



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SÁN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Trabajo de Tesis para Obtener el Título de Licenciatura
en Ingeniería Química

EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA- ALIMENTOS PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

PRESENTA:

P.I.Q. FRIDA ELIZABETH SAGGIANTE MAURO

ASESOR: DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA

Morelia, Michoacán, Agosto de 2020

A mi madre, porque su esfuerzo y amor son las razones por las que hoy estoy aquí, que me ha acompañado y amado incondicionalmente, que me enseñó con el ejemplo a hacer las cosas con y por amor, a no rendirme y a ver la luz en toda situación.

A ti, padre, que siempre te llevo conmigo, que siento tu luz y tu amor por donde quiera que vaya, que siempre has creído en mi, que voy de tu mano y que me enseñaste a escuchar mi corazón y a ser valiente para seguir mi destino.

A la madre Tierra y a la humanidad porque este trabajo está hecho con amor para servicio de todos.

AGRADECIMIENTOS

Gracias Dios por permitirme serte útil y servir a los demás. Gracias a mis padres Elizabeth Mauro y Gilberto Saggiante por todo su esfuerzo, por su amor y apoyo incondicional, por impulsarme a ser feliz y avivar mis sueños, por enseñarme a ambicionar las cosas que llenan el corazón por encima de las cosas mundanas.

Gracias a mi asesor, el Dr, Jose María Ponce Ortega por enseñar mediante el ejemplo y corregir con asertividad, por su paciencia y entrega al aprendizaje de sus alumnos; gracias a los maestros, que como él, contribuyeron a mi crecimiento como persona. Gracias a los profesores Arnulfo Marín y Reginaldo Mondragón por cada una de sus enseñanzas.

Gracias a mis amigos, que siempre han estado, aún a la distancia Diego, Andrés, Matías, son gran parte de lo que hoy soy y José y Mitzi, a quienes conocí en la aventura que hoy culmina, gracias por su gran apoyo y cariño.

Gracias a la universidad que me brindó la oportunidad de adquirir herramientas que me permitirán ser un factor de cambio que mejore las condiciones de vida actuales del ser humano y su relación con la naturaleza. Especial agradecimiento al FORDECYT que me permitió ser parte de este proyecto en el cual creo y estoy segura facilitará la resolución de problemáticas actuales y futuras.

Finalmente, gracias a todos los seres que han contribuido en mi formación, este logro es la suma de cientos (quizás miles) de lecciones adquiridas en el camino y hoy, no podría sentirme más afortunada. De corazón ¡GRACIAS!.

ÍNDICE

Dedicatoria.....	2
Agradecimiento.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
LISTA DE FIGURAS.....	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
I. INTRODUCCIÓN.....	9
II. JUSTIFICACIÓN.....	12
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
IV. ANÁLISIS Y PERSPECTIVAS DEL ESTRÉS POR RECURSOS EN EL MUNDO.....	14
IV.I Norteamérica y Sudamérica.....	14
IV.II Europa.....	15
IV.III Asia.....	16
IV.IV África.....	16
V. ANTECEDENTES.....	20
VI. OBJETIVO GENERAL.....	21
VII. OBJETIVOS PARTICULARES.....	21
VIII. MARCO TEÓRICO.....	22
IX. METODOLOGÍA.....	30
X. CASO DE ESTUDIO.....	33
X.I Seguridad Hídrica.....	34
X.II Seguridad Energética.....	36
X.III Seguridad Alimentaria.....	38
XI. RESULTADOS.....	40
XII. INDICADORES DE LOS OBJETIVOS Y METAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....	46
XIII. CONCLUSIONES.....	50
XIV. BIBLIOGRAFÍA.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estado de los indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para países con escasez de recursos.....	17
Tabla 2. Índices para medir la sostenibilidad o seguridad del WEF Nexus.....	28
Tabla 3. Características de las principales cuencas hidrológicas del estado de Sonora.....	35
Tabla 4. Características principales de las presas involucradas en el caso de estudio..	35
Tabla 5. Centrales eléctricas en Sonora.....	38
Tabla 6. Características de los principales distritos de irrigación en la región.....	39
Tabla 7. Tasa de crecimiento porcentual desde 2015 hasta 2030.....	43
Tabla 8. Indicadores de los Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible en Sonora.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interrelaciones del Agua, la Energía y los Alimentos.....	9
Figura 2. Cuencas hidrológicas del estado de Sonora.	10
Figura 3. Indicadores de Agua, Energía y Alimentos de acuerdo al reporte de los Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible para distintos países.....	19
Figura 4. Distribución Total del consumo de agua en Sonora.....	36
Figura 5. Producción primaria de energía de la región.....	37
Figura 6. Porcentaje de consumo de energía por sector en la región.....	37
Figura 7. Evaluación del índice de seguridad WEF para 2013, 2015, 2019, 2025 y 2030.	40
Figura 8. Evaluación del índice para 2019.....	42
Figura 9. Evaluación de los índices del WEF Nexus en 17 años.....	44
Figura 10. Producción y consumo de Agua, Energía y Alimentos en Sonora.....	45
Figura 11. Representación de los Indicadores de los Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible.....	49

