: CE_{CA} es consumo eléctrico anual de la cafetera [kWh], H_{CA} el número de viviendas que tienen una cafetera, C_{CA} es el consumo energético de la cafetera [kW], H_{MCA} son las horas de uso al mes [h] y 12 representa los meses del año.

- Consumo eléctrico de la tostadora

$$CE_{TO} = H_{TO} * C_{TO} * H_{MTO} * 12 \qquad \textbf{(Ec. 16)}$$

Donde: CE_{TO} es consumo eléctrico anual de la tostadora [kWh], H_{TO} el número de viviendas que tienen una tostadora, C_{TO} es el consumo energético de la tostadora [kW], H_{MTO} son las horas de uso al mes [h] y 12 representa los meses del año.

- Consumo eléctrico del horno eléctrico

$$CE_{HE} = H_{HE} * C_{HE} * H_{MHE} * 12 \qquad \textbf{(Ec. 17)}$$

Donde: CE_{HE} es consumo eléctrico anual del horno eléctrico [kWh], H_{HE} el número de viviendas que tienen un horno eléctrico, C_{HE} es el consumo energético del horno [kW], H_{MHE} son las horas de uso al mes [h] y 12 representa los meses del año.

Electrónicos para el hogar

- Consumo eléctrico de la televisión

$$CE_{TV} = H_{TV} * C_{TV} * H_{MTV} * 12 \qquad \textbf{(Ec. 18)}$$

Donde: CE_{TV} es consumo eléctrico anual de la televisión[kWh], H_{TV} el número de viviendas que tienen una T.V., C_{TV} es el consumo energético de la T.V. [kW], H_{MTV} son las horas de uso al mes [h] y 12 representa los meses del año.

- Consumo eléctrico de la computadora

$$CE_{PC} = H_{PC} * C_{PC} * H_{MPC} * 12 \qquad \textbf{(Ec. 19)}$$

Donde: CE_{PC} es consumo eléctrico anual de la televisión[kWh], H_{PC} el número de viviendas que tienen una T.V., C_{PC} es el consumo energético de la T.V. [kW], H_{MPC} son las horas de uso al mes [h] y 12 representa los meses del año.

Calefacción de agua

$$CA_{BO} = \frac{(H_{BO} * C_{GBO})}{\rho_{GLP}} * F_C * PC_{GLP} \qquad \textbf{(Ec. 20)}$$

Donde: CA_{BO} es consumo energético anual para la calefacción de agua [MJ], H_{BO} el número de viviendas que poseen un calentador de agua, C_{GBO} es el consumo anual de gas LP en una vivienda [kg], ρ_{GLP} es la densidad del gas LP [kg/l], F_C es el factor de conversión de litros a barriles, PC_{GLP} es el poder calorífico del gas LP [MJ/bl].

4.9.2. Servicios públicos

Plantas potabilizadoras

$$CE_{POT} = Q_{PO} * TA_S * CE_{PO} \qquad \textbf{(Ec. 21)}$$

Donde: CE_{POT} es el consumo eléctrico anual requerido para potabilizar agua [kWh], Q_{PO} caudal potabilizado [m^3/s], TA_S segundos totales de un año, CE_{PO} consumo eléctrico para potabilización [kWh/m^3].

PTARs municipales

$$CE_{PTAR} = Q_{PT} * TA_S * CE_{PT} \qquad \textbf{(Ec. 22)}$$

Donde: CE_{PTAR} es el consumo eléctrico por la PTAR [kWh], Q_{PT} caudal tratado [m^3/s], TA_S segundos totales de un año, CE_{Pt} consumo eléctrico para el tratamiento del agua residual [kWh/m^3].

4.10. Escenarios de demanda energética

- **Escenario inercial BAU (Bussiness As Usual)**

Para proyectar la demanda energética en los distintos sectores, se emplearon tasas de crecimiento específicas que reflejan las tendencias observadas y esperadas en cada área. En la Tabla 19 se resumen las tasas de crecimiento aplicadas para los sectores, las cuales permiten estimar de manera precisa la evolución de la demanda en el periodo de análisis.

Tabla 19. Tasas de crecimiento sectorial consideradas para el escenario inercial BAU

Sector	Aspecto considerado	Tasa de crecimiento [%]	Observaciones	Referencias
RESIDENCIAL	Crecimiento de viviendas	1.97	Se calculo mediante el crecimiento de viviendas habitadas por municipio en Hidalgo en el periodo 2015-2050	(INEGI, 2015c)
INDUSTRIAL	Química	0	Ver pie de tabla	(INEGI, 2014)
	Materiales de la construcción	4.19	Ver pie de tabla	(INEGI, 2014)
	Alimenticia	3.9	Ver pie de tabla	(INEGI, 2014)
	Textil y piel	3.28	Ver pie de tabla	(INEGI, 2014)
	Metal mecánico	3.31	Ver pie de tabla	(INEGI, 2014)
	Papel y cartón	0	Ver pie de tabla	(INEGI, 2014)
SERVICIOS PÚBLICOS	Todos los subsectores, excepto la PTAR de Atotonilco de Tula	0.45	Se tomo el dato reportado por INEGI para el crecimiento de servicios en Hidalgo en 2015. Se asumió que el crecimiento en todos los subsectores de los servicios públicos fue igual, con excepción de la PTAR de Atotonilco de Tula	(Secretaría de Economía, 2015)
AGRÍCOLA	Bombeo agrícola	0	Se asumió que el bombeo agrícola en la región no tuvo crecimiento en el año base ni en años posteriores	

Nota: La tasa de crecimiento se calculó utilizando el crecimiento industrial municipal reportado para el periodo 2009-2014 en el "Censo Económico de 2014"

- **Escenario de penetración del calentador solar**

El escenario de mitigación propuesto contempla la implementación de calentadores solares en el sector residencial, con el objetivo de disminuir el consumo de gas LP y las emisiones GEI. La tasa de penetración anual de esta tecnología se estableció en 6.69%, según lo reportado por (SENER, 2016d).

- **Escenario de reemplazo de luminarias en el sector residencial**

En este escenario, se plantea la transición en el sector residencial hacia el uso de luminarias LED, sustituyendo completamente los focos incandescentes. Se estima que para el año 2030 el uso de focos incandescentes será eliminado, y el consumo eléctrico en iluminación residencial estará compuesto exclusivamente por focos ahorradores (4%) y LED (6%).

- **Escenario de cogeneración en el sector industrial**

Se propone implementar sistemas de cogeneración en las dos industrias con mayor consumo energético: la química y la de materiales de construcción. A partir de 2030, se estima que el 8% de la energía térmica generada podrá convertirse en energía eléctrica, permitiendo un autoabastecimiento parcial y mejorando la eficiencia energética de sus procesos (CRE, 2016b).

- **Escenario de implementación de energía renovable**

El cálculo del potencial de mitigación de emisiones se fundamenta en la sustitución de tecnologías de generación eléctrica basadas en gas natural y combustóleo por fuentes limpias. Para este análisis, se utilizó el informe de la Comisión Reguladora de Energía (CRE, 2021), considerando únicamente los proyectos ubicados en los municipios del VM.

4.11. Datos hídricos considerados para el cálculo de indicadores del Nexo Agua- Energía

Para el cálculo de los indicadores del Nexo Agua-Energía, se utilizó el consumo de agua subterránea reportado por Chamizo-Checa (2018), quien desarrolló un balance hídrico del VM para el año base 2005 mediante el modelo WEAP, desagregado por subcuencas. El estudio identificó como principales fuentes de suministro la captación pluvial y la importación de agua residual mezclada con lluvia proveniente de la Zona Metropolitana del Valle de México. La recarga subterránea se estimó a partir de la infiltración, considerando el tipo de suelo, cobertura vegetal y el retorno del riego. La demanda hídrica fue clasificada en cuatro sectores: doméstico, servicios, industrial y agropecuario. Se asumió que las aguas residuales no tratadas eran descargadas directamente en los ríos. Las exportaciones del sistema correspondieron a la evapotranspiración y a los escurrimientos superficiales dirigidos a la central hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart.

Para la evaluación del Nexo AE, se utilizaron los datos de demanda hídrica reportados para los cuatro sectores analizados (doméstico, servicios, industrial y agropecuario) correspondientes a los años 2017, 2030 y 2050, como se muestra en la Tabla 20. Los valores para los años intermedios se obtuvieron mediante interpolación lineal. Asimismo, se asumió que las condiciones del año 2017 son representativas de 2015, permitiendo utilizar los datos de ese año como referencia para el inicio del análisis.

Tabla 20. Consumo hídrico de la demanda del Valle del Mezquital del periodo 2017-2050 [Mm^3/anuales]

	Población	**Agricultura**	**Industria**	**Servicios**
2017	63	51	146	6
2020	66	53	153	6
2025	69	57	164	6
2030	72	60	175	6
2035	75	63	186	6
2040	78	67	197	6
2045	82	70	208	6
2050	87	78	232	6

Para el sector de transformación energética, se emplearon los volúmenes de consumo de agua reportados en el sistema REPDA (CONAGUA, 2024). Se consideraron los consumos hídricos de la planta termoeléctrica, del ciclo combinado (ambos: el sistema antiguo y Tula II), así como de la refinería Miguel Hidalgo. Los datos detallados del uso de agua por estas instalaciones se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. Consumo hídrico [hm^3/anuales] de la transformación del Valle del Mezquital para el año base 2015

Central antigua de ciclo combinado	22.00
Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos	60.61
Central de ciclo combinado nueva generación Tula II	63.07
Refinería Miguel Hidalgo	44.43

4.12. Indicadores para el Nexo Agua-Energía

❖ Indicador de Intensidad Energética de la Demanda Agua (IEA)

La intensidad energética de la demanda de agua constituye un indicador fundamental para evaluar la eficiencia energética en los procesos relacionados con el agua. Este indicador se define como la cantidad de energía requerida para tratar, bombear o suministrar una unidad de agua, y puede variar considerablemente en función de las tecnologías empleadas, la infraestructura existente y las condiciones locales (Vörösmarty et al., 2010). La ecuación para calcular la intensidad energética del agua es la siguiente:

$$IEA = \frac{EUS}{CAS} \qquad \textbf{Ec. 17}$$

Donde: IEA es la intensidad energética del agua [MJ/m^3], EUS energía utilizada en el sector [MJ] y CAS cantidad de agua suministrada [m^3].

❖ Indicador de Intensidad Hídrica de la Energía (IHE)

La intensidad hídrica de la producción energética se refiere al volumen de agua requerido para producir, generar o extraer una unidad específica de energía. Generalmente, se expresa como volumen de agua por unidad de energía generada y varía según el tipo de fuente energética o la tecnología empleada. La ecuación utilizada para calcular la intensidad hídrica de la energía es la siguiente:

$$IHE = \frac{VTA}{EP} \qquad \textbf{Ec.18}$$

Donde: IHE es la intensidad hídrica de la energía [m3/MJ], VTA volumen total de agua utilizado [m3] y EP energía generada [MJ]

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Volumen hídrico histórico recibido por el Valle del Mezquital proveniente del sistema de drenaje de la CDMX

Con el propósito de cuantificar la cantidad de agua residual que ha ingresado al VM entre 1985 y 2020, se realizó el cálculo de volúmenes considerando las aportaciones generadas por la población, la industria, servicios y comercios, así como los flujos provenientes de ríos y escurrimientos. Estos datos se analizaron en periodos quinquenales, siguiendo el modelo propuesto.

Estos datos permitirán conocer su evolución en el tiempo, proporcionando elementos clave para analizar el impacto ambiental, social y económico en la región. Los volúmenes exportados fueron desglosados por cada dren de la ZMCM y estos valores se muestran en la Figura 9 en el periodo 1985-2020.

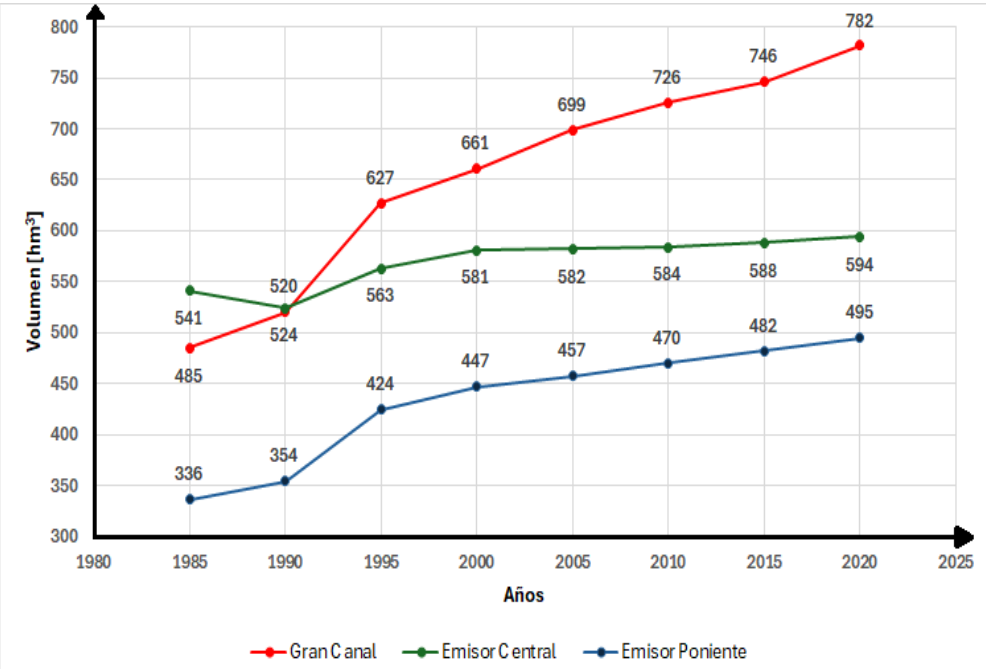


Figura 9. Volúmenes en hm^3 de agua residual transportada por cada emisor en el periodo 2015-2020. Fuente: elaboración propia

A lo largo del periodo, se observó un incremento en los volúmenes transportados hacia el VM, reflejando el crecimiento urbano de la Ciudad de México y su impacto en la

región receptora. El Gran Canal fue el dren con mayor capacidad de desalojo, con un incremento del 61%. Le sigue el Emisor Poniente registrando un aumento del 47%. Finalmente, el Emisor Central mostró un aumento más moderado del 9%, aunque se observó una disminución en los volúmenes transportados en 1990, lo cual se puede atribuir a la reducción de viviendas y población consecuencia de los efectos del sismo de 1985. Esta disminución fue seguida de una posterior estabilización de los volúmenes, que continuaron incrementándose de manera gradual hasta 2020.

5.1.1. Porcentajes de contribución por fuente a cada emisor del drenaje

Cada emisor recibe aportaciones de fuentes principales diferentes. Los porcentajes de aportación de cada fuente durante el periodo de 1995 a 2020, desglosados para cada emisor, se muestran en la Figura 10.

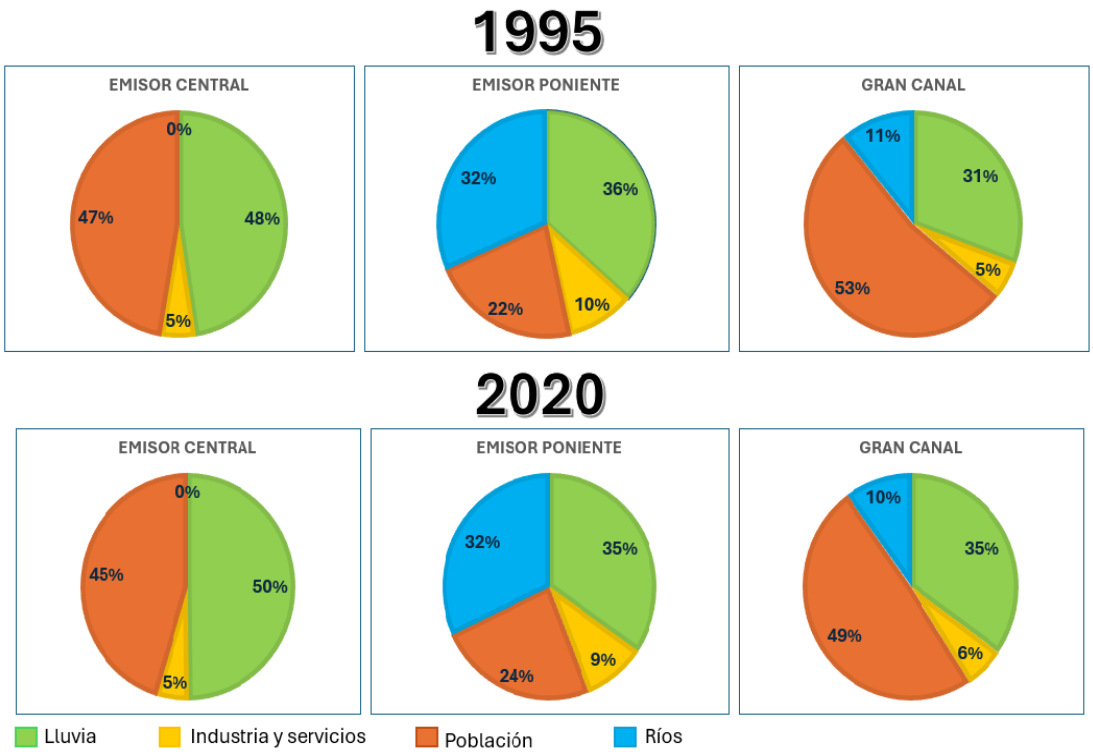


Figura 10. Comparación de la contribución porcentual por fuente a cada emisor en el periodo 1995-2020. Fuente: elaboración propia

La Figura 11 muestra que la población fue la principal fuente de aporte de agua al GC, debido a su largo recorrido hacia el oriente de la ciudad y al hecho de que este canal no comparte áreas urbanas con otros emisores. Como resultado, la aportación proveniente de la población aumentó durante el periodo, pasando del 49% al 53%. En contraste, el porcentaje de agua proveniente de la precipitación experimentó una disminución, pasando del 35% al 31%. En contraste con el GC, la precipitación fue la principal fuente de aportación al TEP, seguida por el agua de los ríos. Juntas, estas dos fuentes contribuyeron con aproximadamente el 67% al 68% del volumen total de agua en ambos años. En comparación, la población aportó solo entre el 22% y el 24%.

En el caso del TEC, la precipitación fue también la principal fuente de aportación, representando entre el 48% y el 50% del volumen total de agua recibida, seguida por la población, que contribuyó con más del 40%. En todos los emisores, la industria aportó el menor porcentaje, debido a que suelen contar con sistemas de tratamiento que permiten reutilizar el agua residual y teniendo una menor aportación. El aumento en los volúmenes de agua residual generados ha contribuido al incremento de las inundaciones en la región y justifican la construcción del Túnel Emisor Oriente (TEO). La composición porcentual de cada emisor al total del agua del sistema de drenaje se presenta en la Figura 11.

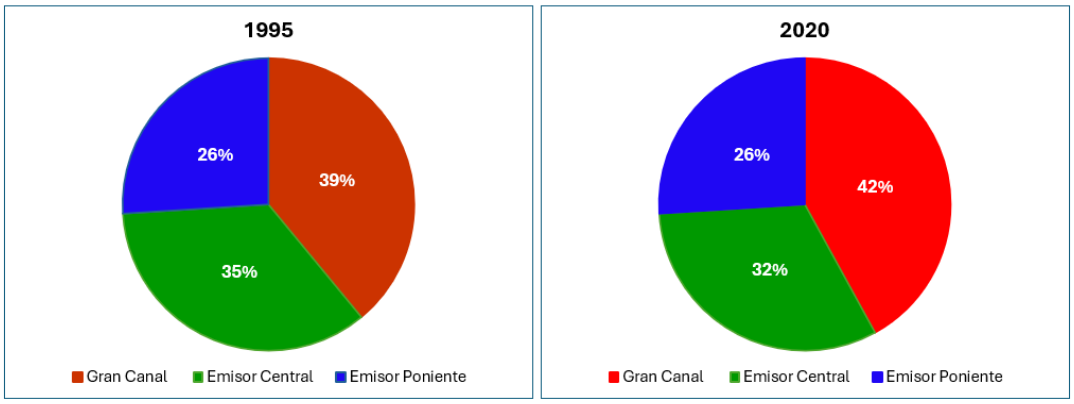


Figura 11. Porcentajes de aportación de agua de cada emisor al sistema de drenaje en 1995 y 2020. Fuente: elaboración propia

En la Figura 11 se observa que el GC fue el emisor que aportó el mayor porcentaje de agua al sistema. Con porcentajes similares le sigue el TEC y finalmente el TEP el cual mantuvo su aportación en niveles constantes.

5.1.2. Volúmenes históricos totales de agua residual que han ingresado al Valle del Mezquital por cada río

Se llevó a cabo la clasificación de los volúmenes totales de agua residual recibidos en el VM, con base en el afluente receptor. El TEC y el TEP descargan sus aguas al río El Salto, mientras que el GC lo hace en el río El Salado. La Tabla 22 muestra los volúmenes correspondientes, los cuales son fundamentales para estimar en estudios futuros su impacto ambiental, social y económico en el desarrollo del valle.

Tabla 22. Volúmenes históricos de agua residual [hm³] que han ingresado al Valle del Mezquital por cada río y el total acumulado, durante el periodo 1985–20200.

	1985	**1990**	**1995**	**2000**	**2005**	**2010**	**2015**	**2020**
Río El Salto	877	874	987	1028	1040	1054	1069	1089
Río El Salado	485	524	627	661	699	726	746	782
TOTAL	1362	1398	1614	1689	1738	1780	1816	1872

Como se observa en la Tabla 22, el río El Salto ha sido el afluente que recibe la mayor cantidad de agua residual, superando los 1,000 hm³ a partir del año 2000, Esta diferencia resalta la importancia de El Salto como principal vía de ingreso de aguas residuales al VM.

5.1.3. Validación del modelo

El modelo creado permitió el cálculo de los volúmenes históricos de agua residual. Los cálculos realizados para cada dren fueron llevados a cabo de manera estructurada, lo que permitió obtener resultados consistentes. Al comparar los resultados obtenidos con datos provenientes de una fuente confiable, como CONAGUA, el porcentaje de error fue inferior al 2%, a pesar de las limitaciones del modelo.

Las principales limitantes del modelo radican en el cálculo de los volúmenes de agua residual provenientes de la industria y los servicios, debido a la ausencia de algunos reportes del REPDA (Registro Público de Derechos de Agua). Debido a esta falta de datos, se realizaron interpolaciones para estimar los volúmenes faltantes, lo que permitió completar

los cálculos de manera aproximada, aunque con ciertas incertidumbres asociadas. La Tabla 23 muestra la similitud de los volúmenes calculados en este trabajo con los dos únicos reportes (CONAGUA,2009) y (CONAGUA, 2013) que aparecen en la literatura para el volumen de agua residual que ha ingresado al VM.

Tabla 23. Comparación entre los volúmenes calculados y los reportados [hm^3] de agua residual que han ingresado al VM provenientes del sistema de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

	Volumen calculado	**Volumen reportado**	**Error %**	**Referencia**
Agua total exportada 2005	1738	1771	1.8	CONAGUA (2009)
Agua total exportada en 2010	1780	1804	1.3	CONAGUA (2013)

A lo largo del tiempo, el agua residual y pluvial recibida por el VM ha aumentado, siendo el río El Salto el principal afluente que capta la mayor cantidad de este recurso. En esta sección, se complementa información previamente no reportada, la cual resulta útil para estudios relacionados con el desarrollo socioeconómico del valle. Además, se proporciona el contexto necesario para comprender dicho desarrollo a nivel municipal, un aspecto que, hasta ahora, no ha sido estudiado.

El agua es un recurso vital para el VM, y su gestión eficiente es esencial para garantizar su disponibilidad en todos los municipios de la región. Este desafío requiere una planificación adecuada por parte de los tomadores de decisiones para cumplir con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6. No obstante, a pesar de la importancia de este recurso, algunas localidades enfrentan dificultades debido a la escasez de acceso al agua potable y sistemas de saneamiento, lo que limita el bienestar de sus habitantes y agrava las condiciones de vida, especialmente en las zonas del norte de la región.

La cuantificación de la cantidad de agua residual que ha ingresado al VM, proveniente de la Ciudad de México, es fundamental para comprender el impacto de este recurso en la región al mostrar cómo la disponibilidad y gestión del agua ha condicionado el crecimiento socioeconómico y la dinámica agrícola en el VM, ayudando a identificar patrones clave para el desarrollo regional futuro.

5.2. Análisis socioeconómico municipal

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de los datos recopilados para los municipios del VM. Los resultados se organizan según los parámetros seleccionados, considerando su relación con la población y su evolución a lo largo del periodo de estudio. Además, se incluyen mapas temáticos que permiten visualizar espacialmente la distribución de los clústeres en relación con los municipios, así como con la distribución de los recursos hídricos.

5.2.1. Evolución demográfica del Valle del Mezquital en el periodo 1985-2020

5.2.1.1. Crecimiento poblacional total

Durante el período analizado, la población total del valle aumentó de 575,211 habitantes en 1985 a 997,446 en 2020, lo que representó un incremento del 73%. Este crecimiento, con una tasa de crecimiento promedio anual (TCPA) de 1.8% durante los 35 años del periodo.

El mayor crecimiento poblacional se registró en el período de 1985 a 1995, impulsado principalmente por la migración de habitantes provenientes de la Ciudad de México y zonas aledañas tras el sismo de 1985. Debido a su proximidad geográfica, el VM se convirtió en una opción atractiva para las personas desplazadas. Este fenómeno migratorio aceleró el crecimiento demográfico de la región durante esa década, marcando un punto clave en su evolución socioeconómica (Rodarte-García, 2011).

Al comparar la TCPA del valle contra las cifras estatales durante el período analizado, se observó que el crecimiento del valle (1.8%) fue similar al promedio estatal (1.9%), según datos de (INEGI, 2020a). Este hecho podría sugerir un desarrollo homogéneo en las regiones del estado; sin embargo, la realidad es diferente. La mayoría de la población se concentra en la zona sur, más cercana a la ZMCM, mientras que casi la mitad del estado está compuesto por territorios montañosos en el centro y norte.

5.2.1.2. Crecimiento poblacional municipal

La Figura 12 presenta el gráfico que muestra los valores de la TCPA de cada municipio en dos períodos distintos. En el gráfico, los datos correspondientes al período 1985-2010 son de color azul, mientras que los valores correspondientes al período 2010-2020, se muestran en color naranja.

Durante el periodo 1985–2010, la Tasa de Crecimiento Promedio Anual (TCPA) fue igual o superior al 1% en la mayoría de los municipios del VM. Sin embargo, aquellos con una fuerte vocación agrícola, ubicados a mayor distancia de los principales centros urbanos y con limitaciones tanto en infraestructura vial como en servicios básicos, registraron tasas de crecimiento más bajas. Tal es el caso de Alfajayucan, Tasquillo, Chapantongo y Nopala, situados en la zona norte del valle. Estos municipios reciben una dotación menor de agua residual en comparación con los del centro-sur, lo que podría estar afectando su desarrollo socioeconómico (Economía, 2023; García-Salazar, 2019).

En contraste, los valores más altos del TCPA se registraron en municipios colindantes con grandes centros urbanos como Ciudad de México, Pachuca y el Estado de México. Estas localidades del centro-sur del valle cuentan con una mayor disponibilidad de empleo permanente, mejor infraestructura vial y una concentración más alta de servicios básicos accesibles para la población, tal es el caso de Atitalaquia, Tepeji, Tetepango y San Agustín Tlaxiaca (véase Figura 12).

Atotonilco de Tula presentó una TCPA del 5% durante el período 2010-2020, una excepción en la región. Este aumento podría ser una consecuencia de la oferta de empleo generada por la construcción de la PTAR más grande de América Latina, inaugurada en 2019 en dicho municipio (Aguas Tratadas del Valle de México, 2014; Elizagaray Mandujano, 2021; Ramírez, 2019), o debido al establecimiento de nuevas industrias, el cual ha ido en aumento en años recientes, probablemente debido a que encontraron condiciones más favorables para su asentamiento, como su ubicación, la disponibilidad de terrenos a menor costo en comparación con los municipios vecinos, así como el acceso constante al recurso hídrico (Economía, 2015; Martínez-Torres & González-Gómez, 2016; Rodarte-García, 2011).

En el caso de Atotonilco de Tula y otros municipios del sur del VM, se observa una creciente función como zonas dormitorio, al albergar población que trabaja en industrias localizadas en áreas más urbanizadas, principalmente en la región centro-sur del valle. Esta dinámica ha favorecido la consolidación de un perfil suburbano, caracterizado por una economía local que depende tanto del consumo y presencia de la población residente como de algunas actividades económicas propias.

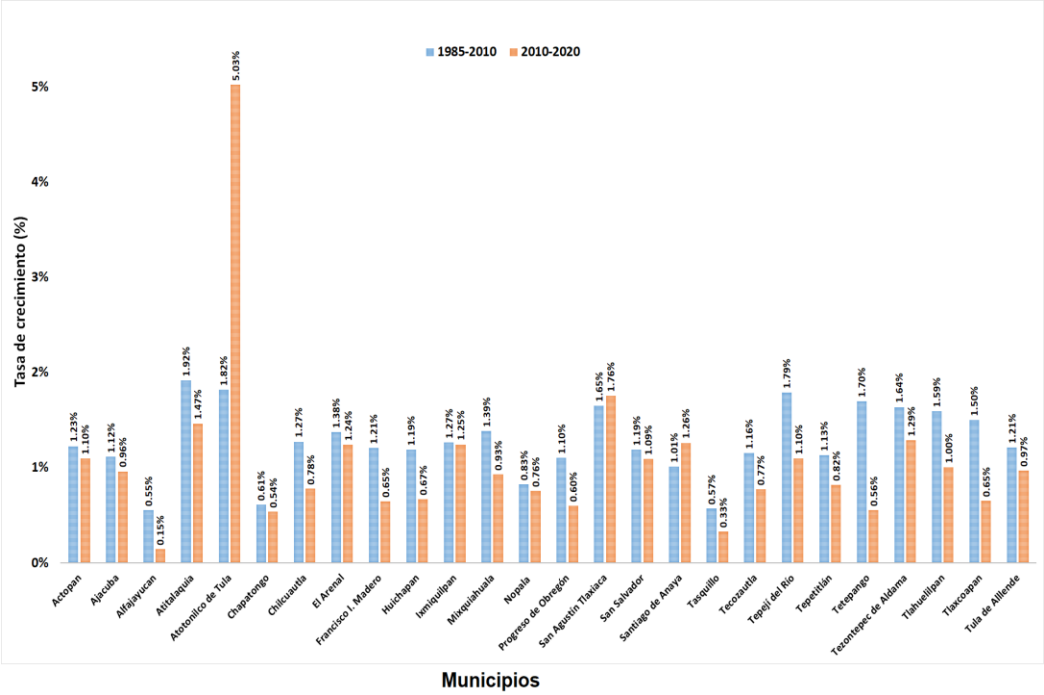


Figura 12. Tasa de crecimiento anual promedio municipal periodos 1985-2010 y 2010-2020. Fuente: elaboración propia con datos de (INEGI, 2020a).

Por otro lado, durante el periodo 2010-2020 se observó una disminución en la TCPA, un fenómeno que puede atribuirse a una combinación de factores demográficos y socioeconómicos. En términos generales, las tasas de crecimiento poblacional tienden a estabilizarse o incluso disminuir cuando los municipios alcanzan un mayor grado de consolidación urbana. Paralelamente, se registra un aumento en los flujos migratorios hacia zonas metropolitanas cercanas, ya sea por la búsqueda de mejores oportunidades laborales, educativas o de servicios, lo que impacta directamente en la reducción del crecimiento poblacional local (Quezada-Ramírez, 2008, 2018).

Este comportamiento es particularmente pronunciado en áreas con una alta concentración industrial, donde los procesos de migración tienden a estabilizarse después de episodios previos de crecimiento acelerado, los cuales fueron impulsados por la atracción masiva de empleo durante décadas anteriores. En este contexto, la fase de expansión industrial suele ir acompañada inicialmente de un incremento significativo en la población, pero una vez alcanzado cierto nivel de desarrollo, la migración se modera y los flujos poblacionales se equilibran, contribuyendo a una estabilización demográfica (Quezada-Ramírez, 2008). Estos patrones demográficos reflejan las transformaciones sociales y económicas propias de la región en el proceso de consolidación urbana e industrial, con implicaciones importantes para la planificación territorial y el desarrollo sustentable.

5.2.2. Resultados del proceso de clusterización mediante el algoritmo k-medias

La Tabla 24 muestra los rangos porcentuales de crecimiento para cada clúster, desglosados por sector y acompañados de un esquema de colores para facilitar su interpretación. Además, se presenta el número de clústeres identificados, junto con los municipios atípicos (outliers) detectados para cada parámetro. Es importante señalar que, a diferencia de las TCPA, que reflejan el crecimiento anual, estos porcentajes de crecimiento representan el aumento total de cada sector durante todo el periodo analizado.

Es importante destacar que la mayoría de los parámetros analizados presentan un aumento. Sin embargo, se observa una excepción en el número de personas empleadas en el sector primario, el cual muestra una disminución en la mayoría de los municipios. Este comportamiento podría estar asociado a procesos de transformación estructural del empleo, como la mecanización del campo, el abandono de actividades agrícolas o el desplazamiento de la fuerza laboral hacia sectores secundarios y terciarios.

El porcentaje de crecimiento asociado a cada clúster refleja la evolución de los distintos parámetros en los grupos de municipios a lo largo del periodo analizado (ver Tabla 22). Estos resultados se complementan con representaciones cartográficas que facilitan la identificación de patrones geográficos, tendencias sectoriales y posibles correlaciones entre

variables, incluyendo la relación con la distribución de los cuerpos de agua. Esta integración de datos espaciales enriquece el análisis y contribuye a una comprensión más profunda y contextualizada de los resultados obtenidos.

Tabla 24. Número de municipios en cada clúster, municipio atípico (outlier) y rango de porcentajes de crecimiento en cada parámetro

Parámetro	# municipios atípicos	#clústeres	# municipios	% crecimiento
Población	**1 Atotonilco de Tula (11%)**	4	3	**10-9**
			8	**6-4**
			3	**3-4**
			11	**1**
Sector Agrícola				
Área agrícola de riego	**2 Ixmiquilpan (10%) Mixquiahuala (11%)**	4	6	**8-7**
			4	**6-5**
			3	**4-2**
			11	**1-0**
Empleos en el sector primario	**2 Tecozautla (27%) Tezontepec de Aldama (18%)**	2	10	**(-13) - (-8)**
			14	**(-7) - (-4)**
Sector Económico				
Industrias de manufactura≠	**1 Ixmiquilpan (85%)**	3	3	**69-73**
			9	**55-60**
			13	**44-40**
Empleos en manufactura	**2 Tula de Allende (12%) Tepeji del Río (14%)**	3	5	**6-5**
			7	**4-3**
			12	**2-1**
Comercios	**2 Tula de Allende e Ixmiquilpan (12%)**	3	9	**8-6**
			2	**5-3**
			13	**2-1**
Empleos en comercio	**1 Tula de Allende (13%)**	4	3	**7-8**
			2	**6**
			10	**5-3**
			10	**2-1**
Sector social				
Centros educativos públicos	**2 Tula de Allende (10%) Ixmiquilpan (10%)**	3	5	**8-7**
			10	**6-5**
			9	**2-1**
Centros de salud públicos	0	3	2	**18-13**
			11	**6-2**
			13	**1-0**
Parque vehicular	**1 Tula de Allende (17%)**	4	3	**11-7**
			5	**6-4**
			7	**3-2**
			10	**1-0**
Empleos en servicios	**1 Tula de Allende (14%)**	4	3	**8-7**
			6	**6-5**
			5	**3-2**
			11	**1-0**

5.2.2.1. POBLACIÓN

La Figura 13 muestra el mapa generado a partir del análisis de clústeres aplicado al parámetro de población. En él se visualiza la distribución espacial de los municipios agrupados según sus porcentajes de crecimiento poblacional, lo que permite identificar áreas con comportamientos demográficos similares.

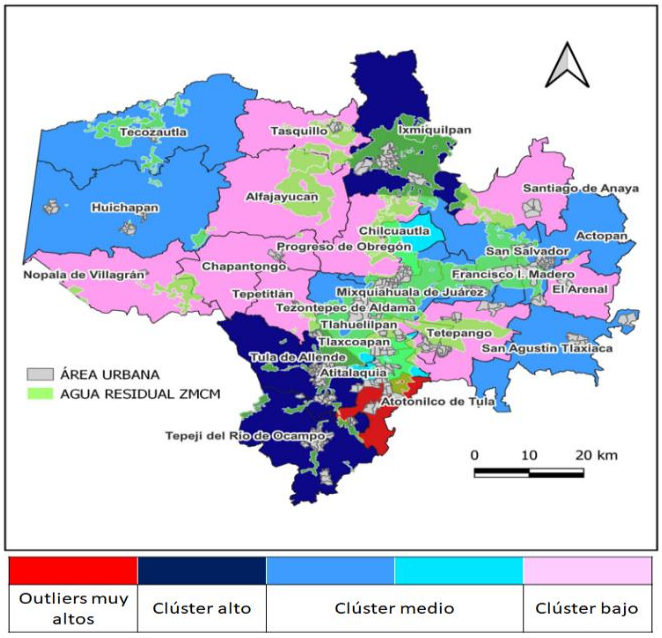


Figura 13. Clústeres de los municipios referentes al parámetro de población. Las zonas con agua importada se destacan en verde. Fuente: elaboración propia

La metodología dio como resultado la conformación de cuatro grupos principales, además de la identificación de un municipio atípico: Atotonilco de Tula. Este caso coincide con lo señalado previamente, dicho municipio presentó un incremento poblacional superior al del resto, con un aumento del 11 % durante el periodo (Aguas Tratadas del Valle de México, 2014; García-Arroyo, 2019)

Los municipios que registran los mayores incrementos poblacionales coinciden, en su mayoría, con aquellos localizados en las proximidades de la ZMCM, así como con centros urbanos estratégicos del estado, como Ixmiquilpan, Tula de Allende y Tepeji del Río. Esta concentración está estrechamente vinculada al acceso al agua, las zonas cercanas a la ZMCM reciben un suministro constante de agua residual, lo que ha favorecido el desarrollo de actividades industriales, agrícolas y de servicios, particularmente en la región centro-sur del

valle. Esta dinámica territorial se ve reflejada en los clústeres representados con tonalidades azul intenso y medio en el mapa, los cuales indican no solo un mayor crecimiento demográfico, sino también una mayor disponibilidad de recursos hídricos en dichas áreas.

En contraste, la zona norte-noroeste del valle, caracterizada por su acceso limitado al recurso hídrico, presentó un crecimiento poblacional menor (municipios en color rosa), como se observa en la Figura 13. De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 22, once municipios se agrupan en el clúster con el incremento poblacional más bajo. Esta situación evidencia una disparidad territorial que requiere ser atendida mediante un análisis más profundo de las políticas públicas implementadas en la región, con el objetivo de identificar las acciones que han contribuido al rezago y proponer estrategias que fomenten un desarrollo más equitativo.

5.2.2.2. SECTOR AGRÍCOLA

- **Área agrícola de riego**

A lo largo del periodo analizado, el área destinada a la agricultura de riego experimentó crecimiento. En 1985, se registraron 23,830 hectáreas de riego, cifra que se incrementó hasta las 163,085 hectáreas en el año 2020 (SIAP, 1985, 2020). Este aumento refleja no solo una expansión en la superficie cultivada con acceso a riego, sino también a la disponibilidad de agua residual proveniente del Valle de México, aunque no todos los municipios tuvieron el mismo incremento (ver Figura 14).

El análisis dio como resultado la conformación de cuatro clústeres principales y la identificación de dos municipios atípicos, como se muestra en la Figura 14A. Estos clústeres se representan mediante una escala de color que indica los distintos niveles de crecimiento. Los municipios identificados como atípicos, marcados en color rojo, corresponden a Ixmiquilpan y Mixquiahuala, ambos localizados dentro del área de influencia del Distrito de Riego 003. Estos municipios registraron un incremento del área agrícola de riego del 10 al 11%, un valor superior al del resto. Los rangos de crecimiento asociados a cada clúster pueden consultarse en la Tabla 22.

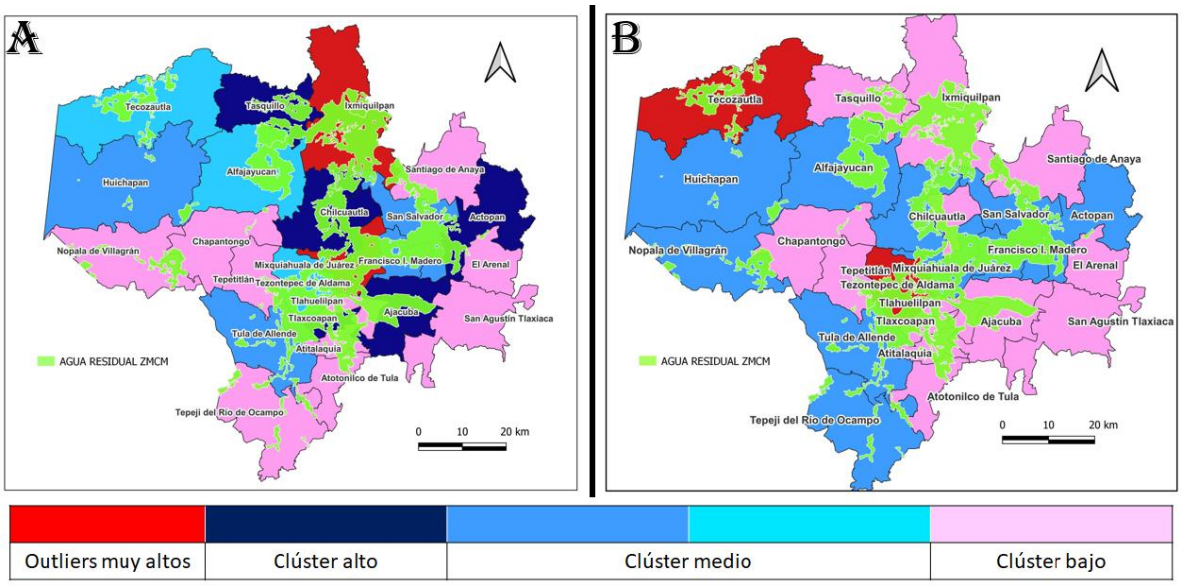


Figura 14. Clústeres de municipios del Valle del Mezquital para los siguientes parámetros: Área agrícola de riego 14A y empleados en el sector primario 14B. En verde aparecen resaltados los distritos y unidades de riego. Fuente: elaboración propia

La expansión de las áreas de riego ha sido particularmente notable en los municipios que se encuentran dentro de los distritos de riego o en sus proximidades, como se aprecia en la Figura 14A. Esta tendencia puede atribuirse a la influencia directa de la infraestructura hidráulica y de las políticas públicas orientadas al fortalecimiento del riego agrícola implementadas en estas zonas. Destaca la coincidencia entre las unidades y distritos de riego con los clústeres representados en colores rojo, azul intenso y azul medio, lo cual sugiere una correlación entre la disponibilidad de infraestructura de riego y el crecimiento sostenido de la superficie agrícola de riego en estos municipios.

En contraste, los municipios que presentan un menor incremento en las áreas de riego se ubican principalmente a mayor distancia de los distritos de riego y más cercanos a centros urbanos como Pachuca y Querétaro (ver Figura 1). Es probable que las políticas de desarrollo local hayan priorizado el crecimiento urbano por encima de la expansión agrícola, lo cual se refleja en una mayor proporción de suelo destinado a usos urbanos. Asimismo, en ciertos casos, la mayor altitud del terreno restringe el uso de tierras para agricultura de riego, destinándolas preferentemente a cultivos de temporal. Además, es importante señalar que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha impuesto restricciones a la concesión de

nuevos derechos para el aprovechamiento de agua superficial, limitando aún más la disponibilidad hídrica para la expansión del riego en estas zonas.

Otro factor crucial en el desarrollo del sector agrícola es el acceso a la infraestructura vial, destacando el Arco Norte. Esta autopista conecta importantes ciudades del centro de México con algunos de los municipios del VM. Esta infraestructura facilita el transporte de productos agrícolas hacia mercados más amplios, contribuye a reducir los costos logísticos y tiempos de traslado. Además, ha generado nuevas oportunidades para la distribución de los productos y la competitividad del sector agrícola, promoviendo su expansión y su integración con mercados más grandes, mejorando la economía local.

La región presenta una economía predominantemente agrícola; sin embargo, las oportunidades de empleo fuera del sector primario son limitadas. La baja rentabilidad de los cultivos dificulta que muchas familias generen ingresos suficientes para cubrir sus necesidades. Esta situación actúa como un factor de empuje, incentivando especialmente a los jóvenes a migrar hacia las ciudades industrializadas en busca de mejores oportunidades laborales, donde pueden acceder a empleos más diversificados y mejor remunerados. A continuación, se aborda un análisis detallado de este fenómeno migratorio y sus implicaciones socioeconómicas en la región.

- **Empleados del sector primario**

La Figura 14B presenta el mapa resultante del análisis de clústeres para empleados en el sector primario. Es notable que la mayoría de los municipios han experimentado una disminución en el número de empleados dedicados a esta actividad. El análisis identificó únicamente dos clústeres: uno con una reducción más significativa, representado en color azul claro, que abarca decrementos del -13% al -8% y otro con disminuciones moderadas, indicado en color rosa, con rangos entre -4% a -7%.

La disminución en el empleo del sector primario es recurrente a nivel nacional, como lo reporta el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 1985-2020). Es importante señalar que este parámetro presenta ciertos sesgos, dado que los empleados del sector primario abarcan actividades diversas como ganadería, acuicultura, apicultura y

silvicultura, las cuales tienen características que no siempre se reflejan en los datos agrícolas. Además, el agricultor autoempleado generalmente no se incluye en estas estadísticas, lo que puede subestimar la verdadera dimensión del empleo agrícola. Por otro lado, la creciente tecnificación de los procesos agrícolas ha incrementado la productividad, aunque esta mejora se ha visto acompañada de salarios bajos en el sector, lo que contribuye a la reducción de la mano de obra formal empleada (Aranda-Bastida, 2021a).

En contraste, los municipios en tonos en azul fuerte y rojo presentaron un aumento en el número de empleados, con un rango que va desde el 16-27%. Estos municipios se consideran atípicos (outliers), una posible explicación es la presencia de cultivos o actividades agropecuarias con alta demanda de mano de obra, como la producción intensiva de hortalizas, frutales, cultivos bajo invernadero o la ganadería extensiva. Estas actividades requieren una mayor cantidad de trabajadores en comparación con sistemas agrícolas más tecnificados. Asimismo, es probable que en estos municipios persista un menor grado de mecanización en las labores agrícolas, lo que refuerza la necesidad de empleo directo y sostenido en este sector.

Estos fenómenos, que a primera vista pueden parecer contradictorios, responden a una combinación de factores. En primer lugar, es importante considerar que el sector primario no solo incluye la agricultura, sino otras actividades, las cuales han enfrentado afectaciones propias que inciden en el empleo general del sector. Además, el agricultor autoempleado con frecuencia no se registra formalmente como trabajador, lo que puede generar sesgos en la información reportada. La mecanización de labores agrícolas, así como la introducción de herramientas como drones para el monitoreo y gestión de cultivos, han incrementado la eficiencia y la productividad, pero también han reducido significativamente la necesidad de mano de obra directa (Aranda-Bastida, 2021b).

Esta transformación tecnológica, si bien representa un avance en términos de eficiencia, también tiene implicaciones sociales relevantes. La disminución de empleos en el sector primario puede agravar el desempleo rural y contribuir a la migración de jóvenes hacia centros urbanos en busca de alternativas laborales. Asimismo, genera desafíos en términos de equidad y capacitación, muchas comunidades carecen de acceso a los conocimientos técnicos o recursos necesarios para adaptarse a los nuevos modelos de producción agrícola.

El sector agrícola en el VM continúa desempeñando un papel fundamental en la generación de ingresos a nivel regional, particularmente en aquellas zonas con acceso a riego. En las áreas sin acceso a riego, la producción agrícola se destina principalmente al autoconsumo, lo que limita su potencial económico (Contreras-Román, 2018).

A estos problemas se suma la baja priorización que ha tenido la agricultura en las políticas públicas del país, lo que ha provocado que una parte significativa de la población rural opte por emplearse en sectores con mejores condiciones laborales, como la industria o los servicios. En este contexto, los jornaleros agrícolas en el estado de Hidalgo llegan a laborar jornadas de hasta 12 horas por un salario promedio de 200 pesos diarios, situación que ha incentivado la migración hacia estados del norte del país, en busca de mayores ingresos (González-Estrada, 2016). Esta estrategia migratoria se ha convertido en un mecanismo clave para el sostenimiento de las economías familiares, gracias al envío de remesas.

Sin embargo, la creciente dependencia de estas remesas puede tener efectos contraproducentes y puede desincentivar el desarrollo agrícola local. Además, la migración internacional ha contribuido al fenómeno del "abandono rural", al provocar la salida sostenida de jóvenes y trabajadores del campo, debilitando así el tejido económico y social de las comunidades rurales (Quezada-Ramírez, 2018)

5.2.2.3. SECTOR ECONÓMICO

- **Industrias manufactureras**

Durante el período analizado, el número de industrias manufactureras experimentó un crecimiento, particularmente en municipios como Tula de Allende, Tepeji del Río, Atitalaquia, Tlaxcoapan y Atotonilco de Tula. Estas localidades albergan una amplia diversidad de industrias, que incluyen caleras, ladrilleras y otras unidades de producción de menor escala. Si bien en la región destacan importantes instalaciones del sector energético, como la termoeléctrica y la refinería de Tula, es importante subrayar que, aunque estas representan solo dos unidades, generan una considerable derrama económica mediante la

creación de empleos directos e indirectos, así como por su impacto en las cadenas productivas locales.

El sector manufacturero presenta los porcentajes de crecimiento más elevados entre todos los sectores analizados, con incrementos de entre el 44% y el 85%. La Figura 15A muestra el mapa correspondiente, donde se representa la distribución espacial de este crecimiento mediante una escala de colores. Se destacan los principales corredores industriales de la región, cuya presencia ha sido determinante para el establecimiento y expansión de la actividad manufacturera en los municipios con mayores tasas de incremento.

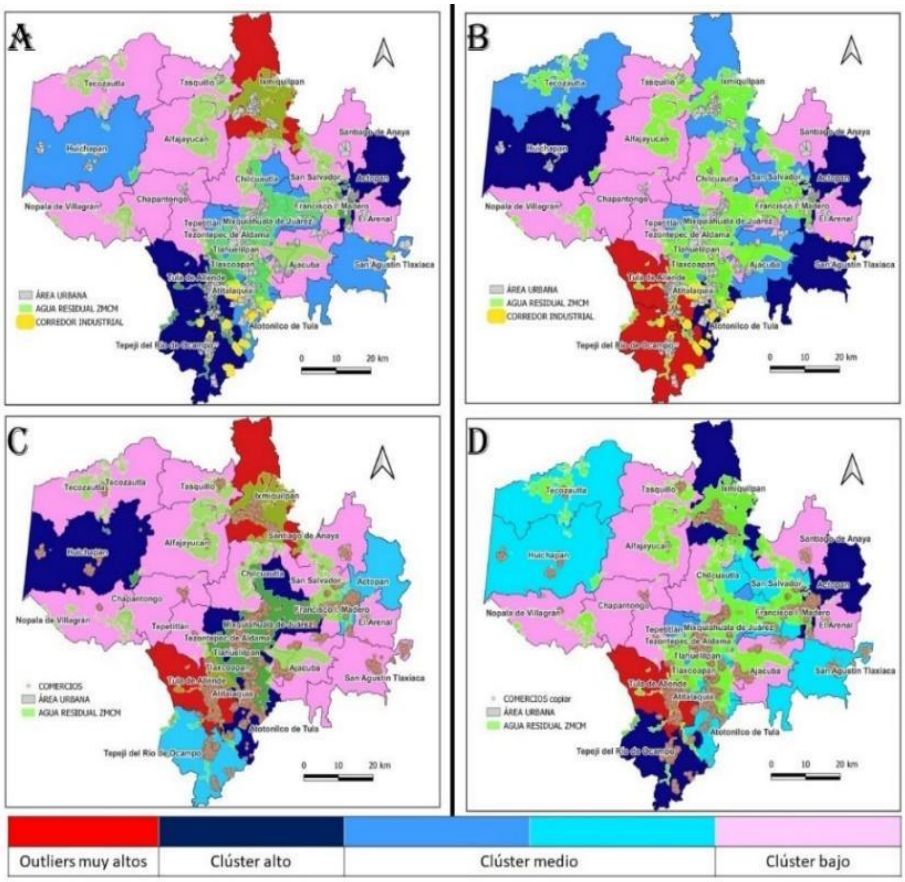


Figura 15. Clústers de los municipios para los parámetros del sector económico: Industrias manufactureras (15A), empleados en el sector manufacturero (15B), Comercios (15C) y empleados en comercio (15D). Fuente: elaboración propia

Ixmiquilpan aparece como un municipio atípico (rojo) debido al notable incremento de empresas en sectores como alimentos, metalmecánica, canteras, maquilas textiles y la amplia artesanía de minorías indígenas, impulsada durante este período. Este crecimiento

industrial y económico ha ido de la mano con un acceso más estable a recursos hídricos, favorecido por la cercanía con fuentes de agua importada.

Ixmiquilpan se identifica como un municipio atípico dentro del análisis (representado en color rojo en la Figura 15A). Este crecimiento se ha concentrado principalmente en sectores como la industria alimentaria, metalmecánica, explotación de canteras, maquila textil y, de manera destacada, en la producción artesanal impulsada por comunidades indígenas. La diversificación de actividades económicas ha contribuido a dinamizar la economía local. Este desarrollo industrial ha estado acompañado por un acceso más estable a recursos hídricos, elemento clave para el sostenimiento de varias de estas actividades.

En el grupo de municipios representados en azul intenso se destacan Actopan, caracterizada por una notable concentración de industrias como ladrilleras y caleras; el conjunto conformado por Tepeji del Río, Tlaxcoapan y Tula de Allende, que forman parte del corredor industrial y albergan importantes plantas del sector químico, cementero y alimenticio. Estos municipios comparten factores clave que han favorecido su desarrollo industrial: el acceso constante a recursos hídricos (principalmente agua residual tratada) y una infraestructura vial que los conecta con otras regiones del estado y del país. Esta combinación de elementos ha propiciado la instalación y expansión de los parques industriales.

Cerca de ellos, los municipios del clúster color azul medio también tienen acceso al agua, aunque de manera menos intensiva. Por otro lado, los municipios con acceso limitado al agua importada, como los representados en rosa, presentan los menores porcentajes de crecimiento, lo que refleja la estrecha relación entre la disponibilidad de agua y el desarrollo socioeconómico de la región.

Al igual que en el sector agrícola, la construcción del Arco Norte ha sido un factor clave en el desarrollo industrial de la región. Esta autopista ha mejorado la conectividad con las zonas centro y norte del país, facilitando no solo el transporte de mercancías, sino también la movilidad de las personas. Gracias a ello, se han generado nuevas oportunidades laborales al ampliar el acceso de la población a centros industriales y polos de empleo. Además, el

desarrollo de infraestructura complementaria como caminos rurales, carreteras secundarias ha fortalecido la integración territorial, reduciendo el aislamiento de comunidades.

La mejora en la conectividad vial ha impulsado un crecimiento urbano acelerado en algunos municipios cercanos a grandes urbes, facilitando el desplazamiento hacia estas áreas. Este fenómeno ha tenido un impacto directo en el mercado inmobiliario, especialmente en Tula y Tepeji, donde el precio del suelo para usos comerciales y/o industrial ha experimentado un aumento significativo. Como resultado, municipios aledaños, como Atotonilco de Tula y Atitalaquia, han registrado un crecimiento notable en su actividad industrial, atraídos por los costos relativamente más bajos del suelo y la proximidad a una infraestructura vial clave, lo que ha favorecido el establecimiento de más infraestructura.

- **Empleados del sector secundario en la industria de la manufactura.**

Desde la década de 1980, el valle se consolidó como un centro de industrialización, lo que provocó una creciente migración de trabajadores hacia la región. Este flujo de población fue impulsado por la alta demanda de mano de obra, dando lugar al crecimiento urbano y a la transformación de varios municipios en centros urbanos estratégicos. La atracción de capital se ha sustentado en la disponibilidad de recursos naturales, el acceso al agua para procesos industriales y la existencia de infraestructura vial y de comunicación, factores que en conjunto han configurado un entorno favorable para el desarrollo económico y social de la región (Canseco-Reyes, 2018).

El análisis conjunto de los mapas 15A y 15B revela que los municipios con mayor crecimiento en el empleo del sector secundario coinciden con aquellos que albergan industrias o forman parte de corredores industriales consolidados. Entre estos destacan municipios cercanos a polos industriales como el corredor Tula-Tepeji-Atitalaquia, así como las ciudades de Pachuca y Querétaro. Esta dinámica sugiere un flujo migratorio tanto interno como externo al valle, como se observa en el caso de Tecozautla. Allí, la conectividad mediante autopistas permite a la población desplazarse hacia corredores industriales como el de San Juan del Río–Querétaro en busca de mejores oportunidades laborales.

No obstante, el desarrollo del sector de la transformación energética (refinería de Tula y la central termoeléctrica Francisco Pérez Ríos) ha permitido que una parte significativa de la población local acceda a empleos mejor remunerados. Esta transición ha reducido la dependencia del sector agrícola, diversificado las fuentes de ingreso y fortalecido la economía regional.

Los empleos en la industria suelen ofrecer mejores salarios y prestaciones laborales en comparación con las actividades agrícolas o artesanales. Esta diferencia ha impulsado un aumento en los ingresos de las familias que han migrado del sector agrícola al industrial, contribuyendo a mejorar sus condiciones de vida. El incremento en los ingresos ha facilitado el acceso a servicios de salud, educación, transporte y vivienda de mayor calidad, generando un impacto positivo en el bienestar de las comunidades.

Sin embargo, la creciente industrialización puede también generar desigualdades en ingresos y oportunidades, no todos los sectores de la población se benefician por igual. Las personas que carecen de acceso a educación técnica o experiencia laboral pueden quedar excluidas de los empleos mejor remunerados, lo que limita su participación en los beneficios del desarrollo industrial. Además, la actividad industrial, especialmente la vinculada al sector petroquímico, puede ocasionar impactos ambientales negativos, como la contaminación del aire y del agua. Estos efectos afectan la salud de la población y pueden reducir la calidad de vida en las comunidades cercanas a estas.

- **Comercios y empleados en comercios**

El número de comercios en el valle aumentó, aunque en menor medida que las industrias manufactureras, como se observa en las Figuras 15C y 15D. Los mayores incrementos se registraron en Ixmiquilpan y Tula, municipios considerados atípicos y destacados en color rojo. Este fenómeno está estrechamente relacionado con su proximidad a centros turísticos, atracciones ecoturísticas y balnearios cercanos (ver Figura 1). La cercanía a estas zonas favorece la expansión del comercio al aprovechar el flujo de visitantes y turistas, impulsando así la actividad económica local.

La distribución de los clústers refleja su proximidad a áreas densamente pobladas como Querétaro y Pachuca (ver Figura 1). Este patrón sugiere una relación estrecha entre la actividad comercial local y la cercanía a zonas de alto crecimiento económico. Además, se observa que algunos de los municipios con mayor concentración de comercios se encuentran en la zona centro-sur del valle, coincidiendo con las áreas que presentan una mayor presencia de industrias manufactureras y zonas urbanas más extensas. En estas localidades, el acceso constante al agua impulsa tanto el desarrollo comercial como el industrial.

De igual manera, el valle ofrece grandes oportunidades para el desarrollo de un turismo sostenible que no solo valore las tradiciones culturales y la biodiversidad local, sino que también impulse el comercio de artesanías, un sector con un enorme potencial. Fortalecer la capacitación de los artesanos y promover sus productos a nivel nacional e internacional podría generar una expansión significativa de este mercado, beneficiando directamente a las comunidades locales. El comercio de artesanías y los corredores gastronómicos podrían constituir fuentes clave de desarrollo económico para los municipios menos industrializados, además ofrecen alternativas sostenibles y accesibles para diversificar sus economías. Al fortalecer estas actividades, se promueve la autosuficiencia económica, se preservan los saberes ancestrales y se mejora la calidad de vida en las comunidades.

5.2.2.4. SECTOR SOCIAL

Este sector incluye los centros educativos, centros de atención médica, empleados del sector terciario y el parque vehicular. Los mapas correspondientes a cada uno de estos parámetros se presentan en la Figura 16, mientras que los incrementos porcentuales de cada clúster identificado se detallan en la Tabla 22.

Muchas comunidades en el valle son rurales y están alejadas de las zonas urbanas, lo que incrementa el aislamiento social. Este aislamiento dificulta el acceso a servicios educativos y de salud, contribuyendo a la perpetuación de la pobreza en la región. Por ello, es fundamental identificar estos municipios para diseñar programas específicos que ayuden a mitigar esta situación.

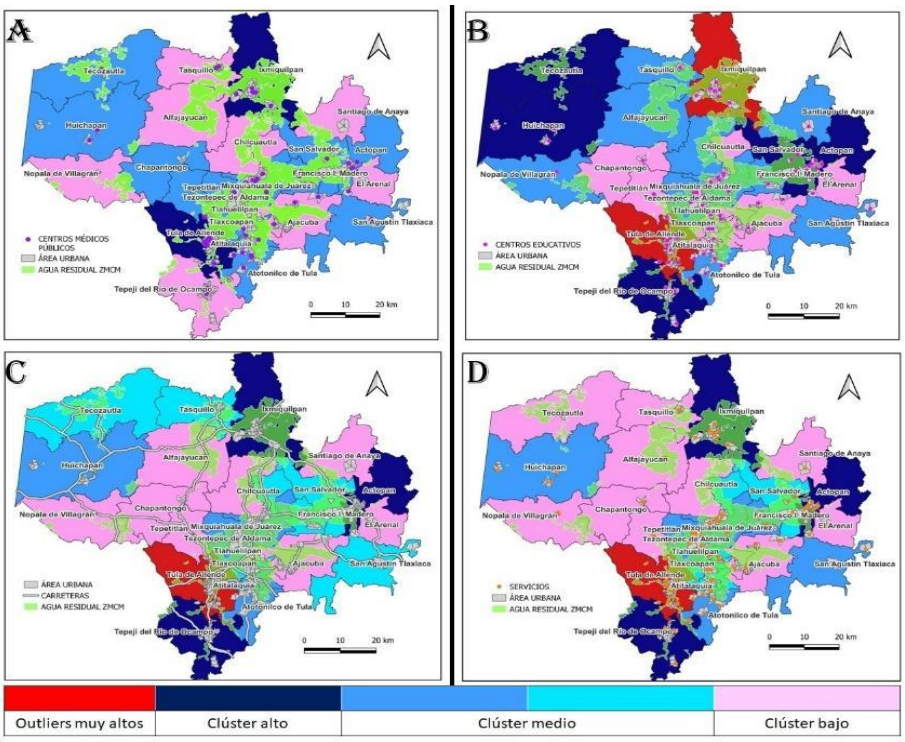


Figura 16. Clústers de los municipios para los parámetros del sector social: centros médicos (16A), centros educativos (16B), vehículos (16C) y empleados en servicios (16D). Fuente: elaboración propia

- **Centros educativos y de salud.**

La mayoría de los municipios registraron un bajo crecimiento en la cantidad de centros médicos, como se observa en las Figuras 16A. Aproximadamente la mitad de los municipios presentan incrementos limitados desde 1985 (representados en color rosa). En contraste, los mayores aumentos se concentran en municipios con mayor población y presencia urbana, especialmente en la zona centro-sur. Es importante señalar que muchos municipios sin hospitales de primer nivel dependen de la atención médica disponible en localidades cercanas, lo que refleja desigualdades en el acceso a servicios de salud (Rodarte-García, 2011).

En el caso de los centros educativos (Figura 16B), los valores más altos también se concentran en los municipios con mayor población y extensión urbana, lo cual responde a la necesidad de atender una mayor demanda educativa. Cabe destacar que los preescolares y las

escuelas primarias son los tipos de centros educativos más comunes en los municipios del valle.

Se observa que el aumento de centros educativos es ligeramente mayor en comparación con el de centros médicos. Por esta razón, algunos municipios que aparecen en color azul intenso en la Figura 16A (centros médicos) se representan en color rojo en la Figura 16B (centros educativos), mientras que aquellos en azul medio en la 16A pasan a azul intenso en la 13B. Esta coincidencia refleja la relación entre ambas demandas de servicios por parte de la población. Asimismo, se puede constatar una similitud con la Figura 13, que muestra la distribución de los clústers de población.

Si bien ambos resultados eran esperados y no resultan sorprendentes, esta es la primera vez que se demuestra de manera matemática y se cuantifican las diferencias entre los municipios agrupados en los tres clústers con un enfoque espacial. Este enfoque permite vincular de forma más precisa la distribución territorial de los servicios con las condiciones socioambientales particulares de la región. En este sentido, la disponibilidad de agua superficial residual se configura como un elemento clave para entender la dinámica del VM. Esta fuente hídrica no solo ha permitido el desarrollo de actividades agrícolas, sino que también ha incidido indirectamente en la distribución de la población y, por ende, en la demanda de servicios educativos y de salud

- **Vehículos**

La distribución de los municipios en los cuatro clústers se presenta en la Figura 16C, y los valores correspondientes se detallan en la Tabla 22. El mayor incremento se registró en el municipio de Tula (destacado en color rojo), con un aumento del 17%, lo que lo posiciona como un caso atípico (outlier) en comparación con el resto de los municipios.

De manera similar a los demás parámetros de servicios, los municipios que registran un mayor aumento en el número de vehículos destacan por contar con amplias áreas urbanas e infraestructura vial desarrollada. Estos municipios se ubican principalmente en las zonas sur y norte del valle, y se caracterizan por su cercanía a grandes centros urbanos como Pachuca, Querétaro y la ZMCM.

No obstante, el clúster de municipios con porcentajes de aumento medio también presenta una cantidad considerable de vehículos, utilizados tanto como medio de transporte personal como para el traslado de productos agrícolas y artesanales, lo que facilita el comercio local. Esta movilidad no solo refleja un cierto nivel de desarrollo económico, sino que también evidencia los intercambios comerciales entre municipios, fortaleciendo así la economía regional.

- **Empleados en el sector terciario**

Este parámetro analiza el aumento en el número de empleados del sector servicios en los municipios del valle (Figura 16D), cuyos resultados se detallan en la Tabla 22.

Al comparar las Figuras 13 y 16D, se observa que la mayor concentración de establecimientos de servicios se localiza en la zona centro-sur del valle. Esta distribución es consistente con la presencia de comercios e industrias manufactureras, que atraen población y generan demandas que se reflejan en el crecimiento del sector terciario. Este parámetro también da lugar a la formación de cuatro clústers, en concordancia con los patrones observados en la distribución de la población, las industrias manufactureras, los empleos industriales, el parque vehicular, y los servicios de salud y educación.

En consecuencia, los municipios con una población más numerosa tienden a albergar un mayor número de comercios y servicios, demostrándose por k-medias una relación espacial de los municipios con similitudes en el crecimiento poblacional y la actividad comercial, lo cual es un resultado esperado.

La región del VM ha sido históricamente hogar de comunidades indígenas, principalmente otomíes y ñähñus, que han enfrentado altos niveles de marginación. Esta exclusión social y pobreza estructural tienen raíces profundas en factores históricos, sociales y económicos que aún afectan a estas poblaciones. Frecuentemente relegadas a los márgenes de la sociedad, estas comunidades sufren la falta de acceso a recursos fundamentales, como servicios básicos y empleos mejor remunerados, generando un ciclo de pobreza difícil de romper que limita su participación en el desarrollo socioeconómico regional.

Dentro del valle, las disparidades entre municipios son evidentes. Mientras algunos cuentan con mejores servicios e infraestructura, otros permanecen atrapados en condiciones de pobreza extrema. La distribución desigual de recursos y oportunidades genera brechas profundas en el desarrollo, reflejándose en las diferencias entre municipios con altos índices de industrialización y aquellos que dependen principalmente de la agricultura o del comercio de artesanías.

El aumento poblacional y la expansión industrial han incrementado la demanda de recursos esenciales, como el agua y la energía, necesaria para las operaciones industriales y el abastecimiento eléctrico domiciliario. El análisis socioeconómico es fundamental para comprender cómo estos cambios demográficos y económicos impactan la demanda de estos recursos, permitiendo prever y gestionar su oferta de manera sostenible.

Asimismo, la diversidad en las características socioeconómicas de las comunidades del VM refleja diferentes patrones de dependencia de los recursos hídricos y energéticos, lo cual influye directamente en su gestión. Comprender las particularidades de cada municipio facilita el diseño de estrategias adaptadas que promuevan un uso más eficiente y equitativo de los recursos, garantizando su disponibilidad y sostenibilidad a largo plazo.