RESUMEN

Con la alta tasa de crecimiento de la población en el mundo y los cambiantes patrones de consumo en torno al agua, la energía y los alimentos, es de gran interés estudiar la disponibilidad, uso y consumo de estos recursos, así como las interrelaciones que conllevan con el fin de identificar las sinergias que puedan existir entre ellos y las áreas de oportunidad, en las cuales implementar acciones que lleven a satisfacer las necesidades de la población, garantizando el acceso a estos en el futuro y que permitan que una región se desarrolle de manera sustentable. Es necesario contar con indicadores que cuantifiquen la disponibilidad, la oferta y la demanda de recursos para poder prever futuros escenarios y tener una idea más concisa de las políticas a implementar para evitar la sobreexplotación de recursos y usarlos óptimamente.

En este trabajo se presenta una estrategia sistemática para evaluar la seguridad del Nexo Agua-Energía-Alimentos (WEF Nexus por sus siglas en inglés) especialmente para regiones áridas y donde exista escasez de recursos. El índice “WEF Nexus” tiene como finalidad evaluar la disponibilidad, el acceso y la sostenibilidad de los recursos en distintos periodos de tiempo y puede ser considerado una herramienta eficaz y confiable para realizar proyecciones de futuros escenarios. También la evaluación del progreso de los Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible (SDG por sus siglas en inglés) se realiza para determinar los sectores con mayor vulnerabilidad en la región.

Para este estudio se consideró el caso de Sonora México, que es una región sumamente árida y por ello es más vulnerable a la escasez de recursos y que su capital actualmente es considerada la ciudad con el caso de abastecimiento de agua más severo de todo el país. Los resultados muestran que el sector energético es el más vulnerable por su capacidad limitada de producción, sin embargo, las proyecciones a 2030 muestran que el sector mejorará con la implementación de tecnologías renovables.

Palabras Clave: Agua, Energía, Alimentos, Nexo, Sostenibilidad.

ABSTRACT

With the current high rate of population growth in the world and the changing consumption patterns towards water, energy and food, it is of great interest to study the availability, use and consumption of these resources, as well as the interrelationships that they entail, in order to identify synergies that may exist among them and areas of opportunity, in which policies may be implemented leading to satisfy the needs of the population, seeking to guarantee future access to and allowing a region to develop in a sustainable way. It is essential to have indicators that quantify the availability, supply and demand of these resources to be able to foresee future scenarios and have a more concise idea of the policies to be implemented to avoid overexploitation of resources and make optimal use of them.

This work presents a systematic approach to evaluate the security of the Water-Energy-Food Nexus (WEF Nexus) specially for arid regions and where resource scarcity exists. The “WEF Nexus” index aims to assess the availability, access and sustainability of resources in different periods of time and can be considered an effective and reliable tool for making projections of future scenarios. The evaluation of the progress of the Sustainable Development Goals and Goals (SDG) is also carried out to determine the most vulnerable sectors in the region.

The state of Sonora in Mexico (whose capital is currently considered the city with the most severe water supply situation in the country) was used as case study, being an arid region, is most likely to present scarcity of resources. The results show that the energy sector is the most vulnerable due to its limited production capacity, however, projections made for 2030 show that the sector will improve with the implementation of renewable technologies.