Frente a este panorama, resulta indispensable implementar estrategias integrales que impulsen el cumplimiento de los ODS 8 y 11, con especial atención a los municipios más rezagados. Las políticas públicas deben orientarse a reducir desigualdades, mejorar la equidad en el acceso a servicios y recursos, y fortalecer un desarrollo regional inclusivo y sostenible.

5.3. Escenarios de demanda energética

5.3.1. Sector residencial

5.3.1.1. Proyección de la demanda energética residencial. Año base 2015

La demanda energética residencial en el valle se centró en las actividades diarias relacionadas con el Nexo Agua-Energía, incluyendo el calentamiento de agua, la cocción de alimentos, la iluminación, el uso de electrodomésticos y dispositivos electrónicos.

En el año base, la demanda total de energía residencial en el VM fue de 3,573 TJ. La actividad que consumió la mayor cantidad de energía fue la cocción de alimentos, con1,674 TJ, representando el 47% del consumo total. Le siguió el calentamiento de agua, con 1,409 TJ, equivalente al 39% del consumo. El uso de electrodomésticos ocupó el tercer lugar, con 253 TJ (7%), mientras que la iluminación y otros dispositivos electrónicos juntos representaron el 7% restante, con un consumo combinado de 238 TJ. La Figura 17 ilustra el consumo energético de cada una de estas actividades.

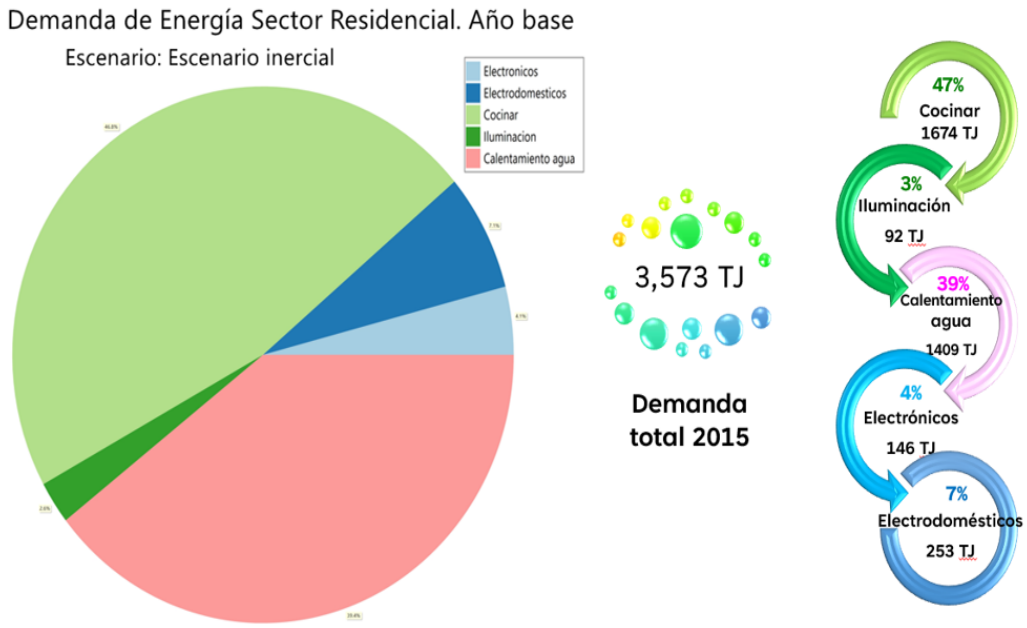


Figura 17. Demanda energética de las diferentes actividades del sector residencial en el año base 2015. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

5.3.1.2. Demanda por tipo de insumo energético. Año base 2015

La Figura 18 muestra el consumo de insumos energéticos en las diferentes actividades del sector residencial. Se observa que tres actividades (iluminación, uso de electrónicos y electrodomésticos) dependen exclusivamente de electricidad. Por otro lado, la cocción de alimentos utiliza tres tipos de insumos energéticos: gas LP, madera y electricidad. En cuanto al calentamiento de agua, este se realiza principalmente con madera y gas LP, siendo el consumo de madera superior al de gas LP. Esta preferencia podría explicarse porque, en el VM, la madera suele ser un recurso gratuito o de bajo costo, lo que la hace más accesible que el gas LP para la población local.

Esta preferencia responde a las limitaciones económicas de muchas familias, la madera, al ser un recurso local y gratuito, resulta más accesible que el gas LP para los hogares de bajos ingresos. Desde una perspectiva ambiental, su uso conlleva efectos negativos, como la deforestación y la emisión de contaminantes que deterioran la calidad del aire y afectan la salud pública.

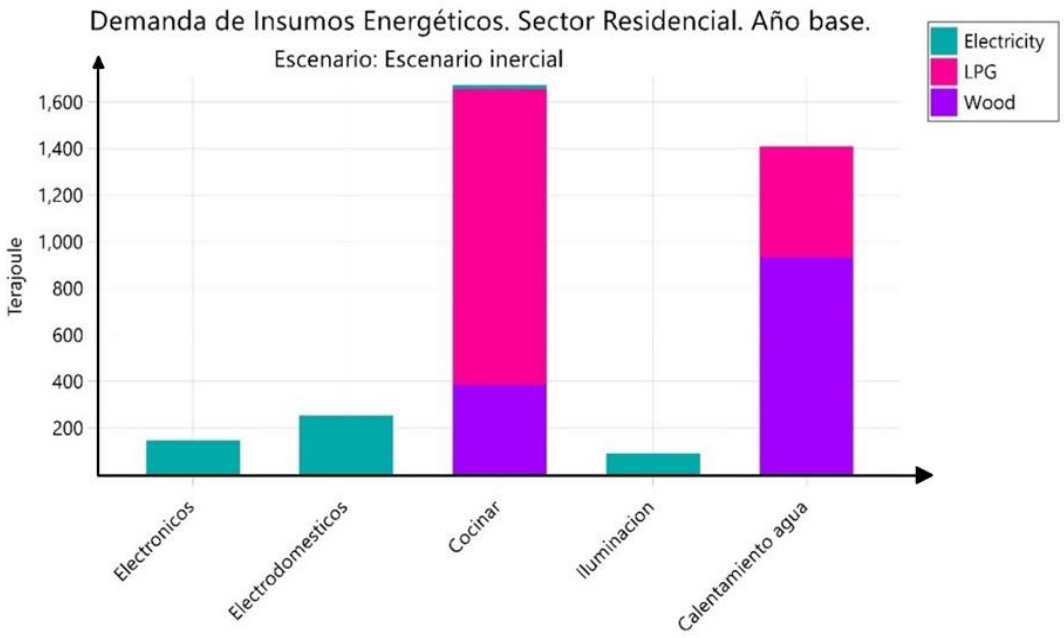


Figura 18. Consumo de insumos energéticos del sector residencial en el año base 2015. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

Aunque la electricidad estuvo presente en la mayoría de las actividades residenciales, el gas LP fue el insumo energético con el mayor nivel de consumo, alcanzando un total de 1,743 TJ. Le siguió la madera, con un consumo de 1,324 TJ. La Tabla 25 presenta los detalles específicos del consumo energético por tipo de insumo.

Tabla 25. Consumo de insumos energéticos para la demanda energética [TJ] del sector residencial, año base 2015

	Cocción de alimentos	Calentamiento de agua	Iluminación	Electrodomésticos	Electrónicos	TOTAL
Electricidad	16	-	92	253	146	**507**
Gas LP	1269	474	-	-	-	**1743**
Madera	388	935	-	-	-	**1324**
TOTAL	**1674**	**1409**	**92**	**253**	**146**	**3573**

El gas LP fue el insumo más utilizado, con un 48.8%, concentrado mayoritariamente en la cocción de alimentos y en menor medida, el calentamiento de agua. En segundo lugar, se ubicó la madera, con 37.1%, siendo predominante en el calentamiento de agua. Por su parte, la electricidad alcanzó un consumo de 14.2%, utilizada exclusivamente en actividades como iluminación, uso de electrodomésticos y electrónicos. Esta configuración refleja una matriz energética residencial dual, donde coexisten tecnologías modernas y prácticas tradicionales, condicionadas por factores de accesibilidad, costos y dinámicas socioculturales propias de la región.

5.3.1.3. Proyección de la demanda residencial en el escenario inercial. Periodo 2015-2050

A partir de las tasas de crecimiento de viviendas habitadas en el VM durante el periodo 2015–2020, se realizó una proyección de la evolución de la demanda energética residencial para cada actividad hasta el año 2050. La Figura 19 muestra los resultados correspondientes al escenario inercial (Business as Usual, BAU), reflejando cómo podrían evolucionar los

consumos si se mantienen las condiciones actuales sin intervenciones significativas en eficiencia o cambio de tecnología.

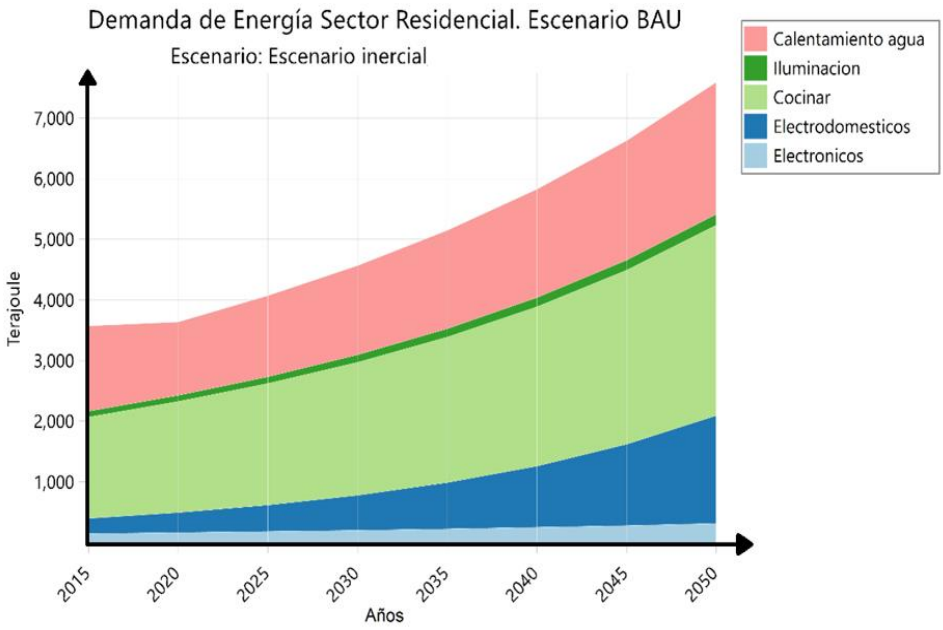


Figura 19. Demanda energética del sector residencial en el escenario inercial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

Como se observa en la Figura 19, la actividad con mayor crecimiento proyectado en el escenario BAU es la cocción de alimentos (color verde claro), cuyo consumo energético aumenta de 1,674 TJ en 2015 a 3,140 TJ en 2050. Le sigue el calentamiento de agua (color rosa), con un incremento de 1,409 TJ a 2,173 TJ en el mismo periodo. En contraste, la iluminación (color verde oscuro) presenta el menor crecimiento relativo, pasando de 92 TJ en 2015 a 182 TJ en 2050. Estos resultados reflejan un aumento en la demanda térmica, en comparación con un crecimiento más moderado en el consumo asociado a electricidad.

La fuerte dependencia al gas LP plantea retos económicos, especialmente para sectores de bajos ingresos, mientras que el uso continuo de la madera tiene implicaciones ambientales. El aumento proyectado de la demanda energética evidencia la necesidad de estrategias que promuevan la transición hacia fuentes energéticas más sostenibles y eficientes, como el gas natural, la electricidad renovable o tecnologías solares para calentamiento de agua. La Tabla 26 muestra el crecimiento de cada actividad del sector residencial en intervalos quinquenales desde 2015 hasta 2050.

Tabla 26. Proyección del crecimiento de la demanda [TJ] del sector residencial en el escenario inercial, periodo 2015-2050.

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Calentamiento de agua	1409	1210	1334	1471	1621	1788	1971	2173
Iluminación	92	101	112	123	136	150	165	182
Cocción de alimentos	1674	1832	2006	2195	2402	2627	2873	3140
Electrodomésticos	253	331	436	576	762	1,009	1,339	1,779
Electrónicos	146	163	181	202	226	252	282	315
TOTAL	**3573**	**3638**	**4069**	**4567**	**5146**	**5825**	**6629**	**7588**

La actividad que consume más energía es la cocción de alimentos, lo que representa un aumento del 87.6%, esto indica que cocinar sigue siendo una necesidad básica que crece con la población. Por su parte, el calentamiento del agua muestra una ligera disminución hasta 2020, posiblemente por mejoras en tecnología o cambios en hábitos, pero después crece hasta 2,173 TJ en 2050, un incremento total del 54.1%.

La iluminación también aumenta, casi duplicando su consumo de 92 TJ a 182 TJ, un crecimiento del 97.8%. Las actividades que más crecen proporcionalmente son el uso de electrodomésticos y electrónicos, reflejando una modernización en los hogares y mostrando que cada vez más personas usan dispositivos tecnológicos. En total, la demanda energética residencial se duplica, creciendo un 112.2% hasta alcanzar 7,588 TJ en 2050. Este aumento refleja no solo el crecimiento de la población, sino también la incorporación de nuevas tecnologías y mayores necesidades energéticas en los hogares.

Abad-Ordóñez (2019) realizó una proyección de la demanda energética residencial para la ciudad de Cuenca, Ecuador, en el período 2018–2030, bajo un escenario de tendencia BAU. En dicho estudio, la demanda inicial en 2018 fue de 2,066 TJ, con un incremento proyectado a 5,258 TJ para 2030. Al comparar estos valores con los obtenidos para VM, se observa que en el año base la demanda en Cuenca era menor. No obstante, para 2030, Cuenca superará al VM en 691 TJ. Mientras Cuenca presenta un incremento acelerado en la demanda residencial, el crecimiento del VM es más moderado.

En el año 2015, las emisiones de GEI generadas por el sector residencial del VM alcanzaron un total de 154,012 t. Para 2050, estas emisiones se proyectan en 301,037 t, lo que representa un incremento de 147,025 t a lo largo de 35 años, lo que equivale a un aumento promedio de 4,200 t por año. La Figura 20 muestra la evolución de las emisiones asociadas a dos de las actividades residenciales más intensivas en energía térmica: la cocción de alimentos y el calentamiento de agua. Ambas actividades dependen de combustibles como el gas LP y la leña.

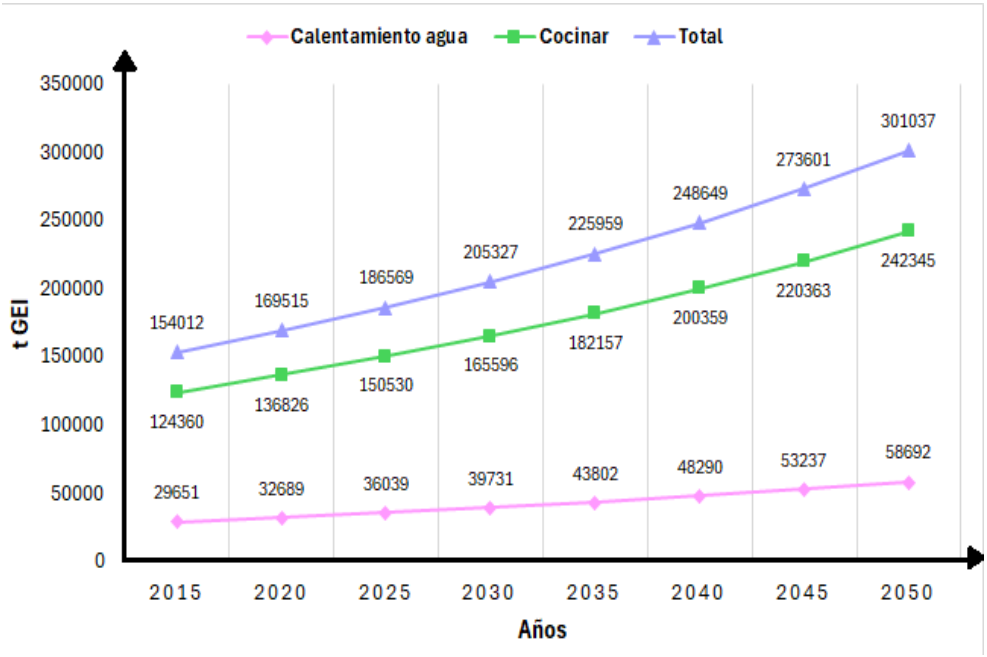


Figura 20. Emisiones de gases de efecto invernadero en el sector residencial periodo 2015-2050, en el escenario inercial. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

Como se observa, la cocción de alimentos es la actividad residencial que genera la mayor cantidad de emisiones de GEI, superando al calentamiento del agua. Es importante señalar que sólo se incluyeron estas dos actividades en el análisis de emisiones, debido a que son las únicas que implican el uso directo de combustibles fósiles y biomasa. En contraste, las demás actividades residenciales (iluminación, uso de electrodomésticos y electrónicos) utilizan exclusivamente electricidad, por lo que no se consideraron en este cálculo directo de emisiones, al no generar GEI en el punto de consumo.

5.3.1.4. Proyección de la demanda en el escenario de implementación de luminarias LED. Periodo 2015-2050

Aunque la implementación de luminarias LED comenzó hace varios años, su impacto en la eficiencia energética del sector residencial ha sido significativo. Estas tecnologías consumen considerablemente menos energía en comparación con las bombillas incandescentes o fluorescentes, lo que contribuye a una reducción en la demanda eléctrica. Además, las luminarias LED presentan una vida útil extendida, lo que reduce la frecuencia de reemplazo y los gastos de mantenimiento (Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, 2015). Por estas razones, su adopción representa una medida de mitigación efectiva y sostenible en términos energéticos. La Figura 21 muestra la disminución proyectada en la demanda energética para iluminación residencial, destacada en color verde claro.

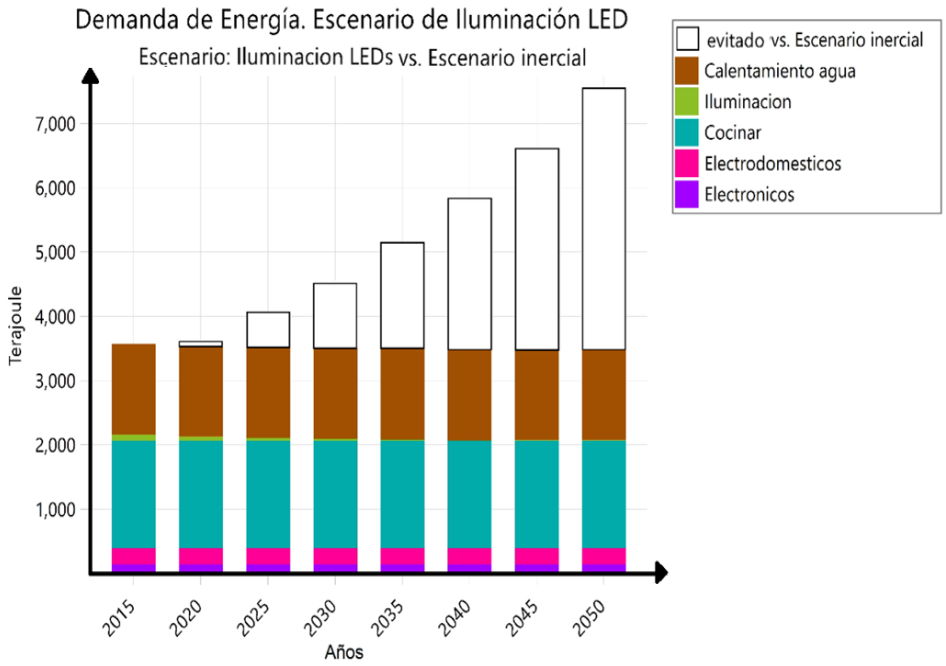


Figura 21. Demanda energética del escenario de reemplazo de luminarias para el sector residencial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

En la Tabla 27 se detalla la demanda energética proyectada para cada actividad del sector residencial, así como el potencial de mitigación asociado en el escenario analizado. Esta información permite identificar las áreas con mayor oportunidad para implementar estrategias de reducción en el consumo energético.

Tabla 27. Proyección del crecimiento de la demanda energética [TJ] en el escenario de implementación de uso de luminarias LED para el sector residencial, periodo 2015-2050

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Potencial de mitigación	-	95	542	1055	1647	2339	3142	4,100
Calentamiento agua	1409	1409	1409	1409	1409	1409	1409	1,409
Iluminación	92	61	45	31	17	4	5	6
Cocción de alimentos	1674	1674	1674	1674	1674	1674	1674	1,674
Electrodomésticos	253	253	253	253	253	253	253	253
Electrónicos	146	146	146	146	146	146	146	146
TOTAL	**3573**	**3543**	**3527**	**3512**	**3499**	**3486**	**3486**	**3488**

La demanda energética para iluminación mostró una reducción de 92 TJ en 2015 a solo 5 TJ en 2045. Esto equivale a un ahorro de 87 TJ, evidencia el impacto positivo de la adopción de tecnologías de iluminación más eficientes, como las luminarias LED. Esta transición no solo contribuye a una reducción en el consumo energético del sector residencial, sino que también representa una estrategia clave para la mitigación de emisiones y la optimización del uso de la electricidad.

La adopción de tecnología LED en el sector residencial ha demostrado ser una estrategia efectiva para reducir el consumo energético y mejorar la sostenibilidad (IEA, 2022) . Estudios realizados en diferentes regiones de América Latina evidencian que la sustitución de lámparas tradicionales por LED puede disminuir el uso de energía en iluminación hasta en un 50%, gracias a su alta eficiencia y larga vida útil (Cáceres-Luque, 2022) (Pérez-Lombard et al., 2008). Además, la implementación de sistemas de iluminación inteligentes y el aprovechamiento de la luz natural potencian aún más estos ahorros (Soheilian et al., 2021). En México, por ejemplo, investigaciones muestran que el uso de luminarias LED en espacios como aulas puede reducir el consumo eléctrico en hasta un 33%, y una sustitución total podría superar el 50% (Cornejo Icaza & Oleas Vásconez, 2025) (Cifuentes Guevara, 2025) . Estos resultados resaltan no solo los beneficios energéticos, sino también los económicos y ambientales, posicionando a la iluminación LED como una medida clave para promover la eficiencia energética en el ámbito residencial.

Gracias a la adopción del uso de LED en el sector residencial, la demanda energética para iluminación se redujo aproximadamente un 90 % entre 2015 y 2045. Este resultado

refleja una estrategia de eficiencia energética más efectiva o posiblemente, un crecimiento más moderado en la demanda de servicios de iluminación. La implementación de luminarias LED no solo redujo el consumo energético, sino que también generó beneficios adicionales como la disminución en las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero.

5.3.1.5. Proyección de la demanda en el escenario de implementación de calentador solar. Periodo 2015-2050

El uso de calentadores solares representa una estrategia efectiva para reducir la demanda energética en el sector residencial, particularmente en la actividad de calentamiento de agua. Esta transición no solo disminuye los costos energéticos a nivel doméstico, sino que también reduce las emisiones GEI, contribuyendo a los compromisos globales de mitigación del cambio climático.

La implementación de calentadores solares se alinea con las metas de sostenibilidad energética y mejora la eficiencia en el uso de recursos. En la Figura 22 se presenta el escenario proyectado de adopción de esta tecnología en el valle, así como su correspondiente potencial de mitigación.

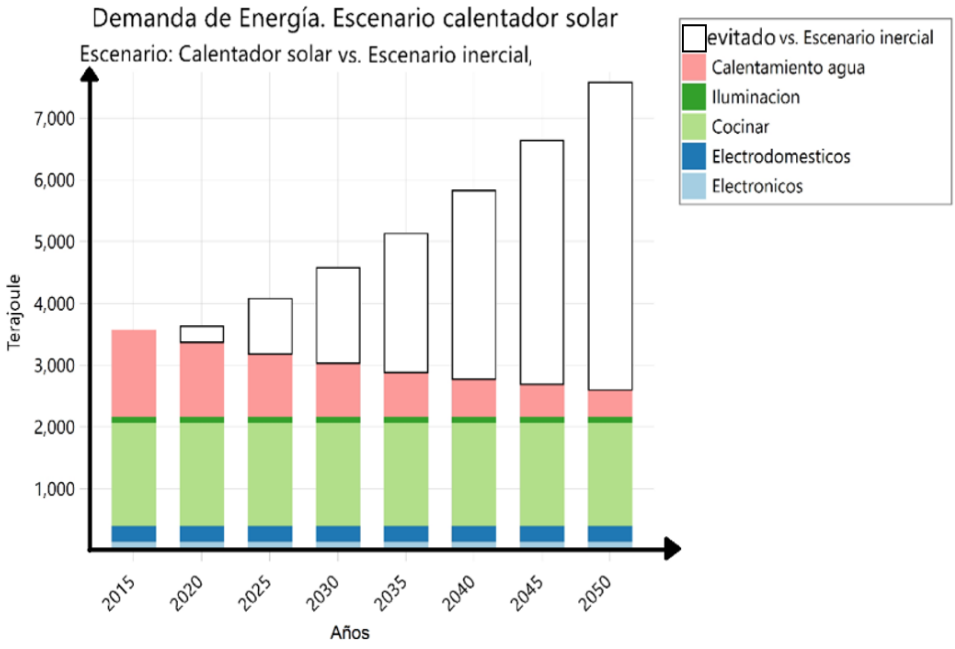


Figura 22. Demanda energética del escenario de implementación de calentador solar en el sector residencial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

La implementación progresiva de calentadores solares en el sector residencial del valle muestra su potencial para la reducción del consumo energético destinado al calentamiento de agua. En 2015, esta actividad representaba una demanda de 1,409 TJ, la cual se redujo hasta alcanzar 430 TJ en 2050 (ver Tabla 28), lo que equivale a una disminución del 69.5% en un periodo de 35 años. Esta reducción es atribuible a la sustitución de fuentes convencionales como el gas LP y la leña por sistemas solares térmicos, que no requieren energía fósil para su operación. En la Tabla 28 se presenta la demanda de cada actividad considerada para el sector residencial. Además, se presenta potencial de mitigación en este escenario.

Tabla 28. Proyección del crecimiento de la demanda energética [TJ] en el escenario de implementación de uso de calentador solar en el sector residencial, periodo 2015-2050

	2015	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2045**	**2050**
Potencial de mitigación	-	279	892	1546	2259	3056	3942	4994
Calentamiento agua	1409	1195	1013	857	722	605	522	430
Iluminación	92	92	92	92	92	92	92	92
Cocción de alimentos	1674	1674	1674	1674	1674	1674	1674	1674
Electrodomésticos	253	253	253	253	253	253	253	253
Electrónicos	146	146	146	146	146	146	146	146
TOTAL	**3573**	**3360**	**3177**	**3021**	**2887**	**2769**	**2686**	**2594**

En consecuencia, el potencial de mitigación acumulado asociado a esta transición asciende a 4,994 TJ en 2050, reflejando el alto impacto que puede tener una sola medida tecnológica bien implementada en términos de eficiencia energética y sostenibilidad ambiental. Estos resultados destacan la viabilidad de los calentadores solares como una estrategia clave en la descarbonización del consumo doméstico de energía en municipios con alto potencial solar.

Además de la reducción de la demanda energética se tuvo un efecto positivo en la disminución de las emisiones GEI. En 2015, las emisiones totales del sector alcanzaron las 154,012 t. Para el año 2050, estas se reducen a 137,252 t, lo que representa una disminución de 16,759 t a lo largo de 35 años. Esta cifra equivale a una reducción promedio anual de 478 t. Los resultados evidencian el potencial de los calentadores solares como una medida efectiva de mitigación climática, especialmente en regiones donde el uso de combustibles

fósiles sigue siendo común en actividades domésticas como el calentamiento de agua (ver Figura 23).

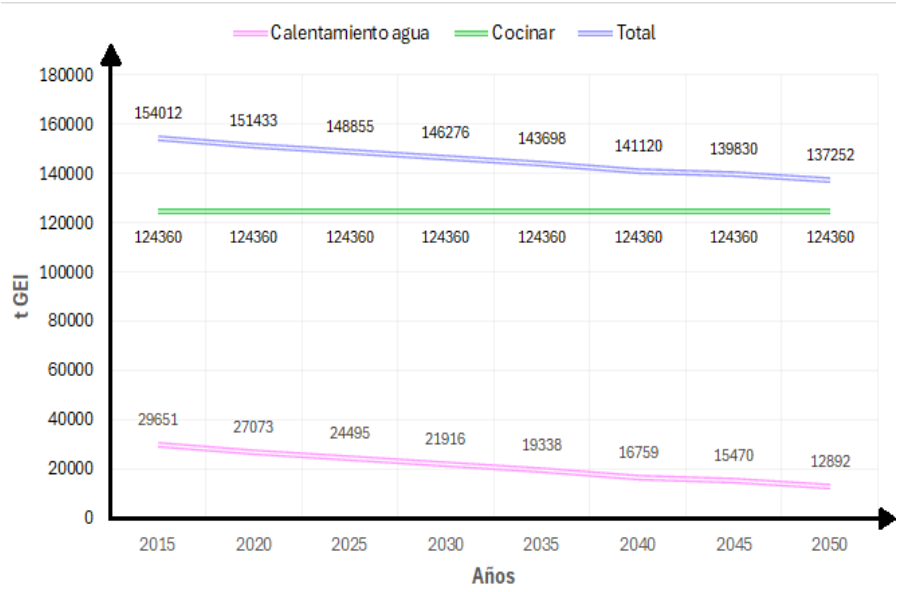


Figura 23. Emisiones de gases de efecto invernadero generadas en el escenario de uso de calentador solar en los hogares e inercial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

Al comparar los resultados de la Figura 23 con los presentados en la Figura 20, se observa que mientras en el escenario inercial (BAU) las emisiones proyectadas para 2050 alcanzan las 301,037 t, en el escenario con medidas de mitigación (uso calentador solar) las emisiones se reducen a 137,252 t. Esta diferencia equivale a una mitigación de 163,785 t de GEI, lo que destaca el impacto positivo de esta tecnología en la disminución de la huella de carbono del sector residencial.

Diversas investigaciones han documentado los beneficios ambientales, económicos y sociales asociados a la adopción de calentadores solares de agua, especialmente en contextos residenciales y de alta vulnerabilidad energética. Un análisis realizado en la Ciudad de México estimó que la instalación de 25,000 sistemas solares térmicos en viviendas podría reducir las emisiones de CO_2 en aproximadamente 16,730 t anuales, lo cual equivale a las emisiones generadas por cerca de 11,153 automóviles en un año. Además, se reportó que el 74% de los beneficiarios experimentó una disminución significativa en el consumo de gas de entre el 50% y el 74% (Valencia, 2024).

En el ámbito social, Tagle-Zamora (2019) evaluó la oportunidad del uso de calentadores solares en viviendas vulnerables del estado de Guanajuato, destacando su valor como herramienta para enfrentar los desafíos de sostenibilidad en municipios con rezagos sociales. Esta investigación subraya la necesidad de impulsar su incorporación universal como política pública de transición energética justa. De forma complementaria, Martínez-Guerrero (2024) plantea que los calentadores solares representan una alternativa sostenible frente a los sistemas térmicos basados en gas, con el potencial de reducir emisiones de carbono y disminuir la dependencia de recursos fósiles y no renovables.

A nivel internacional, estudios como los de Peter et al. (2022) en Sudáfrica reportaron una reducción del 60 % en el consumo eléctrico destinado al calentamiento de agua en hogares de bajos ingresos.

En conjunto, estos estudios refuerzan los resultados del presente análisis y evidencian que la adopción de calentadores solares no solo contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también representa una estrategia eficaz para disminuir el consumo de combustibles fósiles, generar ahorros económicos en los hogares y avanzar hacia un modelo energético más eficiente.

5.3.2. SERVICIOS PÚBLICOS

5.3.2.1. Proyección de la demanda energética en los servicios públicos. Año base 2015

En el año base, la demanda energética total del sector de servicios públicos fue de 1,282 TJ. La actividad con el mayor consumo fue la potabilización de agua, con el 31% del consumo total. Le siguieron las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales (PTAR), con el 25% del consumo. El bombeo de agua potable y residual ocupó el tercer lugar, con el 17%, mientras que la iluminación pública y la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco de Tula en conjunto representaron el 27% restante, con un consumo combinado, como se observa en la Figura 24.

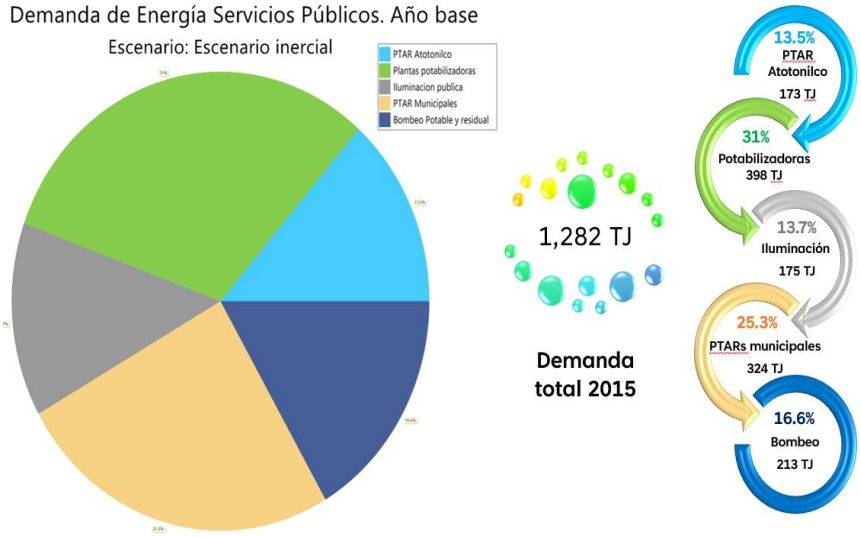


Figura 24. Demanda energética de los servicios públicos en el año base 2015. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

A diferencia del sector residencial, que utiliza una diversidad de insumos energéticos como electricidad, gas LP y madera, el sector de servicios públicos se caracteriza por depender exclusivamente de la electricidad. Esta dependencia responde a la naturaleza de sus actividades, que incluyen el bombeo y tratamiento de agua, la iluminación pública y otros procesos que requieren principalmente energía eléctrica para su operación.

5.3.2.2. Proyección de la demanda en los servicios públicos en el escenario inercial. Periodo 2015-2050

Para estimar la demanda energética proyectada, se utilizó la tasa de crecimiento reportada para el sector servicios en el estado de Hidalgo, bajo el supuesto de que todos los subsectores dentro de los servicios públicos crecerán de manera uniforme. No obstante, se hizo una excepción con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco de Tula, cuya demanda energética se mantuvo constante a lo largo del periodo de análisis, al no preverse una expansión de sus operaciones. La Figura 25 muestra la evolución proyectada de la demanda energética del sector servicios públicos.

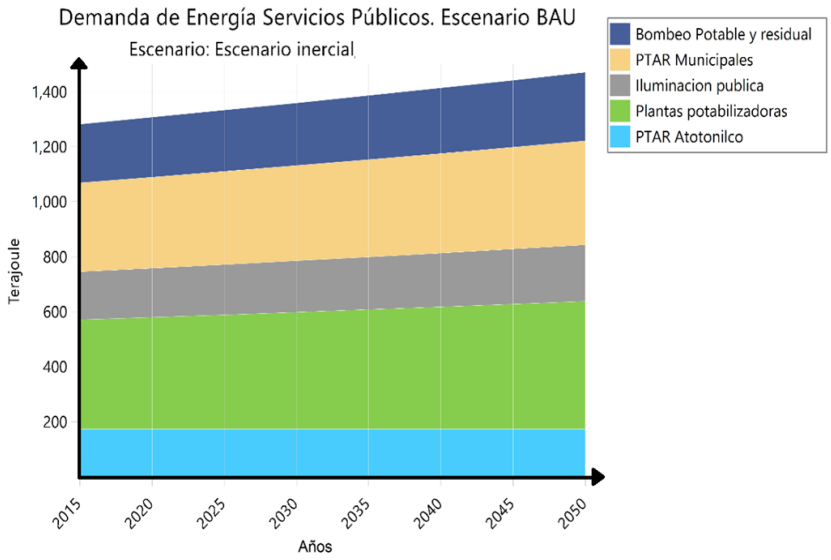


Figura 25. Demanda energética de los servicios públicos en el escenario inercial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

Como se observa en la Figura 25, la potabilización de agua (color verde claro) presenta el mayor incremento en demanda energética dentro del sector de servicios públicos, pasando de 398 TJ en 2015 a 465 TJ en 2050, lo que representa un aumento del 17% a lo largo del periodo. Le siguen las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales (color amarillo), cuya demanda crece de 324 TJ a 379 TJ, lo que equivale a un incremento del 17%. En contraste, la iluminación pública (color gris) registra el menor aumento, al pasar de 175 TJ a 205 TJ, con una variación del 17.1%. Cabe destacar que la demanda energética de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco de Tula se mantuvo constante en 173 TJ durante todo el periodo analizado, no se proyectó crecimiento en su operación.

Al comparar con el sector residencial, se observa que el crecimiento de la demanda energética se concentra principalmente en actividades que requieren energía térmica. En contraste, las actividades que dependen de la electricidad presentan un crecimiento más moderado. Por su parte, el sector de servicios públicos exhibe un comportamiento distinto, caracterizado por una mayor estabilidad en su consumo energético. Las actividades consideradas en este sector dependen exclusivamente de electricidad. Estas diferencias ponen de manifiesto que el incremento de la demanda energética residencial está influenciado por factores como el crecimiento poblacional y los cambios en los hábitos de consumo. En contraste, la estabilidad del sector de servicios públicos sugiere un perfil de consumo más

predecible, lo que podría facilitar la planeación y gestión energética. La Tabla 29 presenta la evolución del consumo asociado a cada actividad de los servicios públicos en intervalos quinquenales, abarcando el periodo de 2015 a 2050.

Tabla 29. Proyección del crecimiento de la demanda energética [TJ] de los servicios públicos en el escenario inercial, periodo 2015-2050

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bombeo potable y residual	213	218	223	228	233	238	243	249
PTARs municipales	324	331	339	346	354	362	370	379
Iluminación pública	175	179	183	187	191	196	200	205
Plantas potabilizadoras	398	407	416	425	435	445	455	465
PTAR Atotonilco de Tula	173	173	173	173	173	173	173	173
TOTAL	**1282**	**1307**	**1333**	**1359**	**1386**	**1414**	**1442**	**1471**

El bombeo potable y residual experimenta un crecimiento del 16.9%, lo que evidencia una creciente demanda en la gestión eficiente y distribución del agua potable, así como en el tratamiento adecuado de las aguas residuales. De manera similar, las plantas de tratamiento municipales incrementan su capacidad en un 17%, lo que refleja un esfuerzo sostenido por ampliar la infraestructura de saneamiento y contribuir a la mejora de la calidad ambiental en la región.

En cuanto a la iluminación pública, se observa un aumento del 17.1%, que puede estar asociado con la expansión urbana y el mejoramiento de servicios públicos para la población, buscando mayor seguridad y bienestar. Las plantas potabilizadoras, que representan el mayor valor entre los rubros analizados, incrementan su capacidad en un 16.8%, lo que evidencia la importancia de garantizar el acceso a agua potable de calidad conforme crece la población y se desarrollan nuevas zonas urbanas o rurales.

Un aspecto que destaca en el análisis es la estabilidad en la PTAR Atotonilco de Tula, la cual se mantiene constante en todo el periodo proyectado. Esta situación podría indicar que la planta ya opera cerca de su capacidad máxima o que, por el momento, no se contemplan ampliaciones en el corto o mediano plazo. Esta falta de crecimiento resulta relevante y podría representar una limitación para sanear los volúmenes de agua residual

provenientes de la Ciudad de México, los cuales muestran una tendencia al alza (Hernández-Espinosa et al., 2024).

5.3.3. SECTOR AGRÍCOLA

5.3.3.1. Proyección de la demanda energética para riego agrícola con agua residual. Año base 2015

La demanda energética del sector agrícola en el VM se estimó en 147 TJ para el año base, considerando únicamente el consumo eléctrico asociado al riego con agua residual. Esta decisión se fundamenta en la relevancia del riego en el contexto del Nexo Agua-Energía, siendo esta actividad una de las principales intersecciones entre los tres elementos.

Se asumió que dicha demanda se mantendría constante durante el periodo de análisis, bajo el supuesto de estabilidad en la superficie agrícola. Aunque esto facilita el modelado, puede no reflejar dinámicas futuras como cambios de uso de suelo, políticas públicas o efectos del cambio climático. El uso exclusivo de electricidad como energético considerado responde a su papel dominante en la operación del sistema de bombeo para riego. Sin embargo, esta simplificación excluye posibles escenarios de transición hacia fuentes renovables, lo que podría alterar significativamente el perfil energético del sector. Este aspecto representa una oportunidad para estudios futuros enfocados en sostenibilidad y eficiencia energética.

5.3.4. SECTOR DE LA MANUFACTURA

5.3.4.1. Proyección de la demanda energética en la industria manufacturera. Año base 2015

El VM ha sido tradicionalmente una región agrícola, aunque en las últimas décadas el sector manufacturero se ha fortalecido en la región. La mayoría de las empresas se concentran principalmente en el corredor industrial Tula–Tepeji, en la zona sur del valle. Aunque la agricultura sigue siendo la actividad principal, la expansión manufacturera impacta en la demanda energética y el uso del territorio.

La demanda energética industrial del VM se focalizó en las principales industrias manufactureras divididas en subsectores, incluyendo química, alimenticia, materiales de la construcción, metalmecánico, textil-piel, y papel-cartón.

En el año base, la demanda energética total del sector industrial fue de 27,154 TJ. La industria química fue la que más energía consumió, representando el 55% del total, lo que refleja su gran importancia en la economía y el uso de energía de la región. La industria de materiales de construcción fue la segunda mayor consumidora, con un 37% del consumo total de energía industrial. El restante 9% del consumo corresponde a otros subsectores industriales, como el metalmecánico, textil-piel y papel-cartón. Aunque estos sectores son más pequeños en términos de consumo energético, contribuyen a la diversidad económica del VM. Esto permite identificar las industrias que más energía consumen, lo cual es fundamental para diseñar políticas dirigidas a reducir su consumo energético y en consecuencia sus emisiones. La Figura 26 presenta el desglose del consumo energético por industria para facilitar su comprensión.

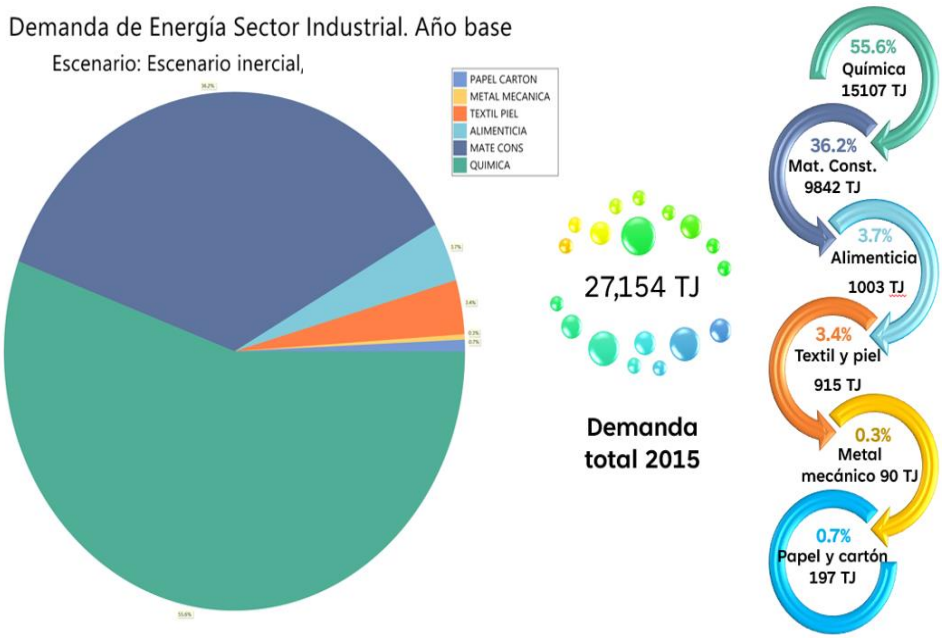


Figura 26. Demanda energética del sector industrial en el año base 2015. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

En 2015, la demanda de energía del sector industrial estuvo altamente concentrada en dos ramas: la industria química y la de materiales de construcción, que en conjunto

representaron más del 90% del consumo total. Esta concentración indica una alta intensidad energética asociada a procesos térmicos complejos y de difícil sustitución. En contraste, sectores como el alimenticio, textil, papel y cartón, y metalmecánica mostraron demandas menores, lo que sugiere mayor eficiencia o menor escala productiva. Desde una perspectiva de transición energética, estos sectores de bajo consumo ofrecen un punto de partida viable para la electrificación o adopción de energías renovables, debido a su menor dependencia de procesos térmicos pesados. Al comparar los resultados obtenidos con los de Montelongo-Reyes (2015), se observa un mayor crecimiento en la demanda energética del sector industrial. La industria química destaca como el sector con el mayor aumento también, lo que refuerza su posición como principal consumidor de energía

5.3.4.2. Demanda por tipo de insumo energético. Año base 2015

La Figura 27 ilustra el consumo de insumos energéticos en cada una de las industrias analizadas. Los diferentes tipos de energéticos utilizados se presentan desglosados por industria, lo que permite una comprensión más detallada de sus patrones de consumo.

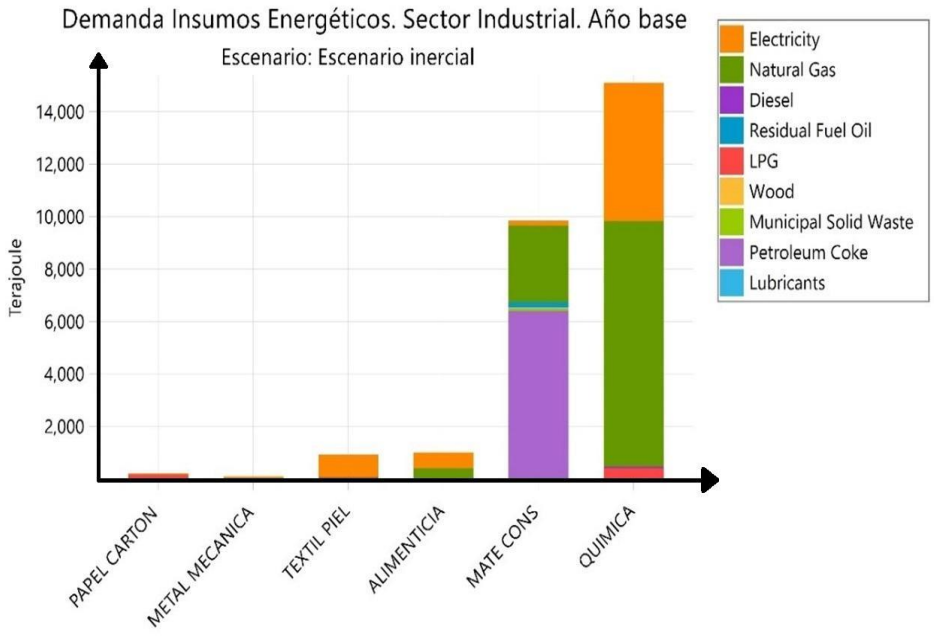


Figura 27. Consumo de insumos energéticos del sector industrial en el año base 2015. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

El consumo de insumos energéticos en el sector industrial (ver Tabla 30) muestra que la industria química y de materiales de construcción son las principales consumidoras. Esta concentración no solo se debe a su escala productiva, sino a la naturaleza de sus procesos, que dependen en gran medida de la electricidad y diversos combustibles fósiles. En contraste, sectores como el alimenticio, textil, papel y cartón presentan demandas menores, con un perfil energético más eléctrico. Este panorama resalta la necesidad de diseñar estrategias diferenciadas: mientras que los sectores de menor consumo pueden liderar la transición energética a través de procesos de electrificación por medio de fuentes renovables y mejoras en eficiencia, los sectores intensivos requieren transformaciones tecnológicas profundas y políticas específicas que permitan reducir de forma progresiva sus emisiones y consumo energético sin afectar su competitividad.

Tabla 30. Consumo de insumos energéticos para la demanda energética [TJ] del sector manufacturero, año base 2015

Insumos energéticos	Química	Materiales de la construcción	Alimenticia	Textil-piel	Metal mecánico	Papel-cartón	TOTAL
Electricidad	5259	160	583	821	76	30	**6,930**
Gas natural	9378	2928	419	37	14	-	**12,775**
Diésel	61	0.4	0.1	1	0.02	0.1	**62**
Combustóleo	-	220	-	-	-	-	**220**
Gas LP	410	0.4	1	56	-	167	**634**
Leña/aserrín	-	13	-	-	-	-	**13**
Llantas	-	107	-	-	-	-	**107**
Coque de petróleo	-	6405	-	-	-	-	**6,406**
Lubricantes	-	6	-	-	-	-	**6**
TOTAL	**15107**	**9842**	**1003**	**915**	**90**	**197**	**27154**

El consumo energético industrial revela una fuerte dependencia de combustibles fósiles, principalmente gas natural, que representa el 47% del consumo total (12,775 TJ), y coque de petróleo, con cerca del 24%. Además, el uso de electricidad equivale a alrededor del 26% del consumo total. La estructura energética de este sector es dominada en un 97% por estas tres fuentes.

La alta participación de combustibles fósiles genera emisiones GEI, principalmente dióxido de carbono (CO_2), contribuyendo al cambio climático global. En particular, el coque

de petróleo, ampliamente utilizado en la industria de materiales de construcción, es un combustible con alta intensidad contaminante (IPCC, 2015, 2021). Estas emisiones también afectan la calidad del aire local, lo que puede impactar la salud humana (WHO, 2024).

El consumo eléctrico, es importante en sectores como químico y textil y tiene un impacto ambiental ligado a la matriz energética nacional. En México, la generación eléctrica aún depende en gran medida de combustibles fósiles, aunque la participación de renovables está creciendo (SENER, 2023). La transición hacia fuentes limpias es clave para reducir la huella ambiental del sector industrial (IEA, 2024a).

5.3.4.3. Proyección de la demanda en la manufactura en el escenario inercial. Periodo 2015-2050

A partir de las tasas de crecimiento industrial estimadas, se proyectó la evolución de la demanda energética de cada subsector industrial desde el año base hasta el año 2050. La Figura 28 presenta la demanda proyectada bajo el escenario BAU, mostrando las tendencias esperadas si no se implementan cambios significativos en políticas o tecnologías energéticas.

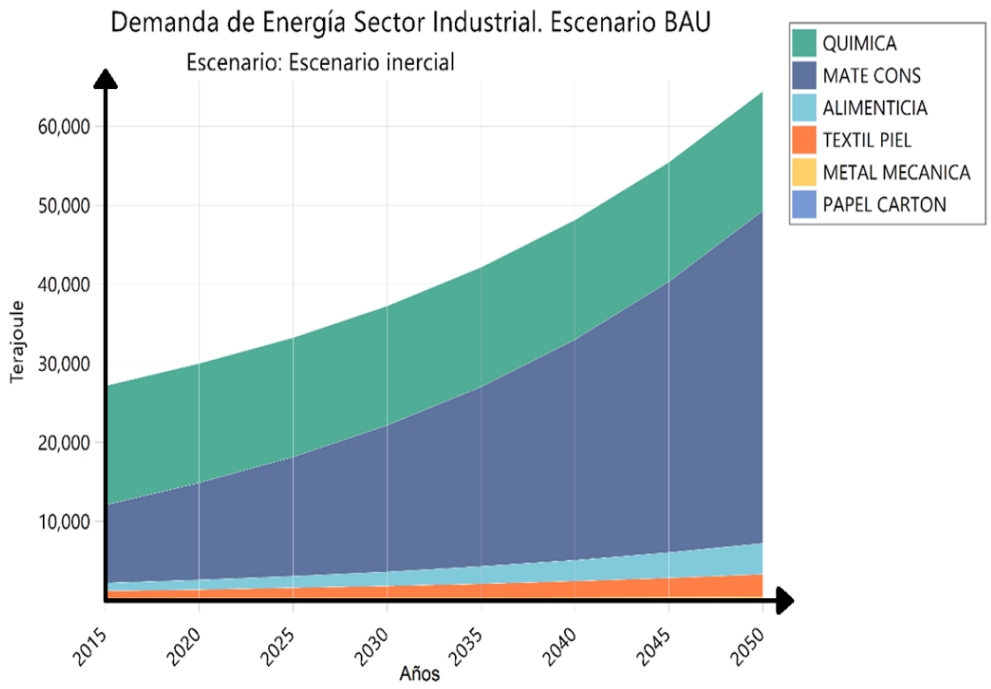


Figura 28. Demanda energética de la industria manufacturera en el escenario inercial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

Como se muestra en la Figura 28, la industria química (color verde) y la de papel-cartón (color azul claro) mantienen una demanda energética constante a lo largo del periodo proyectado, lo cual se explica por su tasa de crecimiento igual a cero. En contraste, la industria de materiales de construcción (color azul oscuro) presenta el mayor incremento en la demanda energética, lo que anticipa una expansión significativa en este sector. Este crecimiento sugiere una futura presión sobre el suministro energético, particularmente si no se implementan medidas de eficiencia o transición tecnológica. Las tasas de crecimiento consideradas para esta proyección se detallan en la Tabla 31.

Tabla 31. Proyección del crecimiento de la demanda energética del sector manufacturero [TJ] en el escenario inercial, periodo 2015-2050

	2015	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2045**	**2050**
Química	15107	15107	15107	15107	15107	15107	15107	15107
Materiales de la construcción	9842	12284	15082	18518	22736	27916	34275	42083
Alimenticia	1003	1220	1483	1802	2190	2662	3236	3933
Textil-piel	915	1075	1263	1484	1744	2050	2409	2830
Metal mecánico	90	106	124	146	172	203	239	281
Papel-cartón	197	197	197	197	197	197	197	197
TOTAL	**27154**	**29988**	**33256**	**37254**	**42147**	**48134**	**55462**	**64432**

La industria química mantiene una demanda energética constante a lo largo de todo el periodo analizado, al igual que la industria de papel-cartón, ambas presentan una tasa de crecimiento nula. Este comportamiento refleja una estabilidad en su producción o la ausencia de expectativas de expansión significativa. En contraste, la industria de materiales de la construcción presenta el crecimiento más alto en la demanda energética, lo que evidencia una expansión del sector. Este aumento puede estar relacionado con el crecimiento urbano o la dinamización del sector inmobiliario en la región y zonas aledañas.

La industria alimenticia también presenta un aumento significativo, mientras que el sector textil-piel mantiene una expansión progresiva. Por su parte, aunque el subsector metalmecánico parte de una base baja, también muestra una tendencia creciente a lo largo del tiempo. El aumento en la industria alimenticia puede estar relacionado con una mayor tecnificación de los procesos de producción, el crecimiento poblacional o el impulso a cadenas de valor agroalimentarias en el valle.

El sector textil-piel, aunque de menor tamaño, también mantiene una trayectoria de expansión. Este crecimiento podría estar vinculado a procesos de reactivación productiva o a la diversificación de productos textiles con valor agregado. Su incremento continuo implica una creciente demanda de electricidad y otros insumos, lo cual abre oportunidades para la mejora en eficiencia energética. En el caso del subsector metalmecánico, si bien parte este tuvo el menor consumo energético, muestra una evolución ascendente. Esta tendencia puede indicar una industrialización asociada a actividades de transformación, maquinaria o manufactura ligera. Con base en la información sobre el consumo energético del sector industrial y tipo de insumo, se procedió a estimar las emisiones GEI asociadas como se muestra en la Figura 29.

Figura 29. Emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la industria manufacturera en el escenario inercial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP.

En el año base, las emisiones totales ascienden a aproximadamente 1.43 millones de toneladas de GEI y para el año 2050 se proyectan en más de 4.13 millones de toneladas, lo que refleja una tendencia ascendente. Este incremento está fuertemente influenciado por el crecimiento del sector de materiales de la construcción, que se convierte en el mayor emisor industrial hacia 2050, seguido por la industria química, cuyas emisiones se mantienen constantes pero elevadas. Otros sectores, como el alimenticio, textil-piel y metalmecánico, aunque con menores volúmenes absolutos, también presentan un crecimiento continuo en sus emisiones. Estos resultados evidencian la necesidad de intervenir con políticas de eficiencia energética y descarbonización sectorial para contener el impacto ambiental del desarrollo industrial proyectado.

5.3.4.4. Proyección de la demanda en el escenario de implementación de sistemas de cogeneración en las industrias química y de materiales de la construcción. Periodo 2015-2050

La incorporación de sistemas de cogeneración representa una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos en la industria. Al reutilizar el calor residual generado durante el proceso de producción, estos sistemas permiten reducir la dependencia de fuentes externas de energía. En particular, los sectores de la industria química y de materiales de construcción pueden beneficiarse de esta tecnología. La Figura 30 muestra un gráfico que ilustra la evolución de la demanda energética industrial tras la implementación de sistemas de cogeneración en ambas.

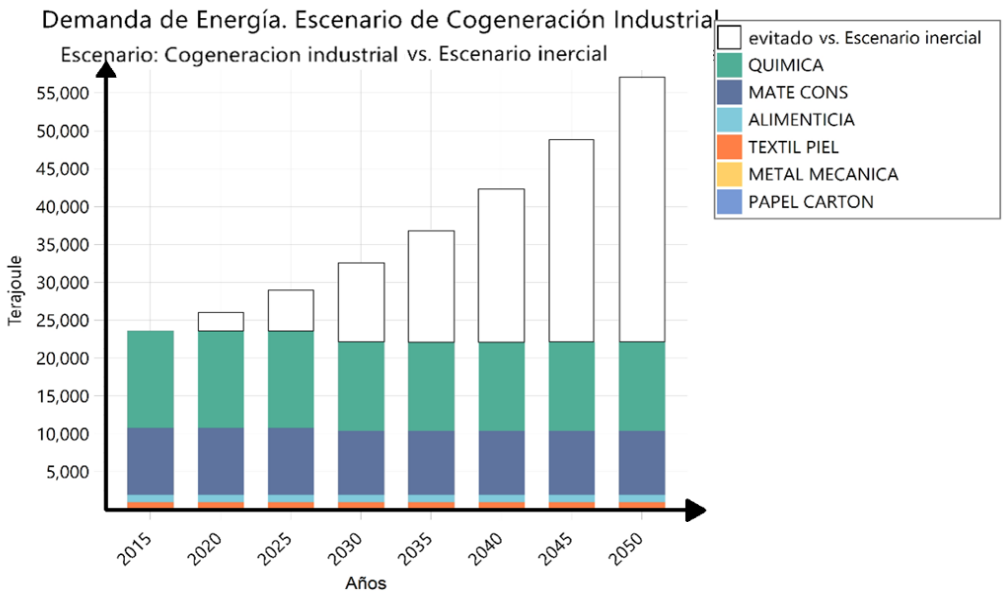


Figura 30. Demanda energética en el escenario de implementación de sistemas de cogeneración, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP.

En los resultados obtenidos se observa una tendencia creciente en las reducciones acumuladas respecto al escenario inercial, alcanzando un valor de 42,471 TJ para el año 2050. Este comportamiento refleja el impacto positivo de las estrategias de mitigación en el sector industrial. La rama química destaca como la principal, con una participación constante de 15,107 TJ hasta 2025 y una reducción de 14,055 TJ a partir de 2030, manteniéndose en ese

nivel hasta el final del periodo analizado. Por otro lado, la rama de materiales de construcción muestra una disminución desde 9,842 TJ en 2015 a 5,701 en 2030, estabilizándose en ese valor hacia 2050. Las demás presentan valores constantes a lo largo del tiempo, lo que sugiere una proyección conservadora o limitada en cuanto a cambios tecnológicos o estructurales. En la Tabla 32 se presentan los resultados obtenidos, donde se muestra la demanda total proyectada tras la implementación del sistema de cogeneración.

Tabla 32. Proyección del crecimiento de la demanda energética [TJ] en el escenario de implementación de sistemas de cogeneración para la industria manufacturera, período 2015-2050

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Potencial de mitigación	-	6539	9807	15294	20186	26174	33502	42471
Química	15107	15107	15107	14055	14055	14055	14055	14055
Materiales de la construcción	9842	6137	6137	5701	5701	5701	5701	5701
Alimenticia	1003	1003	1003	1003	1003	1003	1003	1003
Textil-piel	915	915	915	915	915	915	915	915
Metal mecánico	90	90	90	90	90	90	90	90
Papel-cartón	197	197	197	197	197	197	197	197
TOTAL	**27154**	**23449**	**23449**	**21961**	**21961**	**21961**	**21961**	**21961**

La comparación entre el escenario de mitigación y el BAU revela diferencias en la evolución de la demanda energética. Mientras que en el escenario BAU se observa un crecimiento continuo en todas las ramas industriales, el escenario de mitigación proyecta una contención considerable, limitando el consumo del sector de materiales de construcción a 5,701 TJ a partir de 2030 y en la industria química, que se mantiene constante en 15,107 TJ desde 2015 hasta 2050 en el escenario BAU, el escenario de mitigación proyecta una disminución progresiva, alcanzando 14,055 TJ a partir de 2030 y manteniéndose en ese nivel hasta 2050. Esta diferencia representa un ahorro energético.

De manera similar, las ramas alimenticia, textil y piel, y metalmecánica presentan un aumento progresivo en el escenario BAU, mientras que en el escenario de mitigación sus consumos se mantienen estables, reflejando el impacto directo de políticas de eficiencia energética y sustitución tecnológica. El consumo total acumulado en el escenario BAU alcanza los 64,432 TJ en 2050, mientras que el escenario de mitigación mostró una reducción de 42,471 TJ evitados. Estos resultados permiten concluir que, sin la implementación de

medidas de mitigación, el consumo energético industrial crecería de forma insostenible y que la aplicación sistemática de estrategias sectoriales es esencial para contener dicho crecimiento.

5.3.5. Demanda energética total del valle del mezquital, en el año 2015

5.3.5.1. Proyección de la demanda energética total por cada sector. Año base 2015

Se presenta la demanda total de energía del VM, desglosada en los cuatro sectores analizados: residencial, industrial, agrícola y servicios públicos, para el año base 2015. La demanda total energética del VM en dicho año fue de 32,157 TJ. Dentro de este total, el sector industrial se destacó como el principal consumidor, con un consumo de 27,154 TJ, seguido por el sector residencial con 3,573 TJ, los servicios públicos con 1,282 TJ y, finalmente, el sector agrícola con 147 TJ (ver Figura 31).

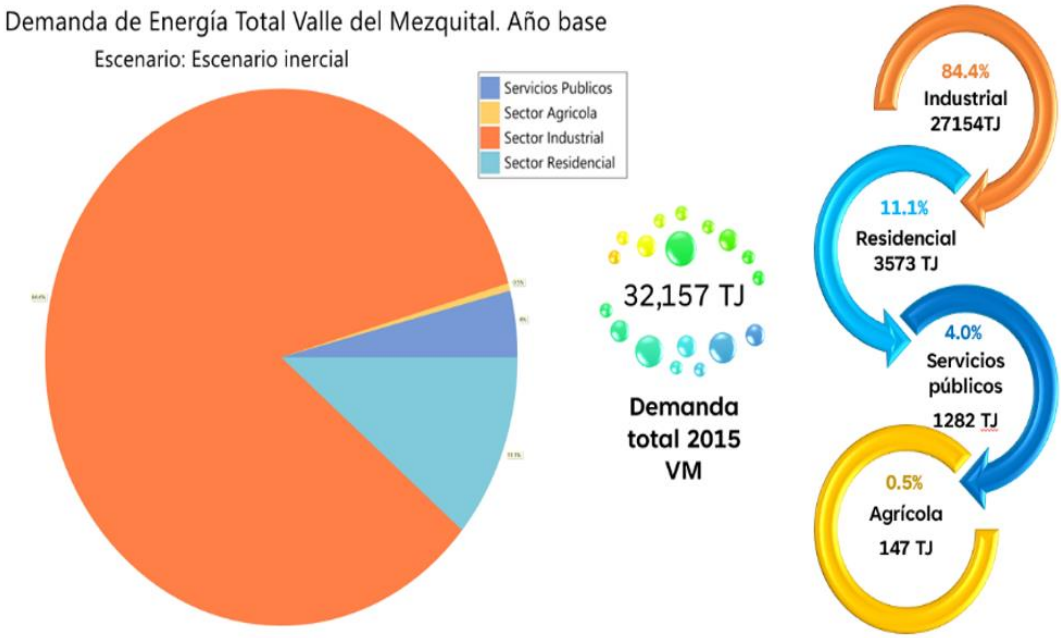


Figura 31. Demanda energética total del Valle del Mezquital, año base 2015. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP.

La Figura 31 resalta la participación del sector industrial en color naranja, representando el 84.4% del total. Le sigue el sector residencial, en azul claro, con un 11.1%. Los servicios públicos aparecen en azul oscuro, con un 4%, mientras que el sector agrícola, representado en amarillo, constituye solo el 0.5% restante.

5.3.5.2. Demanda sectorial total por tipo de insumo energético. Año base 2015

Entre los insumos energéticos más utilizados se encuentran la electricidad, el gas natural y el gas LP. Como se muestra en la Figura 32, el sector industrial es el principal consumidor energético, destacando el uso de electricidad y gas natural como sus principales fuentes, seguidos por el coque de petróleo, gas LP y combustóleo. En el sector residencial, el consumo energético se distribuye principalmente entre electricidad, gas LP y el uso tradicional de madera-leña. Por su parte, tanto el sector agrícola como el de servicios públicos dependen exclusivamente del suministro eléctrico para cubrir sus necesidades energéticas.

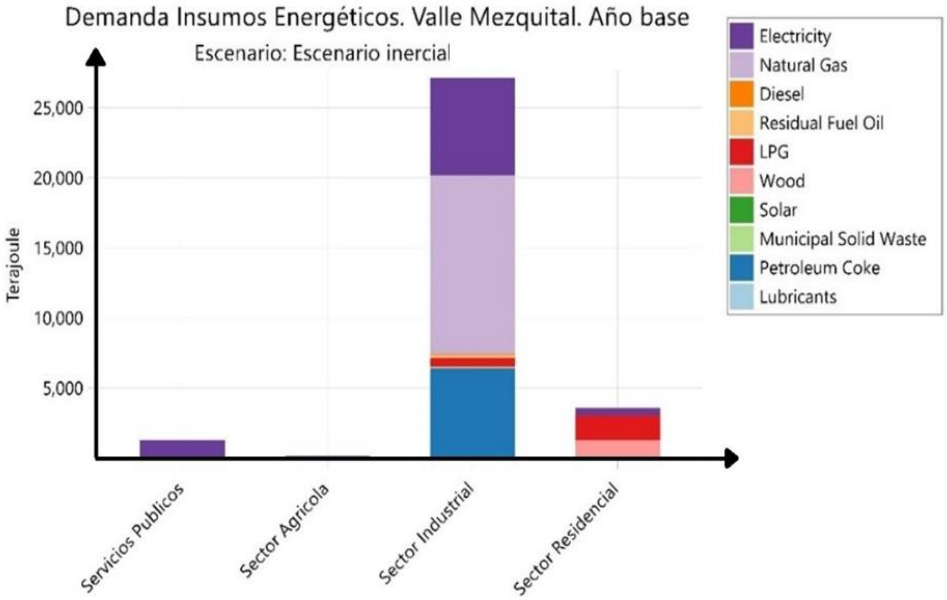


Figura 32. Consumo de insumos energéticos en la demanda total por sector en el año base 2015. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

Entre los combustibles más consumidos, destaca el gas natural con 12,775 TJ, lo que representa aproximadamente el 49% del total. Le sigue la electricidad, con 8,866 TJ, equivalente al 28% del consumo total, y en tercer lugar el coque de petróleo, con 6,404 TJ,

que representa alrededor del 20%. El conjunto de los demás combustibles incluidos el gas LP, combustóleo, leña, entre otros que aportan únicamente el 3% restante del consumo total, como se puede apreciar en la Figura 33.