Keywords: Water, Energy, Food, Nexus, Sustainability

INTRODUCCIÓN

México es un país conocido por su riqueza en recursos naturales, sin embargo, debido al cambio climático y al crecimiento desmesurado de la población y urbanización existen significativas modificaciones en el acceso a los mismos y se han generado grandes áreas de oportunidad para el manejo y uso óptimo y sustentable de los mismos. El agua, la energía y los alimentos están íntimamente relacionados entre sí y son esenciales para la subsistencia de los seres humanos. El agua es necesaria para los combustibles fósiles, la producción de electricidad y la agricultura. Se requiere energía para el tratamiento del agua y su distribución, para el almacenamiento de alimentos y para su producción, y por otra parte, la producción de alimentos puede contribuir a la existencia de combustible.¹ Cualquier cambio en la disponibilidad de alguno de estos recursos tiene fuertes efectos sobre la salud humana y su calidad de vida (**Figura 1**).

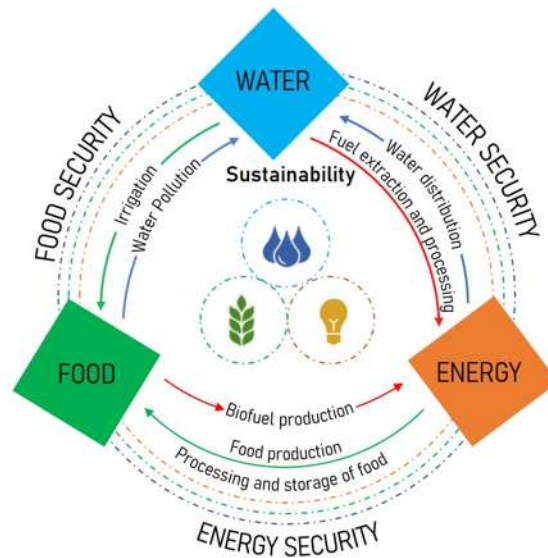


Figura 1. Interrelaciones del Agua, la Energía y los Alimentos.

El estudio del Nexo Agua-Energía-Alimentos permite identificar cómo el desempeño de un sector afecta al otro y tener una perspectiva integrada y coherente con la cual se puedan tomar decisiones más certeras y actuar en tiempo para garantizar el desarrollo sustentable y sostenible de la región. En este trabajo, se estudiará el caso

del estado de Sonora en México con énfasis en Hermosillo que es la ciudad capital del mismo. En Sonora se encuentra uno de los desiertos con las temperaturas más altas en el mundo, el desierto de Sonora, el cual cubre una extensión territorial de 311,000 km², cubriendo casi la totalidad del estado, lo cual lo hace más vulnerable a la escasez de agua, y por lo tanto de recursos energéticos y alimentarios.

Hermosillo se localiza en la parte central poniente del estado y según el censo de la población, en el 2010 contaba con una población de 784 342 habitantes (INEGI, 2010), y se considera que es **la ciudad con el problema de abastecimiento de agua más serio de todo el país.**

Observando la **Figura 2**, notamos que los ríos San Miguel y Zanjón son los más cercanos a la ciudad, los cuales solían desembocar en la presa Abelardo L. Rodríguez, la cual se utilizaba para suministrar agua a la capital.



Figura 2. Cuencas hidrológicas del estado de Sonora.

Hoy en día, se encuentra totalmente drenada. Debido a esto, a la sobreexplotación de las represas y a los tiempos prolongados de sequía extrema de esta región, se construyó un acueducto con la finalidad de cumplir con los requerimientos de la demanda de agua de la ciudad, transportándola así desde la presa "El Novillo" localizada a 152 km de la ciudad hasta la capital pero causando descontento en la población de Obregón, específicamente en los usuarios del agua de la región agrícola del Yaqui pues reclaman que corresponde a la ciudad de Obregón por asignación de derechos de riego. Esta decisión no sólo ha causado malestar social, sino que ha demostrado que es insostenible satisfacer las necesidades de agua para los distintos sectores, en especial el sector Agrícola que representa el 88% del consumo de agua del estado (CONAGUA, 2018), lo que hace que sea de total prioridad encontrar soluciones que además de resolver lo anteriormente mencionado, evite o disminuya lo máximo posible el deterioro ambiental que está provocando y que está poniendo en riesgo la funcionalidad y seguridad de la región y de sus habitantes.