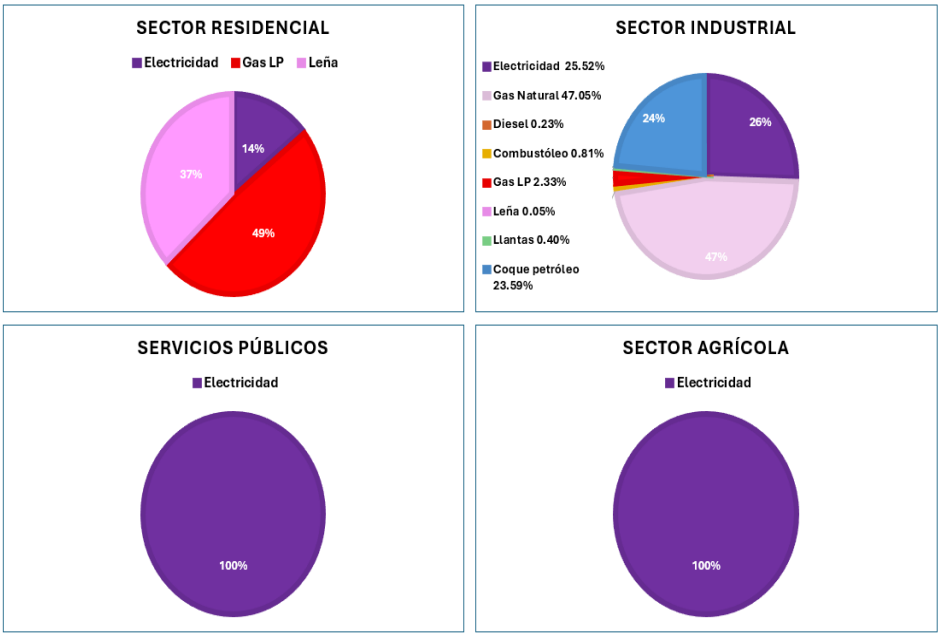


Figura 33. Porcentajes de consumo de insumos energéticos por sector en el año base 2015. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

El análisis por sector de la demanda energética revela una alta concentración del consumo en el sector industrial. Este sector destaca por una amplia diversidad de insumos energéticos, siendo el gas natural y la electricidad sus principales fuentes, seguidos por coque de petróleo, entre otros, lo que indica una fuerte dependencia de combustibles fósiles. En contraste, el sector residencial, muestra una matriz energética menos diversificada, predominando el gas LP, seguido por leña/aserrín, además de la electricidad. Este patrón sugiere una coexistencia entre fuentes modernas y tradicionales, probablemente relacionada con diferencias socioeconómicas y acceso a servicios energéticos. Por su parte, el sector agrícola y de servicios públicos presentan consumos menores y son abastecidos exclusivamente por electricidad. Esta dependencia exclusiva del suministro eléctrico en estos sectores podría facilitar la integración de energías renovables, como la solar fotovoltaica, en futuras estrategias de transición energética. En la Tabla 33 se detalla el consumo de insumos energéticos correspondiente a la demanda de los sectores analizados.

Tabla 33. Consumo de insumos energéticos para la demanda energética total sectorial [TJ], año base 2015

Insumo energético	Sector residencial	Sector industrial	Sector agrícola	Servicios públicos	TOTAL
Electricidad	506	6930	147	1282	**8866**
Gas natural	-	12775	-	-	**12775**
Diésel	-	62	-	-	**62**
Combustóleo	-	220	-	-	**220**
Gas LP	1743	634	-	-	**2377**
Leña/aserrín	1324	13	-	-	**1337**
Llantas	-	107	-	-	**107**
Coque de petróleo	-	6406	-	-	**6406**
Lubricantes	-	6	-	-	**6**
TOTAL	**3573**	**27154**	**147**	**1282**	**32157**

El análisis por insumo energético muestra una matriz dominada por el uso de gas natural, electricidad y coque de petróleo. El gas natural se posiciona como la principal fuente de energía, con un consumo total de 12,775 TJ, equivalente al 39.7% de la demanda energética regional, utilizado exclusivamente por el sector industrial. Le sigue la electricidad, con 8,866 TJ (27.6% del total), distribuida entre todos los sectores, siendo el industrial el mayor consumidor (6,930 TJ), seguido de los servicios públicos (1,282 TJ), el sector residencial (506 TJ) y el agrícola (147 TJ). El coque de petróleo, también de uso exclusivo industrial, representa 6,406 TJ (19.9%), consolidándose como el tercer insumo más consumido. En cuanto a los combustibles domésticos, el gas LP (2,377 TJ) y la leña/aserrín (1,337 TJ) destacan principalmente en el sector residencial, reflejando patrones mixtos de modernidad y uso tradicional de biomasa. Otros insumos como el diésel, combustóleo, llantas y lubricantes tienen una participación marginal, limitados al sector industrial. En conjunto, estos datos evidencian una fuerte dependencia de combustibles fósiles, en especial dentro del ámbito industrial, lo que plantea retos significativos para la sostenibilidad y eficiencia energética de la región.

Esta tendencia refleja similitudes con lo ocurrido a nivel nacional en México durante el período comprendido entre 1995 y 2015. En 1995, el gas natural y la electricidad representa el 60.9% del consumo total de energía en el sector industrial del país. Para el año 2015, la participación de estas fuentes de energía experimentó un aumento, alcanzando el 71.4% del

total. Este incremento significativo se debió en gran medida a la iniciativa adoptada por diversas industrias del cemento, las cuales iniciaron un proceso de sustitución del combustóleo por otras fuentes energéticas, como el gas natural, el coque de petróleo, entre otras (CEPAL, 2018).

Belda-González (2018) realizó un análisis similar para la cuenca del río Jordán, considerando la demanda de seis sectores en el año 2015. Los consumos en TJ y sus respectivos porcentajes fueron los siguientes: Industria: 806 TJ (15%), Transporte: 2,613 TJ (47%), Residencial: 1,302 TJ (23%), Comercio y Servicios Públicos: 395 TJ (7%), Agricultura: 207 TJ (4%), Otros: 224 TJ (4%).

Al comparar estos resultados con los obtenidos del valle, se puede apreciar que la demanda residencial en el VM es el doble de la registrada en la cuenca, lo que podría indicar una menor densidad poblacional en esta última. En relación con la mayor demanda sectorial, en el VM fue la industria, mientras que en la cuenca fue el transporte. Este hallazgo sugiere que el VM cuenta con un desarrollo industrial más avanzado, mientras que en la cuenca podría existir una considerable distancia entre poblaciones o que su actividad principal dependa en mayor medida del transporte. Por otro lado, los resultados más similares se observan en el sector agrícola, que en ambos análisis se posiciona como el de menor demanda

5.3.5.3. Proyección de la demanda total sectorial en el escenario inercial. Periodo 2015-2050

Las tasas de crecimiento proyectadas bajo el escenario BAU, permiten identificar las tendencias de la demanda energética a lo largo del período de análisis. Los datos muestran que cada sector posee un ritmo de crecimiento particular, reflejando sus características específicas de consumo energético. En la Figura 34 se presenta el gráfico correspondiente, que ilustra de manera clara las tendencias de crecimiento sectorial, facilitando la comparación y el análisis de los comportamientos previstos para cada sector.

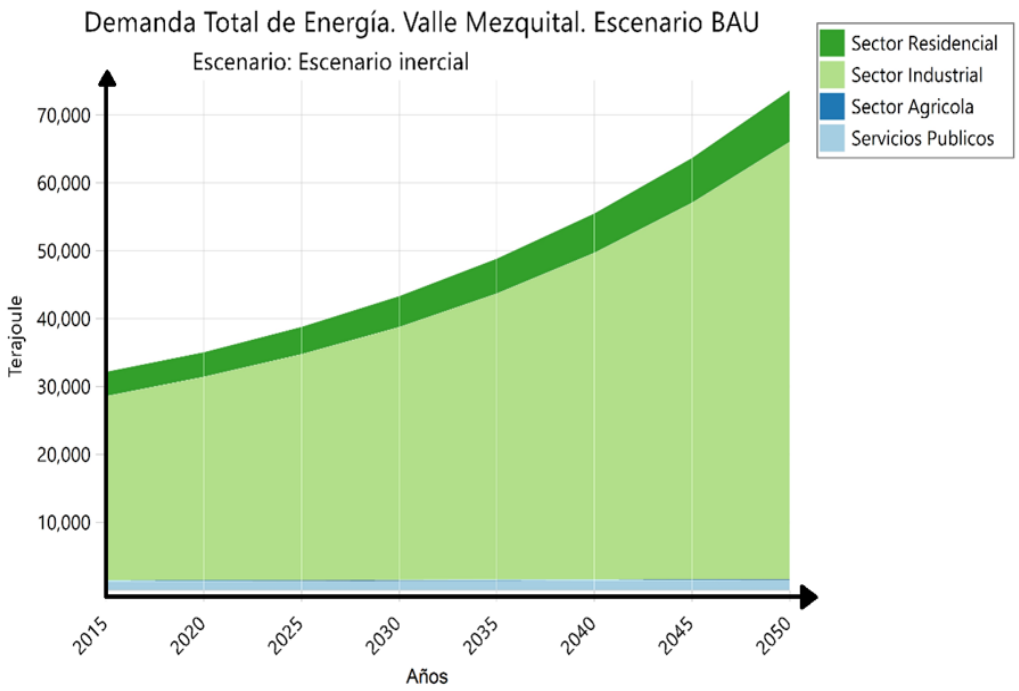


Figura 34. Demanda energética total por sector en el escenario inercial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

La figura 34 muestra la evolución proyectada de la demanda donde se observa un crecimiento en el consumo energético, que pasa de aproximadamente 32,000 a más de 70,000 TJ. Este incremento está impulsado principalmente por el sector industrial (color verde claro), que representa la mayor proporción del consumo total y cuya participación crece de forma significativa a lo largo del tiempo. El sector residencial (verde obscuro) también muestra un aumento gradual, aunque en menor medida, mientras que los sectores agrícolas (azul marino) y de servicios públicos (azul cielo) mantienen una participación marginal. Esta tendencia indica que, de mantenerse las condiciones actuales, la región enfrentará un aumento importante en su demanda energética, con implicaciones relevantes para la planeación de infraestructura y políticas de sostenibilidad. En la Tabla 34 se muestra el incremento quinquenal de cada sector desde 2015 a 2050.

Tabla 34. Proyección del crecimiento de la demanda energética total [TJ] del Valle del Mezquital en el escenario inercial, periodo 2015-2050

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Sector residencial	3573	3638	4069	4567	5146	5825	6629	7588
Sector industrial	27154	29988	33256	37254	42147	48134	55462	64432
Sector agrícola	147	147	147	147	147	147	147	147
Servicios públicos	1282	1307	1333	1359	1386	1414	1442	1471
TOTAL	**32157**	**35080**	**38806**	**43328**	**48827**	**55521**	**63680**	**73638**

Los resultados indican un incremento en el consumo total desde 32,157 TJ en 2015 hasta 73,638 TJ en 2050. Todos los sectores presentan un aumento en sus consumos, destacándose el sector industrial como el principal, también se observa un crecimiento importante en los sectores residencial y de servicios públicos. El sector agrícola, con una contribución menor, mantiene un consumo constante a lo largo del tiempo. Estos resultados reflejan una tendencia generalizada de aumento en la demanda energética, asociada a procesos de desarrollo económico, industrialización y urbanización.

En relación con las emisiones de CO_2, se identificó que únicamente los sectores residencial e industrial son responsables de su generación. Durante el periodo 2015-2020, el incremento fue del 12.2%, aumentando progresivamente en cada quinquenio, hasta alcanzar un crecimiento del 18.2% entre 2045 y 2050 (véase Figura 35). Este comportamiento probablemente responde a la continua dependencia de fuentes de energía no renovables y a la insuficiente implementación de prácticas sostenibles en dichos sectores.

Por su parte, los demás GEI también presentan una tendencia de crecimiento a lo largo del periodo analizado. El monóxido de carbono aumenta de 2,457 t en 2015 a 5,617 t en 2050, mientras que los óxidos de nitrógeno experimentan un incremento más significativo, pasando de 3,618 a 9,692 t en el mismo intervalo. El metano también registra un aumento, de 213 a 480 t. Asimismo, los compuestos orgánicos no volátiles, el óxido nitroso y el carbón negro muestran incrementos, aunque en menor proporción en comparación con los otros gases mencionados (ver Figura 36).

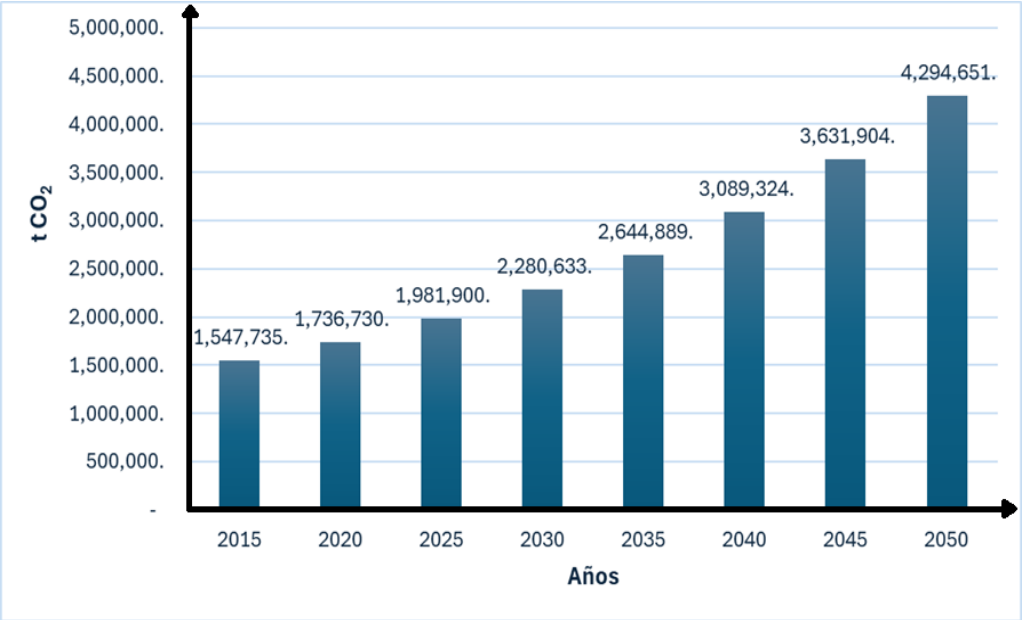


Figura 35. Emisión de dióxido de carbono generadas por la demanda total sectorial en el escenario inercial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

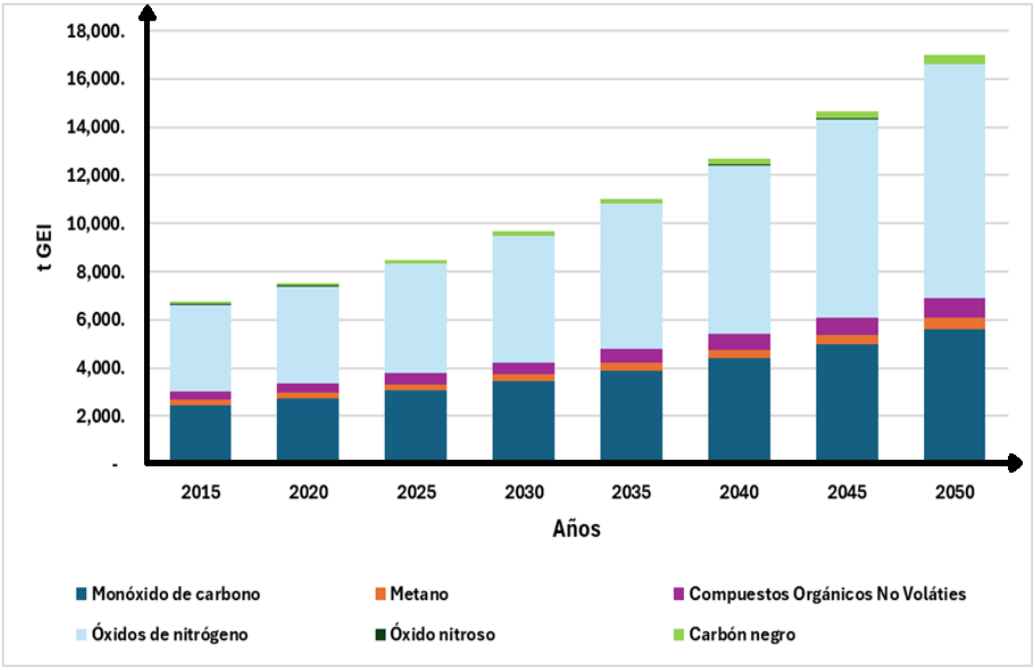


Figura 36. Emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la demanda total sectorial en el escenario inercial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

Estos incrementos sugieren una tendencia preocupante hacia el deterioro de la calidad del aire, lo cual puede tener impactos negativos significativos sobre la salud pública y el medio ambiente. El aumento sostenido de gases como el metano, los óxidos de nitrógeno y el carbón negro refleja, además, una insuficiente transición hacia fuentes de energía limpias y la falta de adopción de prácticas sostenibles en los sectores analizados.

5.4. Sector de la transformación energética

En el año base 2015 el VM contaba con tres industrias correspondientes al sector de la transformación energética: la refinería "Miguel Hidalgo", la termoeléctrica "Francisco Pérez Ríos" y una central de ciclo combinado. Asimismo, esta región mantiene una relación directa con la central hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama, debido tanto a su proximidad geográfica como al suministro de agua residual proveniente de la ZMCM. El análisis se centró en dos áreas principales: la refinación y la generación eléctrica.

5.4.1. Refinería Miguel Hidalgo

La refinería "Miguel Hidalgo", ubicada en Atitalaquia, inició operaciones en 1976 y continúa en funcionamiento. En 2005, su capacidad promedio de refinación era de 296 miles de barriles diarios (mbd) (Montelongo-Reyes, 2015), cifra que aumentó a 315 mbd para el año 2015. La refinería cuenta con diversos procesos destacados, tales como reformación catalítica, hidro desulfuración, alquilación y coquización, entre otros. Su principal suministro de combustible para la refinación proviene del gas natural, obtenido en Poza Rica, y del combustóleo pesado generado en la misma planta (Otazo-Sánchez et al., 2013) (Montelongo-Reyes, 2015). En la Figura 37 se presenta el gráfico de la producción de la refinería durante el periodo 2015-2050.

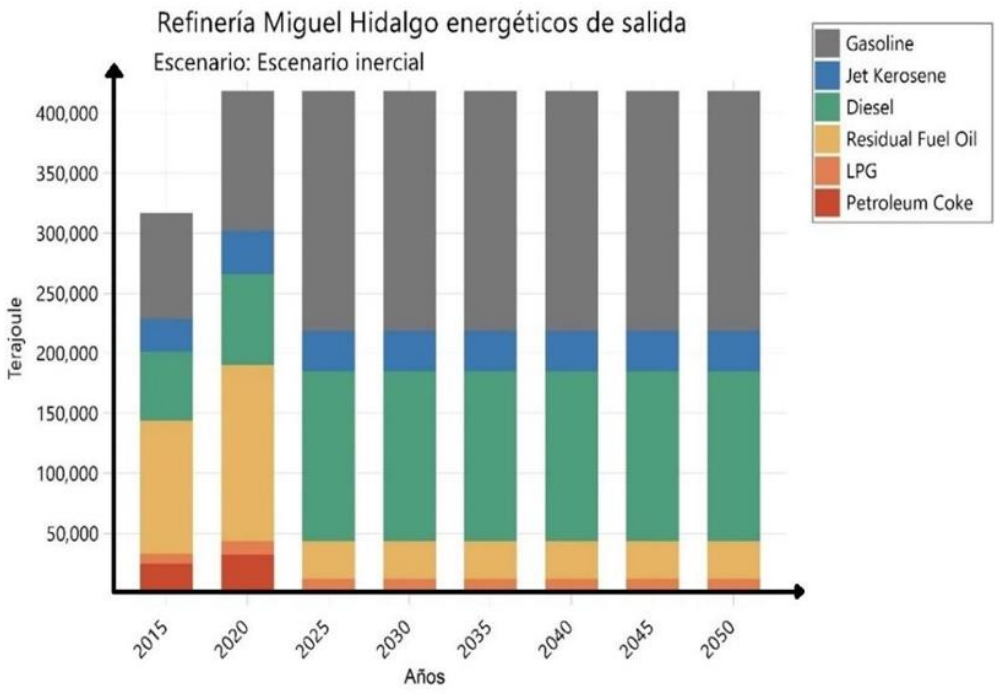


Figura 37. Producción estimada de la refinería Miguel Hidalgo durante el periodo 2015 a 2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

En el escenario inercial, la Refinería Miguel Hidalgo muestra una estabilización en la producción total de energéticos a partir del año 2020, con un valor cercano a los 400,000 TJ anuales. Los productos predominantes en la salida energética son la gasolina y el diésel, cuya participación se mantiene constante a lo largo del periodo 2020-2050. En contraste, se observa una reducción en la producción de combustóleo después de 2015, lo cual podría estar asociado a una disminución en la demanda o a cambios regulatorios orientados a reducir el uso de combustibles más contaminantes. La producción de otros energéticos como gas LP, coque de petróleo y turbosina permanece estable, aunque con una participación proporcionalmente menor. Estos resultados reflejan una limitada transformación en la estructura de producción energética de la refinería, lo que podría implicar desafíos frente a escenarios de transición energética. En la Tabla 35 se muestra la producción de cada energético a lo largo del periodo analizado.

Tabla 35. Producción estimada de petrolíferos de la refinería Miguel Hidalgo para el escenario inercial, en [TJ], periodo 2015-2050

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gasolina	88298	116565	199826	199826	199826	199826	199826	199826
Queroseno	27120	35802	33304	33304	33304	33304	33304	33304
Diesel	57394	75767	141543	141543	141543	141543	141543	141543
Combustóleo	111214	146818	31502	31502	31502	31502	31502	31502
Gas LP	8199	10824	10824	10824	10824	10824	10824	10824
Coque de petróleo	24913	32888	1665	1665	1665	1665	1665	1665
TOTAL	**317138**	**418664**	**418664**	**418664**	**418664**	**418664**	**418664**	**418664**

En términos porcentuales, los resultados del escenario inercial muestran que la gasolina incrementa su participación del 27.8 % en 2015 al 47.7 % a partir de 2025, mientras que el diésel crece del 18.1 % al 33.8 % en el mismo periodo. En contraste, el combustóleo reduce drásticamente su proporción, pasando del 35.1 % en 2015 a solo 7.5 % desde 2025 en adelante, y el coque de petróleo disminuye del 7.9 % al 0.4 %. Por su parte, productos como el queroseno y el gas LP mantienen participaciones menores pero estables, cercanas al 7.9 % y 2.6 %, respectivamente. A pesar del cambio en la composición de productos, la producción total permanece constante en 418,664 TJ desde 2020, lo cual refleja una transición parcial hacia energéticos de mayor demanda o menor impacto ambiental, aunque sin una expansión adicional de la capacidad energética en el periodo analizado.

5.4.2. Generación eléctrica del área de estudio

El VM y sus alrededores cuentan con una infraestructura energética diversa y en evolución, donde destacan importantes plantas generadoras de electricidad tanto térmicas como hidroeléctricas. La central termoeléctrica Francisco Pérez Ríos, una de las más grandes del país, y la hidroeléctrica “Ing. Fernando Hiriart Balderrama” (“Presa Zimapán”) son piezas clave en la matriz energética estatal. Además, la región se encuentra en un proceso de modernización y diversificación energética, con la incorporación de nuevas tecnologías y fuentes renovables, encaminadas a mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental de la generación eléctrica.

La central termoeléctrica Francisco Pérez Ríos, situada en Tula de Allende, es la segunda planta generadora de energía más grande de México, con una capacidad instalada total de 2,095 MW. Su operación se divide en dos procesos principales: el proceso convencional, compuesto por cinco unidades generadoras que suman 1,606 MW, y el proceso de ciclo combinado, que incluye seis unidades con una capacidad conjunta de 489 MW.

Por otra parte, la central hidroeléctrica “Ing. Fernando Hiriart Balderrama”, conocida también como “Presa Zimapán”, fue inaugurada en 1995. Esta planta aprovecha el 95 % de las aguas residuales de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMCM) para generar energía, con una capacidad efectiva de 292 MW. Está equipada con dos turbinas Pelton y cuenta con una cortina de 203 metros de altura, que permite el almacenamiento de 1,500 millones de metros cúbicos de agua.

En un futuro cercano, se prevé la incorporación de la Central de Ciclo Combinado Tula II, la cual reemplazará a la primera central de ciclo combinado y contribuirá a la reducción de emisiones mediante el uso de tecnología más limpia y eficiente. Se espera que esta nueva planta inicie operaciones en abril de 2024. Adicionalmente, la Unidad de Generación No. 5 de la termoeléctrica Francisco Pérez Ríos permanecerá como reserva estratégica, activándose únicamente en situaciones de emergencia extrema.

En 2015, la generación eléctrica en el VM dependía principalmente de una matriz energética limitada, compuesta por gas natural y combustóleo. Sin embargo, en los años siguientes se observó un proceso de diversificación energética en la región, con la incorporación de fuentes renovables como la energía solar y eólica. Este cambio permitió también una reducción progresiva en el uso de combustibles altamente contaminantes, contribuyendo a una generación eléctrica más sostenible.

La Figura 38 presenta el escenario inercial para la generación eléctrica, elaborado a partir de los permisos de generación reportados por la Comisión Reguladora de Energía (CRE). Esta figura ilustra el proceso de diversificación energética en el valle, así como las proyecciones de crecimiento correspondientes, además de la evolución en la matriz energética de la región.

En 2015, el consumo de energía para generación eléctrica fue de 36,661 TJ, dominado por combustibles fósiles como el combustóleo (46.0 %) y el gas natural (39.8 %). Para 2020, el consumo total se elevó hasta 69,030 TJ, con un incremento en el uso de combustóleo, que alcanzó el 51.3 % del total, convirtiéndose en la principal fuente de energía en ese año. Sin embargo, a partir de 2025, se observa una disminución constante en el uso de combustóleo, que cae al 18.9 % en 2025 y se reduce aún más al 18.9 % en 2050. En contraste, el gas natural incrementa su participación, alcanzando el 48.3 % del total en 2025 y manteniéndose como la fuente predominante hasta 2050, con un 48.3 % de participación ese año (ver Tabla 36).

Tabla 36. Generación eléctrica según energético principal utilizado, [TJ], periodo 2015–2050.

	2015	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2045**	**2050**
Gas natural	14608	12436	32312	31508	31508	29653	28167	26911
Combustóleo	16869	35396	12649	12334	12334	11608	11026	10535
Eólica	-	-	3287	3205	3205	3017	2865	2738
Solar	-	10319	10580	10317	10317	9710	9223	8812
Hidro	5184	10878	8054	7853	7853	7391	7020	6707
TOTAL	**36661**	**69030**	**66882**	**65217**	**65217**	**61378**	**58302**	**55702**

Durante el periodo 2015-2020, el consumo de gas natural experimentó una disminución, asociada con el desmantelamiento de la antigua central de ciclo combinado. No obstante, a partir de 2025 se observa un repunte, alcanzando su punto máximo ese mismo año, lo cual puede atribuirse a la entrada en operación de la central de ciclo combinado Tula II. Posteriormente, el consumo vuelve a decrecer gradualmente, lo que sugiere una pérdida progresiva en la capacidad de generación de la central, posiblemente derivada del desgaste operativo acumulado.

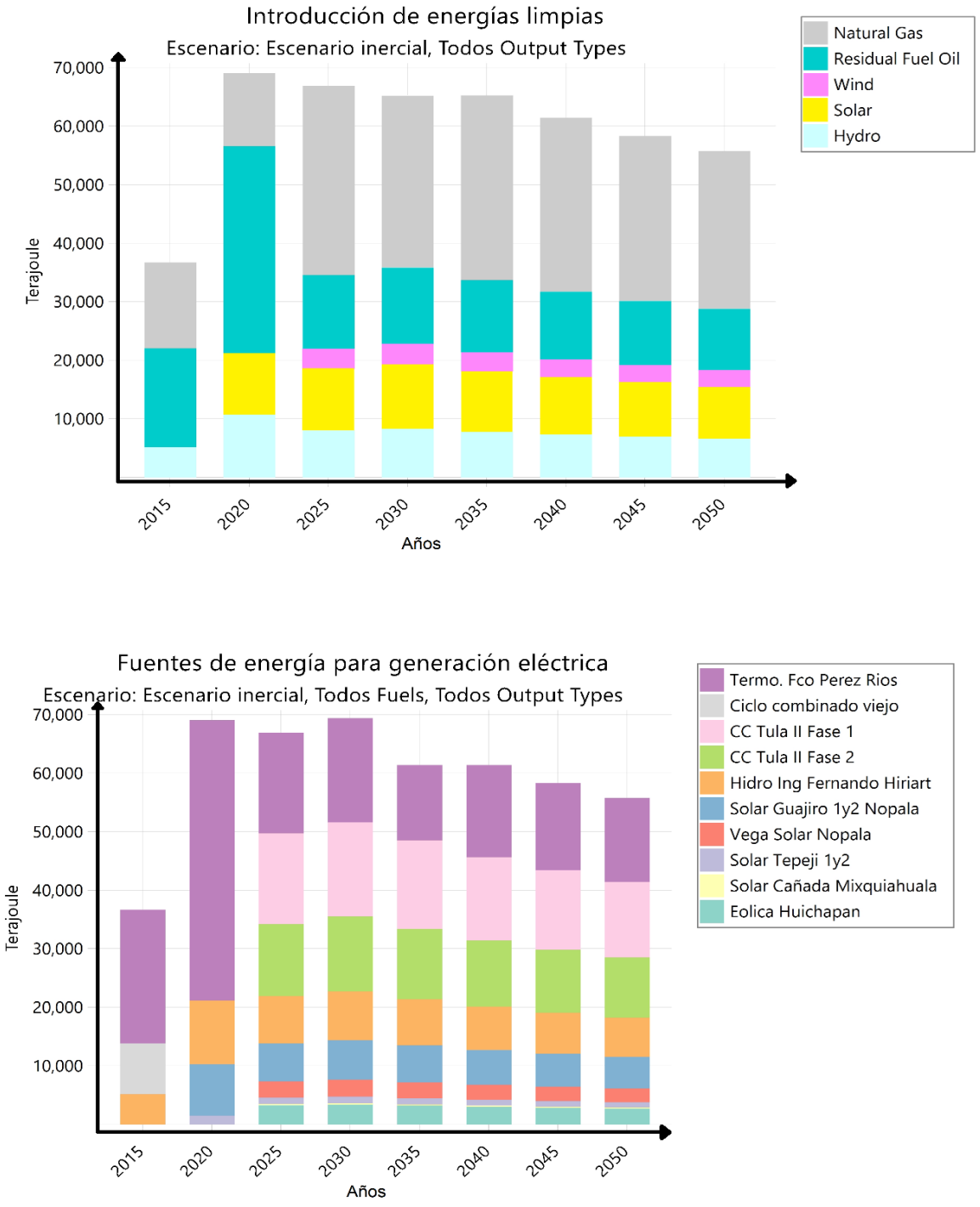


Figura 38. Proyección de generación eléctrica en el Valle del Mezquital, durante el periodo 2015–2050, según tipo de energético (A) y proceso (B). Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

En contraste, el consumo de combustóleo alcanzó su valor más alto en 2020, año en que la central termoeléctrica Francisco Pérez Ríos aún se encontraba en operación plena y constituía la principal fuente de generación eléctrica. A partir de 2025, el uso de este combustible disminuye, en paralelo con la puesta en marcha de Tula II, que asume el rol de fuente principal de generación. En este escenario, únicamente la Unidad 5 de la termoeléctrica permanece como reserva fría, lo cual explica la marcada reducción en la demanda de combustóleo a partir de dicho año.

A partir de 2020, la energía solar representa el 14.9 % del total de generación del valle. En conjunto, las tres fuentes renovables (hidroeléctrica, solar y eólica) suman el 29.4 % de la generación total en 2025 y muestran una estabilidad relativa a lo largo del periodo proyectado, alcanzando un 29.6 % en 2050. En contraste, a nivel nacional, la participación de fuentes renovables ha mostrado una dinámica más acelerada; para 2025 se espera que las energías renovables superen el 40 % de la matriz energética total, impulsadas por políticas públicas más robustas y mayores inversiones en tecnologías limpias (CFE, 2023) (Urbano-Juárez, 2023) (Villavicencio, 2020). Esta diferencia evidencia que el valle presenta un ritmo más lento de diversificación energética comparado con la media nacional, subrayando la necesidad de fortalecer estrategias locales que aceleren la incorporación de energías renovables en la región.

Aunque la participación de las fuentes renovables en la matriz energética del valle ha aumentado gradualmente desde 2020, las centrales térmicas mantienen su predominio, aportando más del 70 % de la generación eléctrica debido a su infraestructura consolidada y capacidad para producir energía de manera continua, esencial para cubrir la demanda local. Sin embargo, como señalan Zhao et al. (2024), esta dependencia de plantas térmicas implica un mayor consumo de agua, mientras que el manejo del recurso hídrico requiere a su vez un alto consumo energético, configurando una interdependencia crítica entre ambos sectores. Esta relación se ve intensificada por el cambio climático, que amenaza tanto la disponibilidad hídrica como la estabilidad de las infraestructuras energéticas. En este contexto, resulta fundamental incorporar los ODS en las políticas públicas, especialmente los ODS 6 y 7, para avanzar hacia una gestión integrada y resiliente del nexo agua-energía, que permita equilibrar la necesidad de suministro energético confiable con la sostenibilidad ambiental.

En contraste, aunque las fuentes renovables ofrecen ventajas ambientales y menores costos operativos a largo plazo, presentan desafíos asociados a su intermitencia y menor densidad energética, dado que dependen de condiciones climáticas variables que pueden limitar su capacidad efectiva. Esta variabilidad obliga a contar con sistemas de respaldo, usualmente proporcionados por centrales térmicas, para garantizar la continuidad del suministro (IEA, 2024b; SENER, 2023). Por ello, la transición energética en la región no debe centrarse únicamente en aumentar la capacidad instalada de energías limpias, sino también en impulsar el desarrollo de tecnologías de almacenamiento y sistemas de gestión inteligentes que permitan una integración eficiente de estas fuentes sin comprometer la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico local (Urbano-Juárez, 2023; Palacios, 2024).

La diversificación de la matriz energética hacia fuentes sostenibles es reconocida como una necesidad estratégica para México, pero su implementación efectiva requiere reformas estructurales y un incremento sustancial en la inversión tanto pública como privada (Martínez-López, 2024). No obstante, la persistente falta de certeza regulatoria, sumada al predominio de las centrales térmicas en la generación eléctrica, limita el ritmo de avance hacia un sistema más limpio y eficiente (Hernández, 2020). Estos factores reflejan que la transición energética en el país continúa siendo un proceso parcial y gradual, condicionado por barreras institucionales y estructurales que deben superarse para cumplir con los compromisos climáticos nacionales e internacionales.

5.4.3. Emisiones del sector de la transformación

A continuación, se presentan las tendencias de diversos contaminantes atmosféricos emitidos por el sector de la transformación energética durante el periodo 2015-2050. Los datos muestran un incremento hasta el año 2020, seguido de una reducción gradual en las décadas posteriores, lo que sugiere un efecto positivo asociado a la incorporación progresiva de tecnologías limpias orientadas a la mitigación de impactos ambientales (ver Figura 39).