JUSTIFICACIÓN

El estudio del Nexo Agua-Energía-Alimentos es una herramienta con la que se puede dar solución a problemáticas complejas que se presentan al intentar satisfacer la fuerte y cambiante demanda de estos recursos para satisfacer las necesidades de la población. Es común que, sin un estudio como este, se pueda escuchar decir del desabasto o insuficiencia de agua y esto matemáticamente no significa nada, pero para los ingenieros químicos es esencial pasar de lo cualitativo a lo cuantitativo y así predecir, por ejemplo, en cuánto tiempo se podrá abastecer una región con agua, o en este caso, utilizar los índices y decir que tan alejada se encuentra de la idealidad y obtener una imagen más concisa y real de la situación.

Algunos investigadores han determinado que el sector del agua es el más importante pues está íntimamente ligado a la supervivencia humana. El agua en calidad de consumo es un recurso escaso y que debe ser bien utilizado a nivel global. El agua es el vehículo principal que después impacta positiva o negativamente el sector alimentario y energético por lo que los tres deben ser evaluados. Una vez obtenida la cuantificación de los índices de la seguridad de los tres niveles, se tienen que establecer políticas que ayuden a mejorarla en lo humano puesto que, por ejemplo, no se puede propiciar que llueva, pero lo que sí se puede hacer es identificar áreas de oportunidad de mejora y evaluar su viabilidad buscando responder a ¿Cómo establecer políticas que ayuden a consumir adecuadamente los recursos disponibles?

No podemos aumentar la disponibilidad de algunos de estos recursos, pero como ingenieros químicos siempre se debe buscar optimizar su uso adecuado.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los mayores desafíos para lograr la sostenibilidad es garantizar la seguridad del agua, la energía y los alimentos. De esta manera, se introdujeron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para promover el desarrollo sostenible global y la protección del medio ambiente, reducir el hambre, mejorar la gestión de los recursos y la salud humana.

Se han propuesto varios enfoques para asegurar el suministro y la gestión sostenibles de los recursos; sin embargo, estos enfoques no abordan el estado de la seguridad del agua, la energía y los alimentos para los escenarios actuales y futuros, donde se espera que las condiciones cambien. Por lo tanto, la seguridad del WEF Nexus requiere ser cuantificada y abordada para brindar perspectivas sobre escenarios futuros, especialmente en regiones en desarrollo con escasez de recursos.

Este trabajo presenta un índice para medir la seguridad del agua, la energía y los alimentos que se puede aplicar a nivel nacional o regional para comparar los avances en la disponibilidad, acceso y sostenibilidad de los recursos.

Aunque se puede aplicar para evaluar el estado de cualquier región, este enfoque es potencialmente útil para regiones en desarrollo que sufren escasez de agua, energía o alimentos debido a sus condiciones geográficas o por los impactos del cambio climático. Los resultados obtenidos por el índice de seguridad del WEF podrían aportar políticas de mejoramiento de los sectores de la región para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible.

ANÁLISIS Y PERSPECTIVAS DEL ESTRÉS POR RECURSOS EN EL MUNDO

La escasez de recursos vinculada al cambio climático se está convirtiendo en un problema cada vez más complejo que amenaza el acceso mundial al agua, la energía y los alimentos. La escasez de agua es uno de los impactos más preocupantes del cambio climático tanto para las principales economías del mundo como para los países más pobres, lo que ha provocado un desajuste de seguridad para el Nexus. Se estima que casi el 52% de la población mundial enfrentará problemas de escasez de agua para 2050.² Por lo tanto, se deben hacer esfuerzos para construir un futuro sostenible. En esta sección se presentan algunos de los países que actualmente enfrentan escasez de agua y que también exhiben una distribución desigual de recursos. Estas regiones podrían potencialmente analizarse a través de los indicadores de seguridad WEF Nexus para brindar posibles soluciones que garanticen el acceso al agua, la energía y los alimentos en los próximos años.