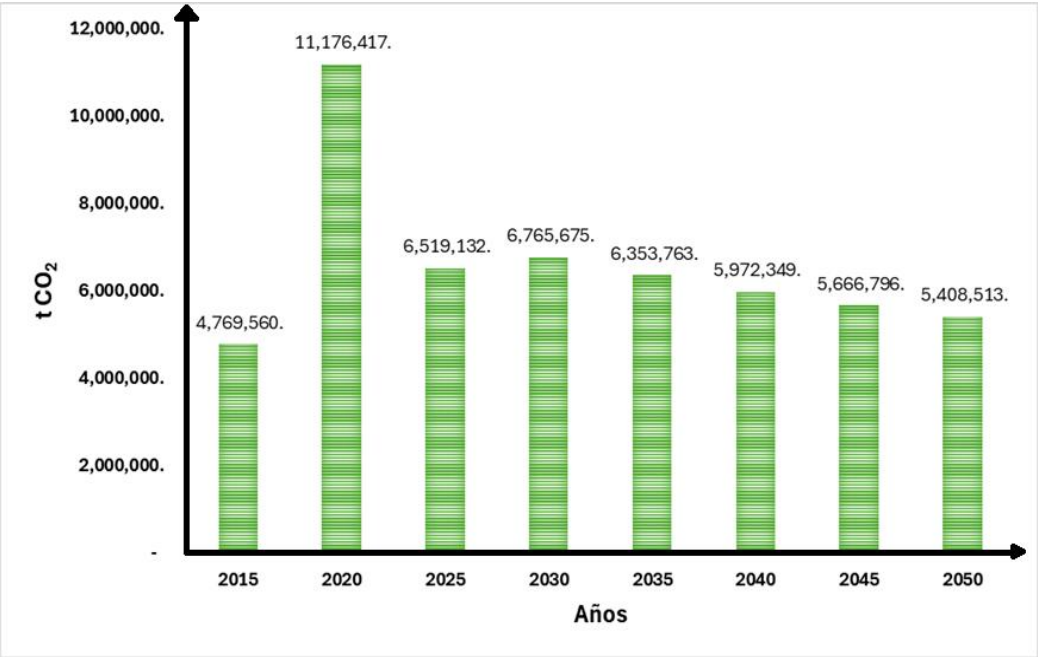


Figura 39. Emisiones de dióxido de carbono generadas por el sector de la transformación energética en el escenario inercial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

Las proyecciones de emisiones de dióxido de carbono tienen un incremento en la primera parte del periodo analizado, pasando de 4,769,560 t en 2015 a 11,176,417 t en 2020. Este crecimiento podría estar relacionado con la operación intensiva de la central termoeléctrica durante esos años. Posteriormente, las emisiones disminuyen significativamente a 6,519,132 t en 2025 y se mantienen relativamente estables entre 6.3 y 6.7 millones de toneladas hasta 2035. Esta estabilización sugiere una reducción en la capacidad operativa de la termoeléctrica, así como una mayor participación de fuentes de energía limpias en la generación eléctrica. A partir de 2035, se observa una tendencia descendente, alcanzando las 5,408,513 t en 2050, lo que refleja avances en la eficiencia energética del sector.

Las demás emisiones siguen un patrón similar al del dióxido de carbono, con un crecimiento inicial marcado hasta 2020, seguido de una tendencia descendente atribuible a la incorporación progresiva de tecnologías limpias en la generación eléctrica. La reducción de gases como el CO_2, CH_4 y NO_x es especialmente relevante en el contexto del cambio climático, estos compuestos contribuyen significativamente al calentamiento global. Por otro

lado, la disminución de contaminantes como el carbono negro y los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC) representa un avance importante en términos de salud pública y calidad del aire, particularmente en regiones expuestas a emisiones industriales (ver Figura 40). No obstante, el monóxido de carbono, uno de los contaminantes de vida corta más tóxicos, mantiene niveles relativamente elevados a lo largo del periodo proyectado, lo que sugiere la necesidad de medidas adicionales para su control, dado su impacto en la salud humana y su persistencia en zonas urbanas e industriales.

El año 2020 representa un punto de inflexión en la trayectoria de las emisiones, la mayoría de los contaminantes atmosféricos alcanzan su nivel máximo en ese periodo y, a partir de entonces, inician una tendencia a la baja. Las emisiones totales descienden de 11,461,043 t en 2020 a 5,525,102 t en 2050, lo que equivale a una reducción del 51.8 %. Esta disminución sugiere la implementación efectiva de transformaciones estructurales en el sistema energético, incluyendo la transición hacia fuentes de energía más limpias, así como mejoras en los procesos de eficiencia energética. Dichos cambios reflejan un avance hacia un modelo de generación eléctrica más sustentable y con menor impacto ambiental, en línea con los compromisos nacionales e internacionales de mitigación de gases y contaminantes atmosféricos.

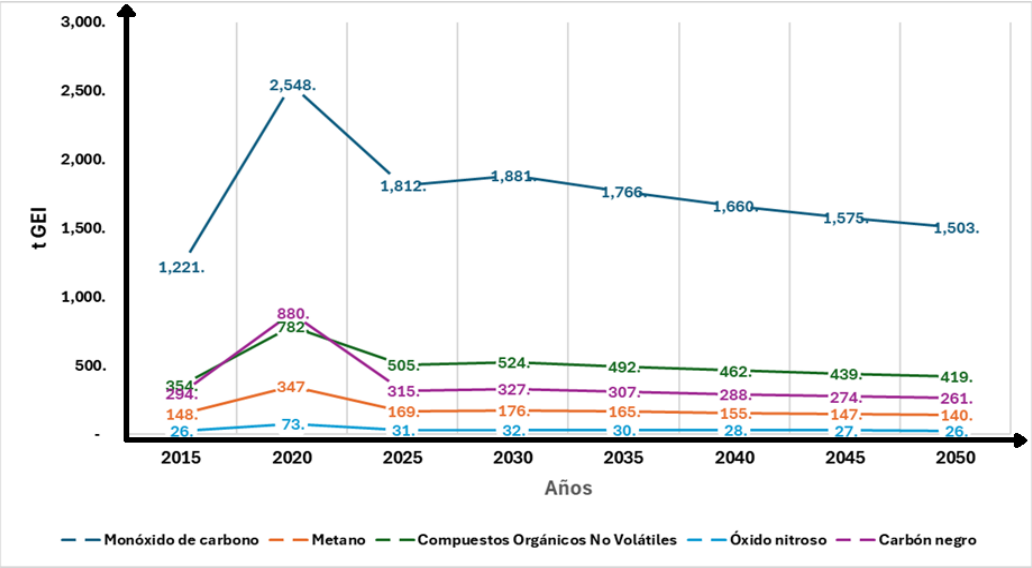


Figura 40. Emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el sector de la transformación energética en el escenario inercial, periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia, mediante el software LEAP

Los resultados proyectados para el valle reflejan una tendencia de reducción de emisiones, lo que sugiere una transición hacia tecnologías más limpias en el sector eléctrico local. Esto puede ser comparado con las proyecciones nacionales reportadas por SENER (2023), que anticipan una disminución gradual de emisiones debido a mejoras en eficiencia energética y una mayor incorporación de fuentes renovables. Sin embargo, estudios recientes sugieren que el proceso de desacoplamiento entre el crecimiento económico y las emisiones GEI en América Latina y el Caribe es insuficiente para cumplir con la meta de una economía carbono neutral a 2050 (Galindo et al., 2022). En este contexto, el valle parece avanzar hacia una descarbonización del sector energético, posiblemente debido a la sustitución progresiva del combustóleo por gas natural y a la incorporación de energía solar o eólica.

La transición hacia fuentes de energía limpias es esencial para el desarrollo sostenible de la región. A medida que la matriz energética se diversifica e incorpora un mayor porcentaje de energías renovables, tiene una oportunidad para avanzar hacia un modelo energético más sustentable, disminuyendo su dependencia de los combustibles fósiles. Este proceso no solo genera beneficios directos para la población, sino que también contribuye a los objetivos globales de mitigación del cambio climático, en particular al cumplimiento del ODS 7.

Además, comprender la interrelación entre agua y energía resulta fundamental para el desarrollo integral del VM, dado que ambos recursos están estrechamente vinculados y son pilares del crecimiento socioeconómico regional. El uso eficiente del agua desempeña un papel estratégico para satisfacer las demandas crecientes de los sectores productivos y de la transformación energética. Así, la sinergia entre agua y energía se configura como un factor clave para la sostenibilidad del valle, donde cada recurso potencia al otro, estableciendo un ciclo que impulsa el desarrollo económico y ambiental de la región.

5.5. El Nexo Agua-Energía

5.5.1. Indicador de intensidad energética de la demanda de agua

La intensidad energética de la demanda de agua es un indicador para evaluar la eficiencia del uso de la energía en los procesos relacionados con la demanda de agua. O sea, es la cantidad de energía necesaria para tratar, bombear o suministrar una unidad de volumen de agua (Vörösmarty et al., 2010). Este indicador es evaluado para los diferentes sectores y escenarios, expresado en MJ/m^3. Los volúmenes de la demanda de agua subterránea para los diferentes sectores fueron obtenidos para los mismos años de los escenarios de este trabajo, a partir de los publicados previamente por (Chamizo-Checa, 2018).

5.5.1.1. Tendencia de la intensidad energética en el escenario inercial

La Figura 41 presenta las tendencias del indicador de intensidad energética para el periodo 2015–2050, bajo el escenario BAU, abarcando la demanda total para los sectores analizados: residencial con servicios públicos, industrial y agrícola.

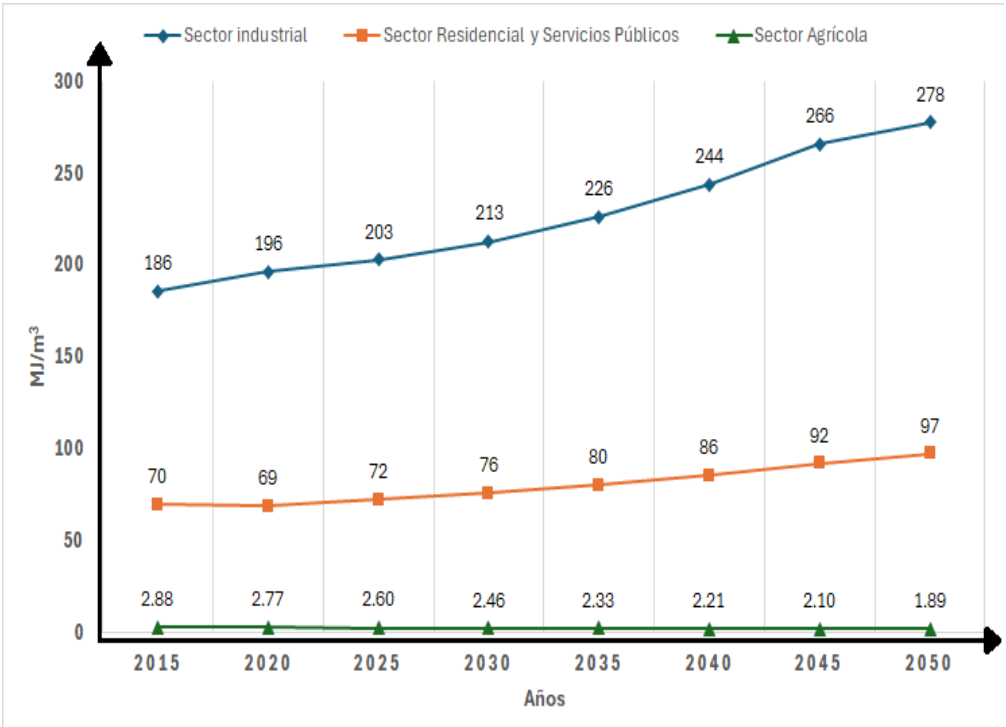


Figura 41. Tendencia de la intensidad energética de la demanda de agua, escenario BAU. Fuente: elaboración propia

Sector Industrial:

El sector industrial presenta la mayor intensidad energética de los sectores analizados, con una marcada tendencia al alza a lo largo del periodo. Como se observa de la Figura 41, el indicador presenta valores de 186 MJ/m³ en 2015 y 278 MJ/m³ en 2050, con un incremento del 49.5 % en el período. Esta tendencia implica que, en el cálculo de escenarios, el aumento de la demanda energética es mayor que el aumento estimado para el consumo de agua, posiblemente debido a la reutilización de esta última en los procesos de enfriamiento y por el contrario, la ausencia de cogeneración energética, que no mitiga esta demanda.

Esta tendencia destaca la necesidad de incorporar políticas y tecnologías que promuevan la sustentabilidad no solo mediante la reutilización de agua de procesos y la incorporación del agua superficial previamente tratada, como es el caso de la termoeléctrica. El mayor énfasis deberá dirigirse hacia el ahorro de energía mediante la cogeneración y la utilización de bombas solares para el suministro de agua potable.

Por otra parte, en el cálculo del indicador general para el valle se incluyen industrias con altos consumos de energía como es la industria del cemento, que aumenta aún más el valor del numerador, sin relacionarse con la demanda de agua industrial.

La literatura indica que industrias como la de alimentos y la química presentan consumos energéticos en el rango de 3.6 a 108 MJ/m³, dependiendo del nivel de tratamiento y la recirculación del agua utilizada en sus procesos (Trubetskaya et al., 2021). Sin embargo, el valor promedio proyectado para el sector industrial en la región en 2050, de 278 MJ/m³, supera ampliamente estos rangos, lo que sugiere la existencia de condiciones operativas ineficientes en cuanto al uso conjunto de agua y energía.

Asimismo, regiones como la Unión Europea o Estados Unidos han promovido el uso de recuperadores de calor y variadores de frecuencia en bombas industriales como medidas clave para disminuir la intensidad energética sin comprometer la productividad (Oliveira et al., 2019). En plantas industriales con cogeneración, se utiliza el vapor de agua para procesos y esta generación eléctrica reduce el consumo energético por unidad de agua utilizada.

Sector Residencial:

El sector residencial y de servicios públicos presenta un aumento moderado en la intensidad energética, significativamente menor en comparación con el sector industrial. El indicador presenta valores de 70 MJ/m³ (19.4 kWh/m³) en 2015 y 97 MJ/m³ (27 kWh/m³) en 2050, lo que representa un incremento del 38.5 %. Estos resultados subrayan el mayor impacto del sector industrial ante el consumo energético vinculado al uso del agua.

Este comportamiento puede atribuirse a varios factores. Por un lado, el aumento progresivo en la demanda de agua en zonas urbanas incrementa la operación de sistemas de bombeo, con resultados poco eficientes debido a las pérdidas en la red de distribución se necesita más energía para suministrar el mismo volumen de agua. La necesidad de tecnologías de bajo consumo energético, como bombas solares, podría mejorar este indicador.

La revisión de indicadores internacionales del nexo agua-energía en diversos países evidencia una marcada heterogeneidad en el consumo energético por metro cúbico de agua utilizada. Esta variación está relacionada con el tipo de fuente hídrica (superficial, subterránea o desalada), el nivel de tratamiento requerido, la eficiencia tecnológica instalada, la topografía local y la escala operativa de los sistemas.

En países con sistemas hídricos consolidados, como Estados Unidos, el consumo energético total para el ciclo urbano del agua (extracción, tratamiento, distribución y saneamiento) se sitúa típicamente entre 0.5 y 3.6 kWh/m³, dependiendo de la región y la complejidad del sistema (Chini et al., 2016). Para casos más específicos, se reporta un consumo aproximado de 0.08 kWh/m³ para el suministro de agua superficial y 0.18 kWh/m³ para aguas subterráneas. En el estado de California, donde se integran múltiples etapas del ciclo del agua en entornos urbanos de alta demanda, el valor promedio para uso residencial total asciende a 3.36 kWh/m³ (Hendrickson & Bruguera, 2018).

En el caso de China, estudios recientes reportan consumos de 0.29 kWh/m³ para el suministro urbano y 0.254 kWh/m³ para el tratamiento de aguas residuales (Z. Yang et al., 2023). Estos valores reflejan sistemas de gran escala con tecnologías relativamente eficientes.

En España, los sistemas urbanos de distribución reportan una intensidad energética de 0.21 kWh/m³, mientras que los procesos de reciclaje de aguas residuales pueden alcanzar 0.56 kWh/m³ (Coma et al., 2019). Estos valores son indicativos de una infraestructura hidráulica moderna, con una gestión optimizada del ciclo del agua, incluso cuando se trata de procesos complejos como el reúso.

En contraste, los países del Medio Oriente, debido a sus condiciones geográficas y climáticas, muestran consumos mayores. En zonas urbanas con extracción de aguas subterráneas, la intensidad energética puede alcanzar 1.2 kWh/m³. A esto se suman los consumos energéticos adicionales por transmisión (0.32 kWh/m³) y distribución (0.27 kWh/m³) en redes extensas (Kitessa et al., 2020). Belda-González (2018) reporta la intensidad energética para el bombeo residencial en Jordania entre 0.61 kWh/m^3 y 28.8 kWh/m³ hídrico, mientras que los valores observados en el VM son considerablemente superiores.

Frente a este panorama internacional, el caso del VM destaca por su alta intensidad energética en el sector residencial y de servicios públicos, entre 5 y 10 veces superior a los promedios internacionales, incluso si se consideran regiones de condiciones desfavorables. Este indicador no refleja únicamente el consumo energético del suministro directo, sino que incorpora el conjunto de procesos asociados al ciclo urbano del agua en la región: bombeo, distribución, tratamiento (cuando aplica) y otras operaciones complementarias. Esto evidencia que el sistema local aún tiene un amplio margen para mejorar su eficiencia operativa y tecnológica, lo cual es fundamental para avanzar hacia una gestión más sostenible del recurso hídrico y energético.

Sector Agrícola:

El sector agrícola muestra los menores valores del indicador, el agua de riego superficial es más de 90% y por gravedad, Por ello, en este sector sólo se calcula la correspondiente al riego por bombeo que es muy escaso (4%) en el VM (Suárez, 2024). A diferencia de los sectores residencial e industrial, se observa una reducción progresiva en su intensidad energética, al pasar de 2.88 MJ/m³ en 2015 a 1.89 MJ/m³ en 2050, lo que representa una

disminución del 34.4 %. Este descenso se explica por la tendencia a sustituirla por agua superficial para riego (riego por inundación), disminuyendo la demanda de agua de pozo.

Aunque el riego por gravedad resulta aparentemente sustentable desde la perspectiva del Nexo Agua-Energía, contrasta con una baja eficiencia hídrica en cantidad y el uso de aguas contaminadas y sin tratamiento utilizadas en gran parte del período. El riego por inundación genera importantes pérdidas por evaporación, lo que compromete la sustentabilidad global del sistema desde una perspectiva hídrica.

Sin embargo, la adopción de tecnologías avanzadas como el riego por goteo o por aspersión en sistemas superficiales puede generar beneficios significativos a pesar de requerir energía para el bombeo del sistema. En este sentido, Kholod et al. (2021) demostraron que el riego por goteo y otras tecnologías modernas incrementan la eficiencia conjunta del uso de agua y energía, además de contribuir a la reducción de la huella de carbono del sector agrícola.

5.5.1.2. Evolución de la intensidad energética residencial con implementación de calentadores solares (escenario de mitigación)

La Figura 42 muestra la evolución del indicador de intensidad energética en el periodo 2015-2050, considerando dos escenarios: el uso de calentadores solares en los hogares e inercial sin intervenciones (BAU).

El uso de calentadores solares se centró en el sector residencial, dado que el consumo de agua caliente en los hogares responde a necesidades individuales y continuas. Indirectamente, también resulta beneficioso para la economía familiar de los hogares.

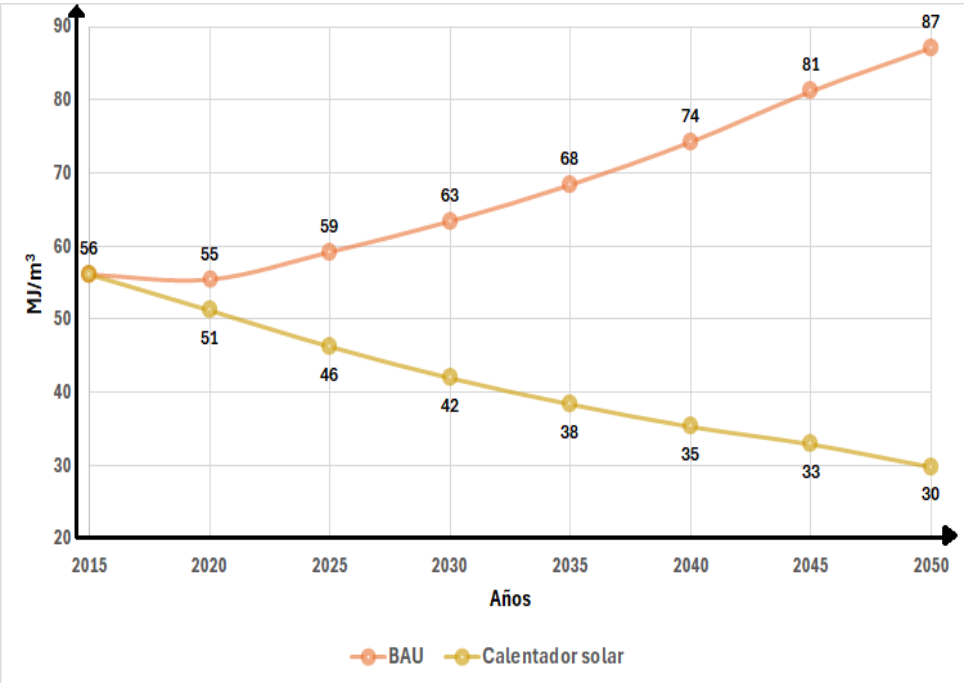


Figura 42. Tendencia de la intensidad energética de la demanda de agua caliente en el sector residencial: comparación entre escenario de uso de calentador solar y BAU. Fuente: elaboración propia

El escenario de calentadores solares (color amarillo) muestra la mayor reducción en la intensidad energética del sector residencial, al pasar de 56 MJ/m³ en 2015 a 30 MJ/m³ en 2050, lo que equivale a una disminución del 46.4 %. Esta reducción es atribuida al reemplazo gradual de sistemas convencionales de calentamiento de agua, operados con electricidad o gas LP, por sistemas solares térmicos.

En comparación con el escenario BAU (color naranja), que proyecta una intensidad energética de 87 MJ/m³ en 2050, la implementación de calentadores solares permite una reducción del 66%. Esta estrategia tiene un impacto más directo y significativo sobre la intensidad energética asociada al consumo de agua caliente, al sustituir fuentes convencionales de energía por sistemas solares térmicos más eficientes.

La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) recomienda la adopción de tecnologías solares térmicas, al reducir la demanda energética para el calentamiento de agua en el sector residencial, se contribuye a la eficiencia energética y a la sostenibilidad (IEA, 2020). Además, investigaciones en California han demostrado que la

implementación de sistemas de calentamiento de agua eficientes, como los calentadores solares térmicos, puede reducir el consumo energético asociado al uso de agua en el sector residencial (Abdullah, 2024).

Han et al. (2021) reportaron una intensidad energética de 11.7 MJ/m³ en un sistema solar térmico residencial, con un desempeño energético hasta un 60 % más eficiente que el valor proyectado de 30 MJ/m³ estimado para el año 2050 optimizando la instalación con alta disponibilidad de radiación solar y un adecuado mantenimiento del sistema.

Adicionalmente, un estudio realizado en Bangkok, Tailandia, reveló que la implementación de sistemas solares térmicos permitió una reducción del 87.4 % en el consumo energético anual destinado al calentamiento de agua, en comparación con sistemas eléctricos convencionales (Chaabane et al., 2022).

Desde el enfoque del Nexo Agua-Energía, este tipo de soluciones se posiciona como una alternativa viable y deseable en la transición hacia modelos energéticos más resilientes y sostenibles. La incorporación de tecnologías solares térmicas no solo permite una mejora en la eficiencia energética del sistema hídrico residencial, sino que también se alinea con los principios del ODS 7, al promover una infraestructura más limpia, resiliente y sostenible. Esta estrategia representa una solución efectiva para reducir la dependencia de combustibles fósiles en zonas con alto potencial solar, como el valle.

5.5.1.3. Tendencia de la intensidad energética residencial con implementación de luminarias LED

Aunque esta medida no incide directamente en el uso de energía para el manejo del agua, su impacto radica en la eficiencia global del sistema eléctrico residencial. Al reducir el consumo eléctrico total, se libera capacidad en la red eléctrica, beneficiando indirectamente el proceso de generación.

5.5.1.4. Evolución de la intensidad energética en la industria química y de materiales de construcción: escenario de cogeneración

La Figura 43 presenta las tendencias del indicador de intensidad energética de la demanda de agua para el periodo 2015–2050, bajo el escenario de implementación de sistemas de cogeneración en la industria.

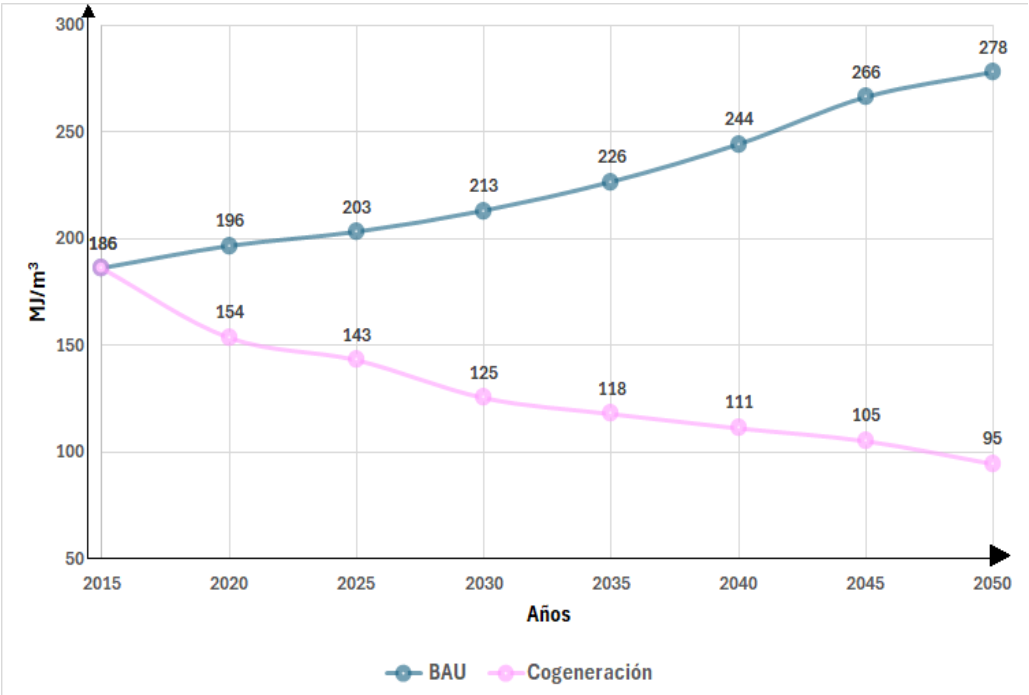


Figura 43. Tendencia de la intensidad energética de la demanda de agua, escenario de implementación de sistemas de cogeneración en la industria. Fuente: elaboración propia

El escenario de implementación de sistemas de cogeneración (color rosa) en el sector industrial proyecta una reducción significativa en la intensidad energética, al pasar de 186 MJ/m³ en 2015 a 95 MJ/m³ en 2050, lo que representa una disminución del 48.9 %. Esta tecnología mejora el aprovechamiento de la energía mediante la producción simultánea de electricidad y calor útil, lo que reduce el requerimiento energético neto por unidad de agua utilizada en procesos industriales.

Es importante señalar que, aunque el indicador se calcula de forma agregada para todo el sector industrial del VM, no todos los subsectores presentan consumo hídrico directo. Tal es el caso de la industria cementera, cuya actividad no requiere agua de proceso, y por lo tanto solo aporta al numerador del indicador (energía consumida), sin contribuir al

denominador (agua utilizada). Esto influye en que el valor agregado del indicador para la región sea relativamente alto. No obstante, dado que el objetivo del análisis es mantener una visión integral del sector y no desagregar por subsector, la cogeneración se considera una estrategia clave para mejorar la eficiencia energética global del sistema industrial en la región.

La incorporación de cogeneración optimiza el uso energético, mitigando las pérdidas térmicas, haciendo que el proceso industrial sea menos intensivo en energía por cada metro cúbico de agua utilizada. Este cambio estructural representa un avance importante hacia una industria más eficiente, resiliente y alineada con los objetivos de sostenibilidad energética establecidos por el ODS 9.

Es relevante señalar que, en el escenario con cogeneración, se asumió que el volumen de agua consumida no disminuye ni se incrementa la proporción de agua reutilizada respecto al año base. O sea, el sistema de reutilización de agua permanece constante a lo largo del periodo analizado. Bajo esta premisa, se estableció que el agua utilizada en procesos industriales no es reutilizada, mientras que el agua empleada en sistemas de enfriamiento sí es sometida a recirculación en la misma medida del año base.

El único reporte disponible para la evolución de la cantidad total de agua utilizada en el sector industrial durante el período analizado es la de (Chamizo-Checa et al., 2020) que incluye la demanda hídrica de los sectores de transformación energética y la industria manufacturera, por lo que los resultados agregados podrían incluir la sobrestimación del consumo de agua.

5.5.2. Tendencia de la intensidad hídrica de la energía en la generación eléctrica

El indicador de intensidad hídrica (IHE) cuantifica la cantidad de agua utilizada para generar energía, expresado en m^3/GJ. Este indicador permite evaluar la eficiencia hídrica del sistema energético y es clave para analizar su sostenibilidad, especialmente en contextos de estrés hídrico y transición energética. Para este cálculo, se emplearon los datos de consumo de agua obtenidos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) (CONAGUA, 2024).

Para su estimación, se consideraron las principales instalaciones de generación eléctrica en la región, incluyendo la planta termoeléctrica convencional, el ciclo combinado actual, las nuevas centrales de ciclo combinado Tula I y II, y las plantas de energía renovable. Los resultados detallados se muestran en la Figura 44.

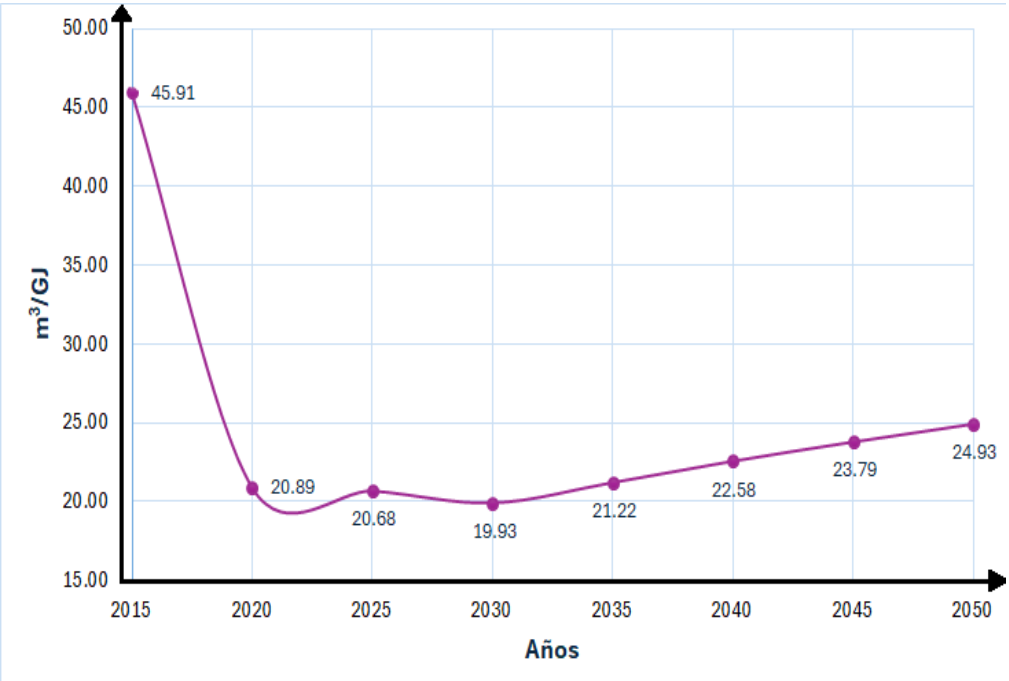


Figura 44. Intensidad hídrica de la energía para la generación eléctrica del Valle del Mezquital, considerando todas las tecnologías planeadas en el periodo 2015-2050. Fuente: elaboración propia

El comportamiento del indicador IHE, en el escenario inercial (BAU), refleja una evolución fuertemente influenciada por la composición tecnológica de la matriz de generación eléctrica del valle en el periodo 2015–2050. En 2015, el IHE alcanzó un valor de 45.91 m³/GJ, el más alto del periodo analizado, debido principalmente a la fuerte participación de tecnologías intensivas en agua, como la termoeléctrica convencional que utilizaba combustóleo y la generación hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart, que en conjunto representaban más del 75 % del total energético generado.

A partir de 2020, se observó una disminución del IHE, alcanzando 20.89 m³/GJ, lo que representa una reducción del 54.5 % en solo cinco años. Este cambio está relacionado con el aumento en la generación total de energía, que se duplicó en ese mismo periodo (de

6,463 en 2015 a 13,908 GWh en 2020), impulsada en parte por la incorporación de nuevas tecnologías renovables específicamente la solar y una reducción en la participación de tecnologías más intensivas en agua (termoeléctrica de combustóleo de Tula) con la instalación gradual de los ciclos combinados Tula I y II.

Entre 2020 y 2030, el IHE continuó descendiendo, aunque de forma más moderada, alcanzando su valor mínimo en 2030 con 19.93 m³/GJ, lo que representa una reducción del 56.6 % respecto a 2015. En este punto, la matriz energética ya contaba con una mayor participación de tecnologías limpias y de menor consumo hídrico, como la solar y la eólica, así como el inicio de operaciones de plantas de ciclo combinado más eficientes.

No obstante, a partir de 2035 se evidenció que la tendencia del IHE aumenta progresivamente hasta alcanzar 24.93 m³/GJ en 2050 que puede explicarse por la disminución gradual del volumen total de electricidad generada (de 14,043 GWh en 2030 a 11,954 GWh en 2050) por el ciclo de vida de las plantas solares, manteniendo aún el uso de agua de los ciclos combinados y la hidroeléctrica.

Tabla 37. Consumo de agua por tecnología de generación eléctrica en el escenario tendencial (2015–2050), en m³/GJ.

Tecnologías	2015	2020	2025	2030	2045	2050	Comparación con literatura	Referencias
Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos	4.19	1.75	1.83	1.76	1.88	2.00	Dentro del rango de 2–5 m³/GJ típico de plantas termoeléctricas convencionales	(Zhai et al., 2011)
Ciclo Combinado Viejo	3.99	---	---	---	---	---	Consumo compatible con plantas de ciclo combinado (1–4 m³/GJ)	(Pan et al., 2018)
Ciclo Combinado NTG Tula II Fase 1	---	---	5.24	5.05	5.37	5.72	Consumo compatible con plantas de ciclo combinado (1–4 m³/GJ)	(Pan et al., 2018)
Ciclo Combinado NTG Tula II Fase 2	---	---	2.53	2.44	2.60	2.76	Consumo compatible con plantas de ciclo combinado (1–4 m³/GJ)	(Pan et al., 2018)
Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart	7.37	3.07	3.88	3.74	3.98	4.24	Hidroeléctrica en Estados Unidos consume aproximadamente 1.7 m³/GJ	(Grubert, 2016)

El análisis de la intensidad hídrica específica (IHE) por tecnología permite identificar el aporte diferencial de cada central de generación. La Tabla 37 muestra la

evolución del IHE en el periodo 2015–2050, mostrando tecnologías intensivas en agua, como la termoeléctrica convencional y la hidroeléctrica, y las más eficientes como el ciclo combinado de nueva generación (NTG). Se incluye una comparación con valores reportados en la literatura científica para validar la consistencia de los datos obtenidos.

El análisis de la intensidad hídrica en distintas tecnologías de generación eléctrica revela importantes diferencias en la eficiencia del uso del agua, así como variaciones temporales significativas. Los datos obtenidos entre 2015 y 2050 para las plantas de generación del VM muestran una tendencia oscilante en el consumo de agua, con valores que en algunos casos superan los promedios reportados en la literatura internacional.

En el caso de la central termoeléctrica Francisco Pérez Ríos, se observa una reducción sostenida en su intensidad hídrica específica (IHE), pasando de 4.19 m^3/GJ en 2015 a 2.00 m^3/GJ en 2050. Esta trayectoria descendente, con valores que oscilan entre 1.75 y 2.00 m^3/GJ, está basado en las mejoras de eficiencia operativa, por la reducción en su capacidad instalada basada en combustóleo y a una operación parcial luego de 2020. Aunque los valores iniciales superan el umbral inferior del rango típico para plantas termoeléctricas convencionales (2–5 m^3/GJ, según Zhai et al., (2011), en la mayor parte del periodo los consumos se mantienen dentro o ligeramente por debajo de dicho rango, lo que refleja un IHE muy eficiente.

Por su parte, el ciclo combinado antiguo tuvo un valor de 3.99 m^3/GJ en 2015, perfectamente alineado con los rangos internacionales de consumo para esta tecnología de 1–4 m^3/GJ, (Pan et al., 2018). No se dispone de datos posteriores debido al retiro de esta unidad para dar paso a las plantas de ciclo combinado NTG.

Los ciclos combinados NTG Tula I y II, con capacidades instaladas de 566.69 MW (Fase 1) y 450.64 MW (Fase 2), presentan diferencias relevantes en términos de intensidad hídrica. La Fase 2 muestra un consumo moderado y estable, entre 2.44 y 2.76 m^3/GJ, completamente coherente con los estándares internacionales. En contraste, la Fase 1 presenta valores más elevados, entre 5.05 y 5.72 m^3/GJ, que superan el límite superior del rango típico. Esta diferencia puede atribuirse a factores como el diseño del sistema de enfriamiento, o posibles diferencias en los esquemas de operación y carga asignada a cada unidad.

En el caso de la hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart, se aprecia una reducción en la intensidad hídrica desde 7.37 m³/GJ en 2015 hasta 4.24 m³/GJ en 2050. Si bien esta disminución indica una mejora en el desempeño hídrico, los valores siguen siendo considerablemente más altos que los reportados en estudios internacionales. Por ejemplo, Grubert (2016) estima un promedio de 1.7 m³/GJ para hidroeléctricas en Estados Unidos. Esto puede ser debido al tiempo en que fue construida, actualmente la eficiencia de turbinas modernas es mayor.

Los resultados reflejan que, aunque algunas tecnologías locales se alinean con los reportes internacionales, otras presentan un uso excesivo del recurso hídrico en las cuales habrá de centrar esfuerzos e incorporar tecnologías de bajo consumo, particularmente en las centrales de ciclo combinado con prácticas de monitoreo y mantenimiento para contribuir significativamente a reducir la huella hídrica del sector energético

5.5.3. Intensidad hídrica de la energía en la Refinería de Tula

En el caso de la refinería de Tula, solamente se reporta el resultado del indicador IHE para el año base, no se hizo el estudio de escenarios de energía para esta industria por no contar con un plan de inversiones a largo plazo. Se calculó un valor de la IHE de 0.03916 m³/GJ, el cual se encuentra dentro del rango reportado en la literatura internacional para instalaciones de refinación de petróleo. Según (Spang et al., 2014a, 2014b), la IHE promedio para este tipo de procesos se sitúa en torno a 0.040 m³/GJ, con un intervalo que va desde 0.026 hasta 0.048 m³/GJ, dependiendo de la configuración tecnológica, los procesos de conversión empleados y el grado de integración energética. La posición de la Refinería de Tula dentro de este rango sugiere un desempeño hídrico que se alinea con los estándares globales y que puede considerarse con una operación eficiente.

Complementariamente, estudios específicos sobre refinerías en Estados Unidos, como los presentados por (Sun et al., 2018), reportan consumos entre 0.34 y 0.47 litros de agua por litro de crudo procesado, lo que equivale a 0.034–0.047 m³/GJ, considerando los diferentes esquemas de refinación. Al comparar con el valor observado para la refinería de

Tula, se confirma su compatibilidad con los valores internacionales, reforzando la idea de que dicha refinería opera con un IHE competitivo en el contexto global.

En conjunto, estos resultados de IHE permiten concluir que la refinería de Tula presenta un nivel de consumo hídrico eficiente y comparable al de otras instalaciones modernas de países desarrollados. Esto es indicativo de prácticas adecuadas en el uso del recurso hídrico, así como de una infraestructura tecnológica suficientemente optimizada para minimizar la huella hídrica en sus procesos energéticos. No obstante, existe margen para continuar fortaleciendo estas condiciones mediante estrategias adicionales de eficiencia y recirculación, en línea con los compromisos ambientales del sector energético.

6. CONCLUSIONES

La estimación de los volúmenes históricos de agua residual de la ZMCM recibida por el VM se realizó mediante un modelo con error inferior al 2% y mostró un aumento de 37.4% desde 1985 (1362 hm^3) a 2020 (1872 hm^3), debido al impacto del crecimiento demográfico y urbano de la ZMCM y principalmente, el aumento de las precipitaciones. Estos resultados compensan la ausencia de datos oficiales de estos volúmenes de agua importada por el Valle del Mezquital y pueden ser útiles para futuras investigaciones.

Análisis socioeconómico municipal

La variación de cada uno de los indicadores analizados durante el período 1985-2020 mediante los algoritmos t-SNE y k-medias identificó patrones distintivos en grupos de municipios del valle. Tula se destaca por su intensa actividad industrial y agrícola en la zona sur; Ixmiquilpan se posiciona como el principal centro social de la región al norte; mientras que Tepeji y Actopan presentan un desarrollo equilibrado en los tres sectores analizados. Atotonilco de Tula registró un notable crecimiento demográfico en la última década, impulsado por la instalación de la PTAR y la inversión industrial.

A pesar del incremento en la superficie agrícola y del volumen de aguas residuales destinadas a esta actividad, el empleo en el sector primario ha experimentado una disminución. Esta dinámica evidencia el proceso de tecnificación del sector agrícola en la región, así como la consecuente migración laboral hacia otros sectores, particularmente el industrial, en búsqueda de una fuente de ingresos más estable.

El sector industrial tuvo el mayor crecimiento, impulsado en gran medida por la disponibilidad de agua subterránea, como el principal impulsor de la economía local, en contraste con la percepción tradicional de una región agrícola.

El desarrollo del sector social no se relaciona con la presencia del agua superficial y presenta una división regional: en el norte los municipios de menor desarrollo, mientras que en las zonas centro y sur los indicadores y la población aumentan en el tiempo, mejorando su calidad de vida. Esta disparidad podría estar influida por la distribución inequitativa de los

beneficios y evidencia una brecha significativa entre el crecimiento económico y el desarrollo social.

Este estudio representa la primera caracterización socioeconómica del Valle del Mezquital utilizando algoritmos de aprendizaje no supervisado (t-SNE y *k*-medias) aplicados a datos oficiales y asociado a la disponibilidad de agua residual. Se propone una metodología empírica basada en análisis geoespacial y agrupamiento multivariado, lo que la hace útil para otros estudios territoriales con información limitada, como es el caso de los municipios.

Energía (excepto transporte)

Se estima que la demanda energética del Valle del Mezquital crecerá aproximadamente un 129 % para 2050, con una tasa anual promedio de 3.68 %, debido principalmente a los consumos de los sectores industrial y residencial. Se prevé que los sectores agrícolas y de servicios públicos mantendrán una demanda mucho menor y con bajo crecimiento, según el modelo matemático LEAP.

El sector industrial consumió el 84.4 % del total de energía en el año base 2015, destacándose el uso de gas natural, coque de petróleo y electricidad. En contraste, el sector residencial representó sólo el 11.1 % de la demanda total, consumiendo gas LP, leña y electricidad. Los sectores agrícola y de servicios públicos consumió menos del 5 % del total, principalmente por el uso de electricidad.

Las emisiones totales, que pasaron de 1.59 a 4.44 millones de toneladas de CO_2 equivalente entre 2015 y 2050, fueron generadas exclusivamente por los sectores residencial (6.8 %) e industrial (93.2 %). Durante este periodo, se observó un incremento del 12.3 % en el primer quinquenio (2015–2020) y del 18.3 % en el último (2045–2050), lo que evidencia una creciente demanda energética sustentada principalmente en fuentes fósiles y una limitada adopción de tecnologías sostenibles a lo largo del tiempo.

En el año base, la demanda energética residencial fue de 3573 TJ en el valle se concentró principalmente en la cocción de alimentos (47%) y el calentamiento de agua (39%), representando conjuntamente el 86% del consumo total de energía residencial. Para el 2050, se espera que la demanda de energía en los hogares aumente un 112.2%: la cocción de alimentos, con un alza del 87.6%, y la iluminación casi duplicará su uso incrementándose

a 97.8%. Esto implica que las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector aumentarán a 147,025 t para 2050, que equivale a un aumento anual promedio de 4,200 t.

La incorporación de calentadores solares como medida de mitigación en los hogares permitiría reducir la demanda energética destinada al calentamiento de agua en un 69.5 % hacia 2050, lo que implica una disminución del 56.5 % en las emisiones asociadas. Por otra parte, la adopción de luminarias LED en sustitución de focos incandescentes podría reducir el consumo energético en iluminación hasta en un 90% para el año 2045.

Los servicios públicos crecerán aproximadamente un 15% hacia 2050, siendo el mayor consumo de energía atribuido al bombeo de agua potable y residual, seguido por el tratamiento de aguas residuales. Por su parte, la PTAR de Atotonilco de Tula se mantendrá sin cambios en su consumo energético.

En el año base 2015, la demanda energética del sector industrial de manufactura fue de aproximadamente 27,154 TJ. Para el año 2050, se prevé que esta demanda crezca un 137.4 %, alcanzando cerca de 64,432 TJ, impulsado principalmente por la expansión de la industria de materiales de construcción, estrechamente vinculado a los proyectos de desarrollo urbano en la región y zonas aledañas y en segundo lugar, la industria química. Este sector será el principal responsable del aumento de las emisiones totales de GEI, que se triplicarán, pasando de 1.43 millones de toneladas en 2015 a más de 4.13 millones en 2050.

La implementación de sistemas de cogeneración como medida de mitigación en el sector industrial de manufactura podría reducir la demanda energética del subsector de materiales de construcción en un 42%, al disminuir de 9,842 TJ en 2015 a 5,701 TJ en 2050. De manera similar, el subsector de la industria química podría disminuir su consumo energético en un 6.9%, pasando de 15,107 TJ en 2015 a 14,055 TJ en 2050. Estas reducciones contribuirían conjuntamente a una disminución global de las emisiones del sector industrial cercana al 43% durante dicho periodo.

De acuerdo con las proyecciones de CFE que la generación eléctrica en el Valle del Mezquital aumentará de 6,463 GWh en 2015 a 11,954 GWh en 2050, impulsada principalmente por la planta de ciclo combinado Tula II y fuentes renovables (solar y eólica). Este crecimiento permitiría reducir las emisiones en un 48 % respecto a los niveles de 2015.

El Nexo Agua-Energía

La intensidad energética asociada a la demanda de agua en el sector industrial presentó los mayores valores y se incrementará de 186 MJ/m³ en 2015 a 278 MJ/m³ en 2050, lo que representa un aumento del 49.5%. De forma similar, el sector residencial y de servicios públicos mostró un crecimiento del 38.6 %, al pasar de 70 MJ/m³ en 2015 a 97 MJ/m³ en 2050. En contraste, el sector agrícola presentó valores menores (2.88 MJ/m³ a 1.89 MJ/m³), con una reducción del 34.4% al disminuir el bombeo del agua de riego.

El uso de calentadores solares en el sector residencial disminuye este indicador de 56 MJ/m³ en 2015 a 30 MJ/m³ en 2050, equivalente a una reducción del 46.4%. En el sector industrial, los sistemas de cogeneración en las industrias de materiales de construcción y química pueden revertir la tendencia creciente de la intensidad energética, reduciéndola casi a la mitad, de 186 MJ/m³ en 2015 a 95 MJ/m³ en 2050 (48.9%) ante el escenario inercial con 278 MJ/m³, en 2050.

El indicador de intensidad hídrica para la generación eléctrica del Valle del Mezquital disminuye de 45.91 m³/GJ en 2015 a 19.93 m³/GJ en 2030, lo que representa una reducción del 56.6%, atribuible a la integración de tecnologías renovables y plantas de ciclo combinado más eficientes. A partir de 2035 se prevé un incremento gradual de esta intensidad hasta alcanzar 24.93 m³/GJ en 2050, debido a la disminución de la generación eléctrica por desgaste y la persistencia de tecnologías con alto consumo hídrico.

Se realizó un análisis del indicador de intensidad hídrica por cada tecnología, concluyendo que la central termoeléctrica Francisco Pérez Ríos mostró una mejora sostenida al pasar de 4.19 m³/GJ en 2015 a 2.00 m³/GJ en 2050 debido a la disminución de la tecnología con combustóleo desde 2020, y puede mantener sus valores dentro del rango internacional reportado para plantas termoeléctricas convencionales (2–5 m³/GJ). El ciclo combinado de nueva generación Tula II opera dentro de los estándares internacionales, con valores que oscilan entre 2.44 y 2.76 m³/GJ, mientras que Tula 1 lo supera a 5.72 m³/GJ. La hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart, muestra valores elevados frente al promedio internacional de 1.7 m³, con una reducción en su intensidad hídrica, de 7.37 m³/GJ en 2015 a 4.24 m³/GJ en 2050.

7. REFERENCIAS

Abad-Ordóñez, L. E., Aguaiza-Viñanzaca, D.S. (2019). *Análisis de escenarios de eficiencia energética en el sector residencial del cantón Cuenca utilizando el modelo LEAP.* Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17366/1/UPS-CT008291.pdf

Abaroa-Silva, S. I. (2011). Comparativo de precios de estufas de gas. *Procuraduría Federal del Consumidor* https://www.gob.mx/profeco/documentos/comparativo-de-precios-de-estufas-de-gas

Abdullah, A., Krause, T. (2024). *A Comprehensive, High Efficiency Solution for Water Heating in: Multifamily Buildings*. Project report CEC-500-2024-054. https://www.energy.ca.gov/publications/2024/comprehensive-high-efficiency-solution-water-heating-multifamily-buildings

Amo-Aidoo, A., Kumi, E. N., Hensel, O., Korese, J. K., & Sturm, B. (2022). Solar energy policy implementation in Ghana: A LEAP model analysis. *Scientific African*, *16*, e01162. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01162

Aranda-Bastida, B. (2021). *Efectos del uso de drones en la agricultura mexicana: el caso del Valle del Mezquital, Hidalgo*. Tesis de posgrado. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México. http://hdl.handle.net/11191/7651, https://doi.org/10.24275/uama.4391.7651

Aguas Tratadas del Valle de México, (2014). *Manifiesto de Impacto Ambiental Modalidad Particular "Construción y Operación del Proyecto Denominado la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR Atotonilco"*. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgiraDocs/documentos/hgo/estudios/2013/13HI2013H0004.pdf

Alvarado-Machuca, S.V,, Álvarez-Sánchez, E., Maldonado-Torres, R., & Sánchez-Velez, A.S. (2018). Consumo de leña en México: hábitos de uso, problemática asociada y alternativas sostenibles de solución. En Agroforestería para la Conservación de los Recursos Naturales y Productividad. Publisher: Universidad Autónoma Chapingo. Cap. 4. (pp. 64-87). https://www.researchgate.net/publication/331100897_Consumo_de_lena_en_Mexico_habitos_de_uso_problematica_asociada_y_alternativas_sostenibles_de_solucion

Azrate-Salgado, J. (2011). Región y desigualdades económico-sociales. El caso del valle de Toluca y el valle del Mezquital. *Espacios Públicos*, *14(32)*, 248-257. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67621319012

Ba-Alawi, A. H., Nguyen, H.-T., & Yoo, C. (2024). Coordinated operation for a resilient and green energy-water supply system: A co-optimization approach with flexible strategies. *Energy*, *304*, 132138. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132138

Basheer, M., & Ahmed Elagib, N. (2019). Temporal analysis of water-energy nexus indicators for hydropower generation and water pumping in the Lower Blue Nile

Basin. *Journal of Hydrology*, *578*, 124085. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124085

Belda-González, A. (2018). *The Water-Energy-Agriculture nexus in Jordan – A case study on As-Samra wastewater treatment plant in the Lower Jordan River Basin.* Master of Science Thesis KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology. TRITA-ITM-EX 2018:588. Division of Energy System Analysis. SE-100 44 STOCKHOLM. Disponible en: https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1236635/FULLTEXT01.pdf

Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento. (2015). *Estudio de Mercado sobre Diodos Emisores de Luz LED's.* F. SENER. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/315524/5_LED.pdf

Cáceres-Luque, S., Guzmán-Quintana, R., Santander-Guerra, A. (2022). *Informe Balance Nacional de Energía*. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/2022_informe_anual_bne_2020.pdf

Calderón-Mólgora, C. G. (2015). *Plantas de tratamiento de aguas residuales como fuentes potenciales de energías renovables para el INERE* Valorización energética de residuos urbanos, experiencias y estrategias globales, Ciudad de México. Disponible en:https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197651/22._Las_PTAR_como_potenciales_fuentes_de_energ_a.pdf

Canseco-Reyes, V. (2018). *Las transformaciones ambientales e implicaciones sociales en el Valle del Mezquital.* Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México. Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.11799/99812

CEPAL. (2018). *Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México*. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/361298d9-554f-42d0-83b4-d38bb03dae88/content

CFE. (2020). *Manifestación de impacto ambiental. Modalidad regional. Proyecto CC Tula II fase I.* SEMARNAT. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgiraDocs/documentos/hgo/estudios/2020/13HI2020E0061.pdf

CFE. (2023). *Prospectiva del Sector Eléctrico*. SENER. Disponible en: https://www.gob.mx/sener/articulos/prospectivas-del-sector-energetico-356380

Chaabane, M., Mhiri, H., & Bournot, P. (2022). Thermal Performance Comparison of Various Concentrating Solar Water Heating Systems. En: Advances in Materials, Mechanics and Manufacturing II, Proceedings of the Third International Conference on Advanced Materials, Mechanics and Manufacturing (A3M'2021), March 25-27, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84958-0_27

Chamizo-Checa, S. (2018). *Escenarios de balance hídrico y emisiones de metano en el Valle del Mezquital,* Tesis de doctorado. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Mineral de la Reforma. México. Disponible en: http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/2065

Chamizo-Checa, S., Otazo-Sánchez, E. M., Gordillo-Martínez, A. J., González- Ramírez, C. A., Suárez-Sánchez, J., & Muñoz-Nava, H. (2018). El cambio climático y la disponibilidad agua en sub-cuencas del Valle del Mezquital, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, *Vol. 5 No. 5 41*, 40-51. Disponible en: https://www.reibci.org/publicados/2018/oct/3000102.pdf

Chamizo-Checa, S., Otazo-Sánchez, E., Gordillo-Martínez, A., Suárez-Sánchez, J., González-Ramírez, C., & Muñoz-Nava, H. (2020). Megacity Wastewater Poured into A Nearby Basin: Looking for Sustainable Scenarios in A Case Study. *Water*, *12*(3). 824. https://doi.org/10.3390/w12030824

Chen, S., & Chen, B. (2016). Urban energy–water nexus: A network perspective. *Applied Energy*,*184*, 905-914. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.042

Chengot, R., Zylberman, R., Momblanch, A., Salazar, O. V., Hess, T., Knox, J. W., & Rey, D. (2024). Evaluating the impacts of agricultural development and climate change on the water-energy nexus in Santa Elena (Ecuador). *Environmental Science & Policy*, *152*, 103656. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.103656

Chini, C. M., Schreiber, K. L., Barker, Z. A., & Stillwell, A. S. (2016). Quantifying Energy and Water Savings in the U.S. Residential Sector. *Environmental Science & Technology*, *50*(17), 9003-9012. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01559

Cifuentes-Guevara, J. N. (2025). Evaluación de la viabilidad técnica para la propuesta de implementación de energía fotovoltaica en la iluminación interna de remolques para la empresa Coordinadora Mercantil SA. Tesis de grado. Universidad Tecnológica de Pereira, Perú. Disponible en: https://repositorio.utp.edu.co/entities/publication/c0422b37-9cd1-46fe-96a1-ae89526db90f

Coma, J., Maldonado, J. M., de Gracia, A., Gimbernat, T., Botargues, T., & Cabeza, L. F. (2019). Comparative Analysis of Energy Demand and CO2 Emissions on Different Typologies of Residential Buildings in Europe. *Energies*, *12*(12). 2436. https://doi.org/10.3390/en12122436

CONAGUA. (2005). *Situación del Subsector Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento* (Vol. V). SEMARNAT. Disponible en: https://www.gob.mx/conagua/documentos/situacion-del-subsector-agua-potable-drenaje-y-saneamiento

CONAGUA. (2010). *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento* (Vol. X). SEMARNAT. Disponible en: https://www.gob.mx/conagua/documentos/situacion-del-subsector-agua-potable-drenaje-y-saneamiento

CONAGUA. (2015a). *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.* (Vol. XV). SEMARNAT. Disponible en: https://www.gob.mx/conagua/documentos/situacion-del-subsector-agua-potable-drenaje-y-saneamiento

CONAGUA. (2015b). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación* (Vol. XII). CONAGUA. Disponible en: https://www.gob.mx/conagua/documentos/inventario-de-plantas-municipales-de-potabilizacion-y-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-operacion

CONAGUA. (2019a). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado* (Vol. IX). CONAGUA. Disponible en: https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas

CONAGUA. (2019b). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Drenaje PluvialUrbano* (Vol.XIX). SEMARNAT. Disponible en: https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas

CONAGUA. (2020). *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento* (Vol. XX). SEMARNAT. Disponible en: https://www.gob.mx/conagua/documentos/situacion-del-subsector-agua-potable-drenaje-y-saneamiento

CONAGUA.(2024). *Consulta a la base de datos del REPDA.* https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx

CONAVI. (2019). *Nota Metodológica para la Estimación de Reducción de Emisiones de GyCEI.* Disponible en: https://siesco.conavi.gob.mx/doc/analisis/2024/NM_GyCEI.pdf

Contreras-Román, R. H. (2018). Volver a la tierra: retorno migratorio y recampesinización forzada en el Valle del Mezquital, México. *Perspectivas Rurales Nueva Época*, *16(3)*, 45-55. https://doi.org/10.15359/prne.16-32.3

Contreras-Román, R. H. (2019). Indio, campesino y migrante. Los proyectos históricos en la construcción del valle del mezquital como región. *Estudios De Cultura Otopame*, *10*, 12-57. Disponible en: https://revistas.unam.mx/index.php/eco/article/view/71535

Cornejo-Oviedo, F. M., López-Herrera, M., Beltrán-Hernández, R. I., Acevedo-Sandoval, O. A., Lucho-Constantino, C. A., Reyes-Santamaría, M. I. (2012). Degradación del suelo en el Distrito de riego 003 Tula, Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, *12(4)*, 873-880. Disponible en: . https://www.researchgate.net/publication/264496302_Degradacion_del_suelo_en_el_Distrito_de_riego_003_Tula_Valle_del_Mezquital_Hidalgo_Mexico

Cornejo-Icaza, N. S., & Oleas-Vásconez, J. E. (2025). Rediseño de iluminación del gimnasio de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Guayaquil basado en eficiencia energética.

CRE. (2016). *Permisos Administrados de Generación, Importación y Exportación de Energía Eléctrica.* Disponible en: https://www.gob.mx/cre/acciones-y-programas/micrositio-de-permisos-en-materia-de-generacion-de-energia-electrica

CRE. (2019). *Simulador de consumo*. CRE. Disponible en: https://www.cre.com.bo/entender-mi-consumo/simulador-de-consumo/

CRE. (2021). *Tabla de electricidad generada por insumo primario, por tecnología y por permisionario a nivel nacional,* Disponible en: https://datos.gob.mx/busca/dataset/generacion-de-energia-electrica-por-insumo-energetico-por-tecnologia-y-por-permisionario/resource/84628a43-be17-4696-95fd-da981ef86a57

CRE. (2023). *Permisos Administrados de Generación, Importación y Exportación de Energía Eléctrica,* Disponible en: https://www.gob.mx/cre/acciones-y-programas/micrositio-de-permisos-en-materia-de-generacion-de-energia-electrica

Cui, D., Chen, X., Xue, Y., Li, R., & Zeng, W. (2019). An integrated approach to investigate the relationship of coupling coordination between social economy and water environment on urban scale - A case study of Kunming. *Journal of Environmental Management*,*234*,189-199. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.091

Dargin, J., Daher, B., & Mohtar, R. H. (2019). Complexity versus simplicity in water energy food nexus (WEF) assessment tools. *Science of The Total Environment*, *650*, 1566-1575. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.080

Delgado, W., Córdova, A., Beach, T., & Luzzadder-Beach, S. (2024). Economic feasibility of integrating solar energy into water utility operations in Ciudad Juárez, Mexico. *Water-Energy Nexus*, *7*, 77-86. https://doi.org/10.1016/j.wen.2024.02.001

Durán–Álvarez, J. C. & Jiménez–Cisneros, B. (2014). Beneficial and Negative Impacts on Soil by the Reuse of Treated/Untreated Municipal Wastewater for Agricultural Irrigation – A Review of the Current Knowledge and Future Perspectives. In C. H.-S. Maria (Ed.), *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination* (Vol. 5). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/57226

Durán-Álvarez, J., Rodríguez-Varela, M. & Prado, B. (2021). The Mezquital Valley from the perspective of the new Dryland Development Paradigm (DDP): present and future challenges to achieve sustainable development. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *48*, 139-150. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.01.005

Durán-Álvarez, J. C., Jiménez-Cisneros, B., Rodríguez-Varela, M. & Prado, B. (2021). The Mezquital Valley from the perspective of the new Dryland Development Paradigm (DDP): present and future challenges to achieve sustainable development. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *48*, 139-150. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.01.005

Durán-Álvarez, J., Prado, B., Zanella, R., Rodríguez-Varela, M. & Díaz, S. (2023). Wastewater surveillance of pharmaceuticals during the COVID-19 pandemic in Mexico City and the Mezquital Valley: A comprehensive environmental risk assessment. *Science of The Total Environment*, *900*, 165886. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165886

Egieya, J. M., Görgens, J., & Goosen, N. (2022). Chapter 2 - Some quantitative water–energy–food nexus analysis approaches and their data requirements. In T. Mabhaudhi, A. Senzanje, A. Modi, G. Jewitt, & F. Massawe (Eds.), *Water - Energy*

- *Food Nexus Narratives and Resource Securities* (pp. 15-31). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91223-5.00016-2

El-Sayed, A. H. A., Khalil, A., & Yehia, M. (2023). Modeling alternative scenarios for Egypt 2050 energy mix based on LEAP analysis. *Energy*, *266*, 126615. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126615

Elizagaray-Mandujano, J. L. (2021). *Uso del agua tratada de la planta de tratamiento de agua residual Atotonilco como alternativa rentable de riego en las zonas agrícolas del Valle del Mezquital*

Espira, L. M., Contreras, J. D., Félix-Arellano, E. E., Siebe, C., Mazari-Hiriart, M., Riojas-Rodríguez, H., & Eisenberg, J. N. S. (2024). A comparative analysis of regional infection risk due to wastewater recontamination in the Mezquital Valley, Mexico. *Science of The Total Environment*, 170615. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170615

Fernández-Badillo, L., & Goyenechea, I. (2010). Anfibios y reptiles del valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *81*, 705-712. https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2010.003.642

FIDE. (2015). ¿Sabes cuánto gastan? In FIDE (Ed.). Ciudad de México: FIDE.

Florentino-Vázquez A., A., L., Villagrana R., Loaiza, J. (2021). Consumo de energía en plantas de tratamiento-Benchmarking. *Aqua-LAC*, *13(1)*, 46-57. https://doi.org/doi:10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-04

Fuentes-Cortés, L. F., Rodríguez-Gutiérrez, J. E., López-Ramírez, M. D., & Martínez-Gutiérrez, N. (2023). Involving energy security and a Water–Energy-Environment nexus framework in the optimal integration of rural water–energy supply systems. *Energy Conversion and Management*, *293*, 117452. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117452

Galindo, L. M., Reyes Martínez, P. G., & González, F. (2022). Escenarios para la transición energética a una economía carbono neutral en América Latina y el Caribe: algunos hechos estilizados. *Sobre México Temas de Economía*, *1*(6), 5-39. https://doi.org/10.48102/rsm.v1i6.112

García-Arroyo, P. (2019). Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco, México. RETEMA. https://www.retema.es/articulos-reportajes/planta-tratamiento-aguas-residuales-atotonilco-mexico

García-Salazar, E. M. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, *29*(54), e19741. https://doi.org/10.24836/es.v29i54.741

Gold, G. M., & Webber, M. E. (2015). The Energy-Water Nexus: An Analysis and Comparison of Various Configurations Integrating Desalination with Renewable Power. *Resources*, *4*(2), 227-276. https://doi.org/10.3390/resources4020227

González-Estrada, A. (2016). Industrialización y transnacionalización de la agricultura mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *7(3), 693-707*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000300693

González-Méndez, B., Ruiz-Suárez, L. G., & Siebe, C. (2020). N2O emission factors from a wastewater irrigated land in a semiarid environment in Mexico. *Science of The Total Environment*, *709*, 136177. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136177

Grimaldo-Gallardo, J. (2018). *Desarrollo de una plataforma de modelos de producción de petrolíferos para el sistema nacional de refinación en México.* Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. Disponible en: http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/15916

Grubert, E. A. (2016). Water consumption from hydroelectricity in the United States. *Advances in Water Resources*, *96*, 88-94. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.07.004

Gutiérrez-Rojas, M., Ruiz-Juárez, D., Vela-Correa, G., Olivares-Orozco, J., & Rueda-Puente, E. (2022). Physical-chemical quality of xoconostle fruits (*Opuntia matudae and O. joconostle*) in the Valle del Mezquital, Hidalgo, Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, *24*, 96-110. https://doi.org/10.56890/jpacd.v24i.505

Hall, R., Kenway, S., O'Brien, K., & Memon, F. (2025). Quantification of residential water-related energy needs cohesion, validation and global representation to unlock efficiency gains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *207*, 114906. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114906

Han, X., Li, C., & Ma, H. (2021). Performance Studies and Energy-Saving Analysis of a Solar Water-Heating System. *Processes*, *9*, 1536. https://doi.org/10.3390/pr9091536

He, X., Li, Z., Xing, C., Li, Y., Liu, M., Gao, X., Ding, Y., Lu, L., Liu, C., Li, C., & Wang, D. (2023). Carbon footprint of a conventional wastewater treatment plant: An analysis of water-energy nexus from life cycle perspective for emission reduction. *Journal of Cleaner Production*, *429*, 139562. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139562

Heaps, C. G. (2022). *Low Emissions Analysis Platform*. In (Version 2024.1.1.4) Stockholm Environment Institute. Disponible en: https://leap.sei.org

Hendrickson, T. P., & Bruguera, M. (2018). Impacts of groundwater management on energy resources and greenhouse gas emissions in California. *Water Research*, *141*, 196-207. https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.012

Hernández-Espinosa, A. K., Otazo-Sánchez, E. M., Román-Gutiérrez, A. D., & Romo-Gómez, C. (2021). El Sistema de drenaje de la Ciudad de México. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI* 9(17), 24–30 https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17

Hernández-Espinosa, A. K., Otazo-Sánchez, E. M., Román-Gutiérrez, A. D., & Romo-Gómez, C. (2024). Estimación de los volúmenes históricos de las aguas residuales

exportados por la Megaciudad de México al Valle del Mezquital desde 1985 a 2020. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 15(5), 452-502. https://doi.org/10.24850/j-tyca-15-5-6

Hernández, M. A. (2020). *La transición energética en México. Un objetivo de largo plazo. Crisis Climática, Transición Energética y Derechos Humanos en Crisis climática, transición energética y derechos humanos / eds.* Henry Jiménez Guanipa, Marisol Luna Leal; Florian Huber, Luis Roberto Barroso*,* Vol. 2, 2020*, pp. 395-408*. Fundación Heinrich Böll.