NORTEAMÉRICA Y SUDAMÉRICA

Las Américas tienen abundantes recursos naturales, aunque están distribuidos de manera desigual en varios países. Los fenómenos meteorológicos extremos tienen el potencial de impedir el crecimiento económico de los países o regiones. En el caso de América del Norte, la región sur de los Estados Unidos (es decir, Texas, Nuevo México, Arizona, California) y la región norte de México (es decir, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Baja California) presentan condiciones de escasez de agua.

De manera similar, la inseguridad hídrica prevalece en algunos países de América del Sur como Chile, Bolivia, Ecuador, Perú y Argentina.³ Como varios países centroamericanos, el problema general de estos países es la distribución desigual entre la concentración de población y la disponibilidad de agua. La escasez de agua ha

afectado a algunos de los principales impulsores económicos, como es el caso de Texas en los Estados Unidos.⁴ Texas es uno de los líderes mundiales en la industria energética³ y tiene el mayor consumo de energía en los Estados Unidos, pero la disponibilidad de agua es uno de ellos. de los problemas económicos más urgentes que enfrenta el estado. Además, Texas es reconocida por su productividad alimentaria, ya que es el estado líder en Estados Unidos en términos de número total de granjas. Sin embargo, Texas no tiene la disponibilidad de agua necesaria para mantener la creciente producción de energía y alimentos. Por lo tanto, se deben abordar las interconexiones del nexo WEF para disminuir la escasez de agua esperada en las próximas décadas.

EUROPA

Los países europeos tienen un estatus adecuado en la mayoría de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, pero hay regiones que necesitan ser atendidas para lograr la sostenibilidad. Se estima que cerca del 17% del territorio europeo tiene problemas de escasez de agua.⁵ España, Alemania, Holanda e Inglaterra son algunos de los países con menor disponibilidad de agua.⁶

España es el país con problemas de estrés hídrico más severos en Europa. La sobreexplotación y contaminación de sus recursos hídricos se ha convertido en un problema económico y ambientalmente insostenible.

Casi el 70% de las extracciones de agua se destina a usos agrícolas,⁷ y se han explorado varios métodos para aumentar el suministro de agua y reducir el consumo de agua. La introducción de sistemas de riego más eficientes y la regulación del precio del agua son algunas de las estrategias que se han implementado para controlar el consumo de agua.

ASIA

La escasez de agua es particularmente aguda en Asia y se espera que aumente con el aumento del cambio climático. Arabia Saudita, Irán, Irak, Bangladesh, Nepal, China e India son algunos de los países con problemas de escasez de agua.⁸ China, que es un país influyente en Asia, exhibe una distribución desigual de los recursos hídricos, el 80% de los recursos hídricos es concentrada en el sur, pero la mayor parte de las industrias y la agricultura se concentra en el norte. Además, alrededor del 80% de la energía mineral se encuentra en el norte y oeste.⁹ Por lo tanto, si la escasez de agua continúa aumentando, la reducción del suministro de agua conducirá a la pérdida de la seguridad alimentaria y energética y, por tanto, a la economía. inestabilidad.

ÁFRICA

África es uno de los continentes más secos y la mayoría de la población tiene poco acceso a agua potable. La creciente demanda de la población ha reducido la disponibilidad de tierras productivas y ha aumentado la presión sobre el suministro de agua. La mayor parte de la población de África depende de la agricultura, ya que produce sus propios alimentos, lo que significa que si la escasez de agua empeora, la mayoría de las familias perderían la seguridad alimentaria. Además, la falta de agua a menudo conduce al uso de agua contaminada para el riego, lo que hace que la producción de alimentos sea insegura.

Por otro lado, alrededor de 600 millones de personas no tienen acceso a la electricidad, y aunque la energía renovable podría ser una opción conveniente para la generación de energía, solo el 1% es producido por sistemas solares fotovoltaicos.¹⁰ Los países con condiciones de escasez de agua se encuentran en el Sur. y regiones de África del Norte (es decir, Egipto, Libia, Marruecos y Sudáfrica). Libia se caracteriza por sus grandes reservas de gas natural y petróleo, pero se ubica como uno de los

lugares con menor seguridad hídrica y más del 90% depende de la importación de alimentos:¹¹

Para mostrar el estado actual de algunos de los países con perspectivas similares de escasez de recursos, se seleccionaron algunos de ellos con áreas de alto estrés hídrico.