Hoff, H. (2011). *Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus.* The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm. Disponible en: /https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/SEI-Paper-Hoff-UnderstandingTheNexus-2011.pdf

International Energy Agency. (2020). *Renewable energy market update*. Disponible en: https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update

International Energy Agency. (2022). *Targeting 100% LED lighting sales by 2025*. Disponible en: Disponible en: https://www.iea.org/reports/targeting-100-led-lighting-sales-by-2025

International Energy Agency. (2024a). *Energy Efficiency 2024*. Disponible en: https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024,

International Energy Agency. (2024b). *Renewables 2024. Analysis and forecasts to 2030*. Disponible en: https://www.iea.org/reports/renewables-2024

INDESOL. (2011). *Desarrollo Regional en el Suroeste del Valle del Mezquital. Diagnóstico y propuestas.* SEDESOL. Disponible en: http://indesol.gob.mx/cedoc/pdf/III.%20Desarrollo%20Social/Desarrollo%20Regional/Desarrollo%20Regional%20en%20el%20Suroeste%20del%20Valle%20del%20Mezquital%20Diagn%C3%B3stico%20y%20Propuestas%202011.pdf

INECC. (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México*. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf

INEGI. (1970). *Censo Agrícola-Ganadero y Ejidal* (Vol. V). INEGI. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825111144/702825111144_1.pdf

INEGI. (1991). *Censo Agrícola-Ganadero y Ejidal* (Vol. VII). INEGI. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825116545/702825116545_40.pdf

INEGI. (2014). *Censos Económicos 2014.* Disponible en: https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2014/

INEGI. (2015a). *Encuesta Intercensal 2015* https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/#Tabulados

INEGI. (2015b). *Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (ENDUTIH).* Disponible en: https://www.inegi.org.mx/programas/dutih/2015/#Tabulados

INEGI. (2015c). *Principales resultados de la Encuesta Intercensal 2015 : Hidalgo*. INEGI. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/inter_censal/estados2015/702825079789.pdf

INEGI. (2016). *Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo*. INEGI. Disponible en: https://inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825083748

INEGI. (2018). *Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI).* Disponible en: https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/default.html#tabulados

INEGI. (2020a). *POBLACIÓN TOTAL Y TASA DE CRECIMIENTO PROMEDIO ANUAL, 1895-2020* INEGI. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020_pres_res_hgo.pdf

INEGI. (2020b). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII* Ciudad de México, CONABIO. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s7gw

INEGI. (2020c). *Vehículos de Motor Registrados en Circulación.* Disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/descarga/?ti=6

INEGI. (2022). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. Disponible en: https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/

IPCC. (2015). Assessing Transformation Pathways. In C. Intergovernmental Panel on Climate (Ed.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report* (pp. 413-510). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416.012

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Jiménez-Ramón, A. (2018). *Infraestructura para el aprovechamiento integral del agua* Abasto, Inundaciones y Reúso del Agua en el Valle de México. Disponible en: https://comisiones.senado.gob.mx/cienciaytecnologia/docs/eventos/310119_3.pdf

Kahe, S., Sharif, A., Joda, F., Avami, A., & Kianbakhsh, A. (2023). Water-energy nexus in the combined cycle power plant using energy, exergy, economic and environmental analyses. *Energy Conversion and Management*, *293*, 117493. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117493

Kang, J., Xu, L., Ren, X., Li, C., Jia, Z., Li, J., & Zhang, Y. (2024). An integrated assessment and prediction approach of water-energy nexus at the provincial scale: A case study of Inner Mongolia, China. *Energy*, *291*, 130438. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130438

Kholod, N., Evans, M., Khan, Z., Hejazi, M., & Chaturvedi, V. (2021). Water-energy-food nexus in India: A critical review. *Energy and Climate Change*, *2*, 100060. https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100060

Kitessa, B. D., Ayalew, S. M., Gebrie, G. S., & Teferi, S. T. (2020). Quantifying water-energy nexus for urban water systems: A case study of Addis Ababa city. *AIMS Environmental Science*, *7*(6), 486-504. https://doi.org/10.3934/environsci.2020031

Lara-Figueroa, H. N., & García-Salazar, E. M. (2019). Prevalencia de enfermedades asociadas al uso de agua contaminada en el Valle del Mezquital. *Entreciencias*, *7(21)*, 91-106. https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2019.21.69636

Lara-Viveros, F. M., Ventura-Maza, A., Ehsan M., Rodríguez-Ortega, A., Vargas-Montier, J., Landero-Valenzuela, N. (2015). Contenido de Cd Y Pb en suelo y plantas de diferentes cultivos irrigados con aguas residuales en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, *31(2)*, 127-132. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992015000200002&script=sci_abstract

Larrington-Spencer, H., Browne, A., & Petrova, S. (2024). Everyday domestic water and energy consumption in Shanghai homes: The resurgence and persistence of gendered practices in China. *Energy Research & Social Science*, *107*, 103361. https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103361

Lesser-Carrillo, L. E., Arellano-Islas, S., Lesser-Illades, J. M., & González-Posadas, D. (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *28*(3), 323-336. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742011000300001

Lesser, L. E., Mora, A., Moreau, C., Mahlknecht, J., Hernández-Antonio, A., Ramírez, A. I., & Barrios-Piña, H. (2018). Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere*, *198*, 510-521. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.154

Li, S., Kong, W., Wang, Y., & Yuan, L. (2024). Medium and long-term energy demand forecasts by sectors in China under the goal of "carbon peaking & carbon neutrality": Based on the LEAP-China model. *Energy*, *310*, 133017. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133017

López-Aguilar, F., Fournier, P. (2009). Espacio, tiempo y asentamientos en el Valle del Mezquital: un enfoque comparativo con los desarrollos de William T. Sanders. *Cuicuilco*, *16(47)*, 113-146. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-16592009000300006

Mabhaudhi, T., Senzanje, A., Modi, A., Jewitt, G., & Massawe, F. (2022). Chapter 17 - WEF nexus narratives: toward sustainable resource security. In T. Mabhaudhi, A. Senzanje,

A. Modi, G. Jewitt, & F. Massawe (Eds.), *Water - Energy - Food Nexus Narratives and Resource Securities.* Elsevier. pp. 321-326. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91223-5.00009-5

MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, *1(14)*, 281-297. Disponible en: https://projecteuclid.org/ebooks/berkeley-symposium-on-mathematical-statistics-and-probability/Proceedings-of-the-Fifth-Berkeley-Symposium-on-Mathematical-Statistics-and/chapter/Some-methods-for-classification-and-analysis-of-multivariate-observations/bsmsp/1200512992

Maduekwe, M., Akpan, U., & Isihak, S. (2020). Road transport energy consumption and vehicular emissions in Lagos, Nigeria: An application of the LEAP model. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *6*, 100172. https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100172

Mahlknecht, J., González-Bravo, R., & Loge, F. J. (2020). Water-energy-food security: A Nexus perspective of the current situation in Latin America and the Caribbean. *Energy*, *194*, 116824. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116824

Martínez-Guerrero, M. C., Peña-Prado, P. K., Aguilar-Hernández, J., Domínguez-García, S., Hernández-Jiménez, V., Martínez-Vázquez, R., Montoya-Campos, V. (2024). Implementación de calentadores solares como alternativa al uso de gas LP. *Memorias Del Concurso Lasallista De Investigación, Desarrollo E innovación*, *11(1)*, 132–136. https://doi.org/10.26457/mclidi.v11i1.4241

Martínez-López, P. M. (2024). *Estudio de la Matriz Energética Mexicana: Una proyección hacia una alternativa para el desarrollo sostenible.* Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. Disponible en: https://riunet.upv.es/handle/10251/207866

Martínez-Torres, C. J., & González-Gómez, D. (2016). Productividad en el sector manufacturero del Estado de Hidalgo. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, *4(8)*. https://doi.org/10.29057/icea.v4i8.223

Meng, L., Shi, W., Li, Y., Li, X., Tong, X., & Wang, Z. (2023). Janus membranes at the water-energy nexus: A critical review. *Advances in Colloid and Interface Science*, *318*, 102937. https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.102937

Monroy-Ata, A., Valdés-Vásquez, I., & Becerril, J. (2023). Configuración del establecimiento de *Prosopis laevigata* (mezquite) en un mosaico de matorral xerófilo del Valle del Mezquital, Hidalgo. En: Bautista F. y Ayala F (eds) Hacia un conocimiento global y multidisciplinario del recurso suelo. pp. 54-58. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/377659255_Configuracion_del_establecimiento_de_Prosopis_laevigata_mezquite_en_un_mosaico_de_matorral_xerofilo_del_Valle_del_Mezquital_Hidalgo

Montelongo-Reyes, M. M. (2015). *Emisiones de gases de efecto invernadero y su mitigación en el Valle del Mezquital: Categoría energía 2005 – 2040. Tesis de doctorado.*

Univerisdad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Mineral de la Reforma. Disponible en: http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/jspui/handle/231104/2072

Montelongo-Reyes, M. M., Otazo-Sánchez, E. M., Romo-Gómez, C., Gordillo-Martínez, A. J., & Galindo-Castillo, E. (2015). GHG and black carbon emission inventories from Mezquital Valley: The main energy provider for Mexico Megacity. *Science of The Total Environment*, *527-528*, 455-464. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.129

Nieves, J. A., Aristizábal, A. J., Dyner, I., Báez, O., & Ospina, D. H. (2019). Energy demand and greenhouse gas emissions analysis in Colombia: A LEAP model application. *Energy*, *169*, 380-397. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.051

Oliveira, M. C., Iten, M., Matos, H. A., & Michels, J. (2019). Water–Energy Nexus in Typical Industrial Water Circuits. *Water*, *11*(4), 699. https://doi.org/10.3390/w11040699

ONU. (2011). *Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus-Water Resources in the Green Economy?* United Nations. Disponible en: https://sdgs.un.org/events/bonn-2011-conference-water-energy-and-food-security-nexus-water-resources-green-economy-6790

ONU. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Disponible en https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content

Otazo-Sánchez, E. M., Pavón, N. P., Bravo-Cadena, J., Pulido, M. T., López-Pérez, S., Razo-Zárate, R.,, González-Ramírez, C. A., Sánchez-Rojas, G., Martín-Hernández, C. Y., Fragoso-López, P. I., Rodríguez-Laguna, R.,, Galindo-Castillo, E., Vargas-Zenteno, M., Velázquez-Alonso, F., Domínguez-Soto, J. M., Cruz-Domínguez, P. E., Maycotte-Morales, C. C., Pérez-Ramírez, N. G., Cortés-Blobaum, H. J., Herrera-Muñoz, G., Uribe-Gutiérrez, D. (2013). *Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Hidalgo. 1ra Edición.* (Vol. I). SEMARNATH. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/170327/2013_hgo_peacc_parte1.pdf

Palacios, R., Masera, O., Ferrari, L., Canales, D. . (2024). *Futuros energéticos para México al 2050. El camino para una transición energética justa y sustentable*. Pronace ecc-Conahcyt. Disponible en: https://secihti.mx/wp-content/uploads/pronaces/micrositios/energia_y_cambio_climatico/energia/cuadernos_tematicos/Cuaderno_9.pdf

Pan, S.-Y., Snyder, S. W., Packman, A. I., Lin, Y. J., & Chiang, P.-C. (2018). Cooling water use in thermoelectric power generation and its associated challenges for addressing water-energy nexus. *Water-Energy Nexus*, *1*(1), 26-41. https://doi.org/10.1016/j.wen.2018.04.002

Pérez-Díaz, J. P., Ortega-Escobar, H., Ramírez-Ayala, C., Flores-Magdaleno, H., Sánchez-Bernal, E. I., & Can-Chulim, A. M.-V., O. R. . (2019). Evaluación de la calidad del

agua residual para el riego agrícola en Valle del Mezquital, Hidalgo. *Acta Universitaria*, *vol.29*, 1-21. https://doi.org/10.15174.au.2019.2117

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, *40*(3), 394-398. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007

Pérez-Serrano, D., Cabirol, N., Martínez-Cervantes, C., & Rojas-Oropeza, M. (2021). Mesquite management in the Mezquital Valley: A sustainability assessment based on the view point of the Hñähñú indigenous community. *Environmental and Sustainability Indicators*, *10*, 100113. https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100113

Peter, S., Kambule, N., Tangwe, S., & Yessoufou, K. (2022). Quantification of the Impact of Solar Water Heating and Influence of Its Potential Utilization through Strategic Campaign: Case Study in Dimbaza, South Africa. *Energies*, *15*(21).

PROFECO. (2013). Lavadoras automáticas. La ropa sucia se lava en casa. *La revista del consumidor de Mayo 2013*, 44, 48. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/100438/RC435_Estudio_Lavadoras_Automaticas.pdf

QGIS. (2023). *QGIS Geographic Information System*. In QGIS Association. Disponible en: http://www.qgis.org

Quezada-Ramírez, M. F. (2008). *La migración hñähñú del Valle del Mezquital* (1ra edición). Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas. Disponible en: https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/5443/migracion_hnahnu_valle_mezquital.pdf

Quezada-Ramírez, M. F. (2018). Migración internacional y desarrollo local: la experiencia de dos localidades otomíes del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Región y sociedad*, *No.73*, 33. https://doi.org/10.22198/rys.2018.73.a975

Raza, M. A., Khatri, K. L., Israr, A., Haque, M. I., Ahmed, M., Rafique, K., & Saand, A. S. (2022). Energy demand and production forecasting in Pakistan. *Energy Strategy Reviews*, *39*, 100788. https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100788

Ren, H., Wu, Q., He, W., Wang, W., Luo, X., Li, Q., & Jiang, Z. (2022). Research on Regional low-carbon development path based on LEAP model: Taking the Lin-gang Special Area as an example. *Energy Reports*, *8*, 327-335. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.141

Reynoso-Ocampo, C. A., Arroyo-Cruz, C., Salazar-Cervantes, L., González-Nava, Y., & Martín-Espíritu, M. I. (2022). Evaluación de la digestibilidad in vitro de proteínas de insectos comestibles del Valle del Mezquital. *Theorema Revista Científica*, *18*, 46-56. (UTCJ) Disponible en: http://intranet.utvm.edu.mx/biblioteca/admin/repositorio/Archivos/PROC/27-10-2022/5PA.pdf

Rodarte-García, R., Gutiérrez, M. de L., Galindo-Escamilla, E. (2011). *Hidalgo, Desarrollo y Regionalización: Dos estudios para el desarrollo.* (Vol. I). UEAH. Disponible en: https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/1493/

Sánchez–González, A., Chapela–Lara, M., Germán–Venegas, E., Fuentes-García, R., Río-Portilla, F. d., & Siebe, C. (2017). Changes in quality and quantity of soil organic matter stocks resulting from wastewater irrigation in formerly forested land. *Geoderma*, *306*, 99-107. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.009

Sanjuan-Trejo, G., Mejía-Segovia, D. M., & Moreno, C. (2020). Ensambles de artrópodos asociados a los frutos de garambullo (Myrtillocactus geometrizans) en dos localidades del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *92*, 1-11. https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2021.92.3487

Sarikhani, A., Joda, F., Ledari, M. B., & Akbarnavasi, H. (2023). Fostering self-sustaining water-energy regions: A nexus approach to mitigate water scarcity. *Sustainable Production and Consumption*, *43*, 230-250. https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.021

Secretaría del Bienestar, (2016). Uso doméstico de combustibles. *Secretaría de Bienestar Blog*. Disponible en: https://www.gob.mx/bienestar/es/articulos/uso-domestico-de-combustibles

Secretaría de Economía, (2015). *Información económica y estatal de Hidalgo*. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/43794/Hidalgo.pdf

Secretaría de Economía, (2023). *Data México*. Secretaría de Economía. https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/san-agustin-tlaxiaca#population-and-housing

SENER-NOM-004-SEDG-2004 Instalaciones de aprovechamiento de Gas L.P. Diseño y construcción, (2004). Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717183&fecha=02/12/2004#gsc.tab=0

SENER-NOM-003-ENER-2011, Eficiencia térmica de calentadores de agua para uso doméstico y comercial, (2011). Disponible en: https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4458/sener/sener.htm

SENER. (2015a). *Balance Nacional de Energía*. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/248570/Balance_Nacional_de_Energ_a_2015__2_.pdf

SENER. (2015b). *Elaboración de productos petrolíferos por refinería.* Disponible en: https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions

SENER. (2015c). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN)*. Disponible en: https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-7850

SENER. (2016). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN)*. SENER. Disponible en: https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-7850

SENER. (2023). *Informe del Sector Eléctrico 2022.* Disponible en: https://www.gob.mx/sener/documentos/informe-del-sector-electrico-2022

Senzanje, A., Mudhara, M., & Tirivamwe, L. (2022). Chapter 10 - The water–energy–food nexus as an approach for achieving sustainable development goals 2 (food), 6 (water), and 7 (energy). In T. Mabhaudhi, A. Senzanje, A. Modi, G. Jewitt, & F. Massawe (Eds.), *Water - Energy - Food Nexus Narratives and Resource Securities* (pp. 181-198). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91223-5.00014-9

Sharma, A. K., & Chani, P. S. (2024). Embodied water-energy nexus towards sustainable building construction: Case of conventional Indian houses. *Journal of Building Engineering*, *83*, 108453. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108453

Shi, C., Qin, G., Tan, Q., Yang, J., Chen, X., Liu, Q., Zhang, T., & Kammen, D. M. (2024). Simulation of hydrogen transportation development path and carbon emission reduction path based on LEAP model - A case study of Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Energy Policy*, *194*, 114337. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114337

SIAP. (1985). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/

SIAP. (1985-2020). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/

SIAP. (2005). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/

SIAP. (2010). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/

SIAP. (2015). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/

SIAP. (2020). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/

Simpson, G. B., & Jewitt, G. P. W. (2019). The water-energy-food nexus in the anthropocene: moving from 'nexus thinking' to 'nexus action'. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *40*, 117-123. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.10.007

Soheilian, M., Fischl, G., & Aries, M. (2021). Smart Lighting Application for Energy Saving and User Well-Being in the Residential Environment. *Sustainability*, *13*(11).

Spang, E. S., Moomaw, W. R., Gallagher, K. S., Kirshen, P. H., & Marks, D. H. (2014a). Multiple metrics for quantifying the intensity of water consumption of energy production. *Environmental Research Letters*, *9*(10), 105003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105003

Spang, E. S., Moomaw, W. R., Gallagher, K. S., Kirshen, P. H., & Marks, D. H. (2014b). The water consumption of energy production: an international comparison. *Environmental Research Letters*, *9*(10), 105002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105002

Suárez, C. H. (2016). El Derecho Humano al Agua y el Saneamiento. Retos para hacerlo efectivo a regantes de aguas negras del Valle del Mezquital, Hidalgo, México.

Ciencia y Universidad, 34(enero-junio), 115-148. Disponible en: https://revistas.uas.edu.mx/index.php/CYU/article/view/464/319

Suárez, C. H. (2024). Neoliberalismo, aguas y riego en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Regiones y Desarrollo Sustentable*, *24*(45), 1-24. https://doi.org/10.63042/vpmmm925

Sun, P., Elgowainy, A., Wang, M., Han, J., & Henderson, R. J. (2018). Estimation of U.S. refinery water consumption and allocation to refinery products. *Fuel*, *221*, 542-557. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.089

Sušnik, J., Masia, S., & Jewitt, G. (2022). Scales of application of the WEF nexus approach. In T. Mabhaudhi, A. Senzanje, A. Modi, G. Jewitt, & F. Massawe (Eds.), *Water - Energy - Food Nexus Narratives and Resource Securities.* Elsevier. Chapter 4, pp. 49-65. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91223-5.00007-1

Tagle-Zamora, D., Álvarez-Castañón, L. del C. (2019). Calentadores solares de agua para viviendas vulnerables en Guanajuato: ¿estrategia socioambiental? *Vivienda Y Comunidades Sustentables*, *5*, 11–22. https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i5.98

Talaei, A., Ahiduzzaman, M., & Kumar, A. (2018). Assessment of long-term energy efficiency improvement and greenhouse gas emissions mitigation potentials in the chemical sector. *Energy*, *153*, 231-247. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.032

Tan, A. H. P., Yap, E. H., Abakr, Y. A., Lechner, A. M., Mustafa, M. A., & Massawe, F. (2022). Chapter 13 - The Water–Energy–Food nexus as a rallying point for sustainable development: emerging lessons from South and Southeast Asia. In T. Mabhaudhi, A. Senzanje, A. Modi, G. Jewitt, & F. Massawe (Eds.), *Water - Energy - Food Nexus Narratives and Resource Securities* (pp. 235-256). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91223-5.00015-0

Tietie, D. E. O., Diemuodeke, E. O., Owebor, K., Okereke, C., Abam, F. I., & Njoku, H. I. (2021). Long-term energy demand-side modelling of nigerian household sector. *Energy and Climate Change*, *2*, 100065. https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100065

Toriz-Robles, N., Ramírez-Guzmán, M. E., Fernández-Ordoñez, Y. M., Soria-Ruiz, J., Ybarra-Moncada, M. C. (2016). *Comparación de modelos lineales y no lineales para estimar el riesgo de contaminación de suelos por metales pesados.* Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/311226229_COMPARACION_DE_MODELOS_LINEALES_Y_NO_LINEALES_PARA_ESTIMAR_EL_1_RIESGO_DE_CONTAMINACION_DE_SUELOS_POR_METALES_PESADOS

Trubetskaya, A., Horan, W., Conheady, P., Stockil, K., & Moore, S. (2021). A Methodology for Industrial Water Footprint Assessment Using Energy-Water-Carbon Nexus. *Processes*, *9*(2). 393; https://doi.org/10.3390/pr9020393

Urbano-Juárez, N. (2023). Transición energética en México, retos y desafíos. *Revista Lex, 6(22), 308.* https://doi.org/10.33996/revistalex.v6i22.163

Valek, A. M., Sušnik, J., & Grafakos, S. (2017). Quantification of the urban water-energy nexus in México City, México, with an assessment of water-system related carbon

emissions. *Science of The Total Environment*, *590-591*, 258-268. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.234

Valencia, F. (2024). Calentadores solares instalados en la CDMX reducen emisiones de dióxido de carbono. *Heraldo de México*. Disponible en: https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2024/9/15/calentadores-solares-instalados-en-la-cdmx-reducen-emisiones-de-dioxido-de-carbono-637837.html

Villavicencio, D., Millán, J. C. (2020). La transición energética en México: disyuntivas, tensiones y avances en la ejecución del proyecto nacional. *Caravelle*, *115*, 25-40. https://doi.org/10.4000/caravelle.8635

Voinov, A., Cardwell, H. (2009). El nexo energía-agua: ¿Por qué debería importarnos? *Revista de investigación y educación contemporáneas sobre el agua. 143(1)*, 17-29. https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2009.00061.x

Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, *467*(7315), 555-561. https://doi.org/10.1038/nature09440

Walker, S., Jacobs-Mata, I., Fakudze, B., Phahlane, M. O., & Masekwana, N. (2022). Applying the WEF nexus at a local level: a focus on catchment level. In T. Mabhaudhi, A. Senzanje, A. Modi, G. Jewitt, & F. Massawe (Eds.), *Water - Energy - Food Nexus Narratives and Resource Securities*. Elsevier. Chapter 7, 111-144. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91223-5.00006-X

Wen, J., Wang, S., Yu, S., Wang, K., Zhang, R., & Li, W. (2024). Low-carbon transition paths and benefits for the power sector at city level: A case study in Zhengzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, *450*, 141852. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141852

WHO. (2024). *Ambient air pollution: Health impacts.* Disponible en: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Wichelns, D. (2017). The water-energy-food nexus: Is the increasing attention warranted, from either a research or policy perspective? *Environmental Science & Policy*, *69*, 113-123. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.018

Wu, H., Zeng, X., Zhang, L., Liu, X., Jiang, S., Dong, Z., Meng, X., & Wang, Q. (2023). Water-energy nexus embedded in coal supply chain of a coal-based city, China. *Resources Policy*, *85*, 103812. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103812

Xu, S., He, W., Shen, J., Degefu, D. M., Yuan, L., & Kong, Y. (2019). Coupling and Coordination Degrees of the Core Water–Energy–Food Nexus in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(9). 1648; https://doi.org/10.3390/ijerph16091648

Yang, N., Yang, J., Pang, M., Zhang, P., Chang, Y., Zhang, L., Hao, Y., & Chen, Y. (2023). Decarbonization of the wind power sector in China: Evolving trend and driving

factors. *Environmental Impact Assessment Review*, *103*, 107292. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107292

Yang, Z., Kondolf, G. M., Du, J., & Cai, L. (2023). City Water Resource Allocation Considering Energy Consumption in Jinan, China. *Water*, *15*(16), 3016; https://doi.org/10.3390/w15163016

Yu, K., Song, Y., Lin, J., & Qu, S. (2025). Evaluating complementaries among urban water, energy, infrastructure, and social Sustainable Development Goals in China. *Journal of Environmental Sciences*, *149*, 585-597. https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.01.051

Zha, D., Jiang, P., Zhang, C., Xia, D., & Cao, Y. (2023). Positive synergy or negative synergy: An assessment of the carbon emission reduction effect of renewable energy policy mixes on China's power sector. *Energy Policy*, *183*, 113782. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113782

Zhai, H., Rubin, E. S., & Versteeg, P. L. (2011). Water Use at Pulverized Coal Power Plants with Postcombustion Carbon Capture and Storage. *Environmental Science & Technology*, *45*(6), 2479-2485. https://doi.org/10.1021/es1034443

Zhang, C., & Luo, H. (2023). Research on carbon emission peak prediction and path of China's public buildings: Scenario analysis based on LEAP model. *Energy and Buildings*, *289*, 113053. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113053

Zhang, X., Yin, S., Lu, X., Liu, Y., Wang, T., Zhang, B., Li, Z., Wang, W., Kong, M., & Chen, K. (2025). Establish of air pollutants and greenhouse gases emission inventory and co-benefits of their reduction of transportation sector in Central China. *Journal of Environmental Sciences*, *150*, 604-621. https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.12.025

Zhao, P., Li, S., Shen, Y., Gu, C., Shan, L., Luo, T., Wang, J., & Cao, Z. (2024). Water-Energy Nexus in Power Systems: A Review. *Qeios*. 6, 1-22. https://doi.org/10.32388/SFEDFM.2

Zhou, Y., Ma, M., Kong, F., Wang, K., & Bi, J. (2018). Capturing the co-benefits of energy efficiency in China — A perspective from the water-energy nexus. *Resources, Conservation and Recycling*, *132*, 93-101. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.019

8. RECOMENDACIONES ACADÉMICAS

- Desarrollar un modelo que contribuya a la prevención de inundaciones en la región, incorporando variables hidrológicas, urbanísticas y climáticas.
- Cuantificar la influencia directa de los volúmenes específicos de agua superficial recibida en cada municipio del Valle del Mezquital introduciendo la variable tiempo, mediante técnicas de *machine learning* e inteligencia artificial para los indicadores de la base de datos que se posee, con el propósito de comprender la relación entre gestión hídrica del agua importada y progreso municipal.
- Elaborar un estudio de pobreza energética en los municipios más marginados del Valle del Mezquital, enfocándose en hogares sin acceso a energía o con dificultades para costear servicios energéticos básicos.
- Estudiar la vulnerabilidad del Valle del Mezquital bajo escenarios de sequías y lluvias intensas, frente a variaciones climáticas críticas, facilitando la identificación de riesgos y la propuesta de estrategias para fortalecer la resiliencia regional ante las perspectivas de aumento de las aguas negras provenientes de la ZMCM.
- Realizar un estudio del Nexo Alimento-Energía en el Valle del Mezquital, iniciando con el cálculo del consumo de combustible en el transporte terrestre (*on-road*) y en la maquinaria agrícola (*off-road*), para evaluar con mayor precisión el impacto energético en la producción agrícola y en la cadena alimentaria local, así como identificar oportunidades para la implementación de tecnologías más eficientes y el uso de energías renovables, contribuyendo así a la sostenibilidad del sector agroalimentario en la región.
- Realizar un estudio comparativo de los indicadores de intensidad hídrica en la generación eléctrica de diferentes centrales en México, con el propósito de evaluar su grado de sostenibilidad. Mediante esta investigación se identifican las tecnologías y los estados con mejores indicadores del nexo Agua-Energía para la generación eléctrica y diseñar estrategias de gestión eficiente.
- Evaluar la relación costo-beneficio para las medidas de mitigación propuestas calentadores solares, focos LED y cogeneración industrial, considerando el ahorro energético estimado con el objetivo de apoyar la toma de decisiones en políticas públicas y estrategias de inversión.

9. RECOMENDACIONES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

- Promover la instalación de paneles solares y estufas de concentración térmica en viviendas de zonas rurales del Valle del Mezquital, mediante incentivos económicos y asistencia técnica, con la finalidad de mitigar emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad de vida en municipios con menor desarrollo, promoviendo la equidad energética y la sostenibilidad regional.
- Impulsar proyectos que garanticen el acceso al agua en la zona norte del valle, donde actualmente existen limitaciones en el suministro. Estas acciones favorecerán un desarrollo regional más equitativo por el acceso a los recursos hídricos.
- Promover el uso de bombas solares para el suministro de agua potable en el sector de servicios públicos, permitiendo aumentar la eficiencia energética y reducir costos operativos, garantizando un acceso sostenible y constante de agua.
- Impulsar la adopción de sistemas de cogeneración y tecnologías limpias en las industrias de materiales de construcción y química a través de incentivos y programas de apoyo técnico, lo que permitirá optimizar el consumo energético y disminuir emisiones contaminantes.
- Promover inversiones y mantenimiento continuo en la red de drenaje sanitario en todas las localidades del Valle del Mezquital, con el objetivo de reducir la contaminación por patógenos y daños ambientales, mejorando la salud pública y la calidad ambiental.
- Diseñar e implementar un plan de revestimiento para los canales de riego en el Valle del Mezquital, orientado a prevenir la propagación de patógenos y mejorar la calidad del agua. Además, construir un sistema de compuertas para optimizar la gestión del riego, contribuyendo a una gestión hídrica más eficiente y sostenible.
- Incentivar el uso de sistemas de bombeo solar en los distritos de riego del Valle del Mezquital para avanzar en la tecnificación agrícola, mejorar la eficiencia en el uso del agua y reducir los costos asociados al consumo energético.
- Implementar sistemas de captación y almacenamiento de agua pluvial en comunidades rurales, especialmente en la zona norte del Valle del Mezquital, con el objetivo de reducir la dependencia de suministros externos y mejorar la disponibilidad hídrica para usos domésticos y agrícolas.

- Desarrollar campañas educativas y programas de sensibilización dirigidos a todos los sectores productivos para fomentar el uso responsable del agua y la energía. Estas acciones incluirán talleres, materiales informativos y actividades comunitarias que impulsen prácticas sostenibles, contribuyendo a la conservación de los recursos naturales.

10. ANEXOS

PRODUCTOS REALIZADOS DURANTE EL DOCTORADO

Producción científica en eventos académicos

Hernández-Espinosa, A. K. (2020) Los sistemas de drenaje de la Ciudad de México. "Foro sobre la apropiación social de Tecnologías para la gestión sostenible del agua". Organizado por la Red temática de la gestión y calidad de agua, la UTIM, CIBA y CONACYT del 28 al 30 de octubre de 2020 en formato virtual.

Hernández-Espinosa A. K., Otazo-Sánchez E. M., Romo-Gómez C., Román-Gutiérrez A. D., Galindo-Castillo E., González-Ramírez C. A. (2022) Estimación de los volúmenes históricos de agua residual de la megaciudad de México hacia el Valle del Mezquital. 6TH conferencia IWA-México "Young Water Professionals". Organizado por la Universidad Tecnológica de Culiacán del 25 al 27 de mayo de 2022 en formato virtual.

Hernández-Espinosa, A. K. (2023) Agua residual de la Ciudad de México: fuerza impulsora del desarrollo socioeconimco del Valle del Mezquital. 4° Seminario Virtual Diáspora Hídrica “Jóvenes Mexicanos Explorando las Fronteras del Conocimiento del Agua”. Organizado por la UNAM e IMTA del 5 al 7 de septiembre de 2023 en formato virtual.

Producto científico publicado

Hernández-Espinosa, A. K., Otazo-Sánchez, E. M., Román-Gutiérrez, A. D., & Romo-Gómez, C. (2024). Estimación de los volúmenes históricos de las aguas residuales exportados por la Megaciudad de México al Valle del Mezquital desde 1985 a 2020. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *Vol. 15, núm. 5*, 452-502. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-05-10

Sección (Nota)

Estimación de los volúmenes históricos de las aguas residuales exportados por la Megaciudad de México al Valle del Mezquital desde 1985 a 2020

Estimation of Mexico megacity wastewater volumes poured into the Mezquital Valley from 1985 to 2020

Resumen

El sistema de drenaje de la Ciudad de México es un sistema muy complejo, que cuenta con cuatro salidas artificiales de desalojo: el Gran Canal de Desagüe y los Emisores Central, Poniente y Oriente, que el agua residual y pluvial hacia el Valle del Mezquital, desde hace más de un siglo. Sin embargo, no se tienen registros de los volúmenes históricos del agua residual que ha recibido el Valle del Mezquital, y es necesario estudiar su variación para evitar eventos extremos y planear su manejo sustentable. Por ello se realizó una estimación del volumen anual durante el periodo de 1985 a 2020, cada cinco años. El promedio de precipitación aportada por las áreas metropolitanas fue de 648 hm³; la estimación promedio de descargas industriales y de servicios reportadas por REPDA fue de 117 hm³ y la población aumentó el vertido de aguas negras de 582 hm³ en 1985 a 803 hm³ en 2020. Este estudio desagrega los volúmenes aproximados que porta de cada emisor y los que reciben los ríos El Salto y El Salado. Se reporta por primera vez una estimación anual del volumen histórico de aguas residuales que han propiciado el desarrollo socioeconómico del Valle del Mezquital, permitiendo posteriores trabajos de escenarios futuros para la toma de decisiones y la prevención de desastres.

Palabras clave: Ciudad de México, agua residual, estimación de volumen, distribución espacial, sistema de drenaje

Producto científico enviado

Hernández-Espinosa, A. K., Brizuela-Rodriguez, C. A., Otazo-Sánchez, E. M., & Román-Gutiérrez, A. D. (2024). Desarrollo socioeconómico de los municipios del Valle del Mezquital, 1985-2020. Revista Iconos.

Desarrollo socioeconómico de los municipios del Valle del Mezquital, 1985-2020

Socioeconomic development of municipalities in the Mezquital Valley, 1985-2020

Ana Karen Hernández Espinosa*

Carlos Alberto Brizuela Rodríguez**

Elena María Otazo Sánchez***

Alma Delia Román Gutiérrez****

*Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Química, Dirección: Carretera Pachuca – Tulancingo km. 4.5, Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, Correo: he450518@uaeh.edu.mx, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6300-3768

**Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, División de Física Aplicada, Dirección: Carretera Ensenada - Tijuana No. 3918, Zona Playitas, CP. 22860, Ensenada, B.C., México, Correo: cbrizuel@cicese.mx, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4621-0380

***Consejo de Ciencia Tecnología e Innovación de Hidalgo, Dirección: Edificio Ciencia, Ex hacienda de la Concepción, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México, Correo: elenamariaotazo@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9324-8926

****Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Química, Dirección: Carretera Pachuca – Tulancingo km. 4.5, Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, Correo: aroman@uaeh.edu.mx, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0927-1061