La **Tabla 1** muestra un resumen de los principales indicadores involucrados en el análisis de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con los sectores de agua, energía y alimentos. El nivel de desnutrición representa una medida del estado del sector alimentario en los países, y es parte del ODS 2, Hambre Cero. El ODS 6, agua potable y saneamiento, incluye el porcentaje de personas que tiene acceso a servicios básicos de agua potable y saneamiento, el porcentaje de extracciones de agua dulce; y también se incluye el escaso consumo de agua incorporado en las importaciones para incorporar la escasez de agua al agua virtual. En el sector energético, el ODS 7, energía limpia y asequible, incluye a la población con acceso a electricidad y combustibles limpios.

Tabla 1. Estado de los indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para países con escasez de recursos.

País	Puntuación del índice	Prevalencia de desnutrición (%)	Pob. que usa al menos los servicios básicos de agua (%)	Pob. que usa al menos los servicios básicos de saneamiento (%)	Extracción de agua dulce (% de los recursos de agua dulce disponibles)	Consumo de agua escasa incorporado a las importaciones (m ³ /capita)	Población con acceso a la electricidad (%)	Población con acceso a combustibles limpios y tecnología para cocinar (%)	Participación de la energía renovable en el suministro total de energía primaria (%)
Estados Unidos	76.4	2.5	99.3	100	30.6	18.3	100	100	7.8
México	70.4	3.6	99.3	91.2	32.2	4.3	100	85.4	9.0
Chile	77.4	2.7	99.8	100	9.0	5.0	100	92.3	27.6
Argentina	73.2	4.6	99.1	94.3	10.5	2.7	100	98.4	-
Ecuador	74.3	7.9	94.0	88.0	6.8	1.6	100	95.6	-
España	78.1	2.5	99.9	99.9	44.0	24	100	100	14.6
Alemania	80.8	2.5	100	99.2	31.4	48.6	100	100	14.1
China	73.9	8.6	92.8	84.8	43.4	2.3	100	59.3	-
India	61.9	14.5	92.7	59.5	66.5	2.9	92.6	41.0	-
Irán	71.8	4.9	95.2	88.4	81.4	6.5	100	98.5	-
Libia	47.1	37.2	72.9	17	0.2	0.3	21.5	0.7	-
Sudáfrica	63.4	6.2	92.7	75.7	44.4	5.8	84.4	84.8	-

(Reporte de Desarrollo Sostenible, 2020)⁵⁷

La puntuación de los indicadores relacionados con el logro de los ODS para los diferentes países se presenta en la **Figura 3**. Con respecto al desempeño del sector energético, el porcentaje de la población con acceso a la energía está casi cubierto en la mayoría de los países, sin embargo, las fuentes renovables generan poca energía. En el caso del acceso a los alimentos, los países asiáticos y africanos tienen porcentajes considerables de desnutrición.

Entre los países seleccionados en este análisis, India y Libia son los países con mayores desafíos para lograr la seguridad alimentaria. Los grandes desafíos para mejorar los objetivos se presentan en los países africanos, especialmente en Libia, debido a su escaso acceso y disponibilidad de agua, lo que pone en riesgo la seguridad del nexo del WEF.

Se debe resaltar que la mayoría de los países presentan una distribución desigual de los recursos y algunas de sus grandes áreas urbanas se ubican en regiones con baja disponibilidad de recursos, lo que hace compleja la planificación del WEF Nexus.

Estos temas pueden no ser percibidos en la evaluación de los indicadores para alcanzar los SDG ya que el estado de los recursos se evalúa a escala nacional y no existe información sobre las importaciones de agua, energía y alimentos para atender el acceso a recursos y servicios; por lo tanto, es importante abordar el problema partiendo de una escala menor para obtener información más precisa sobre los sectores que requieren mayor atención.

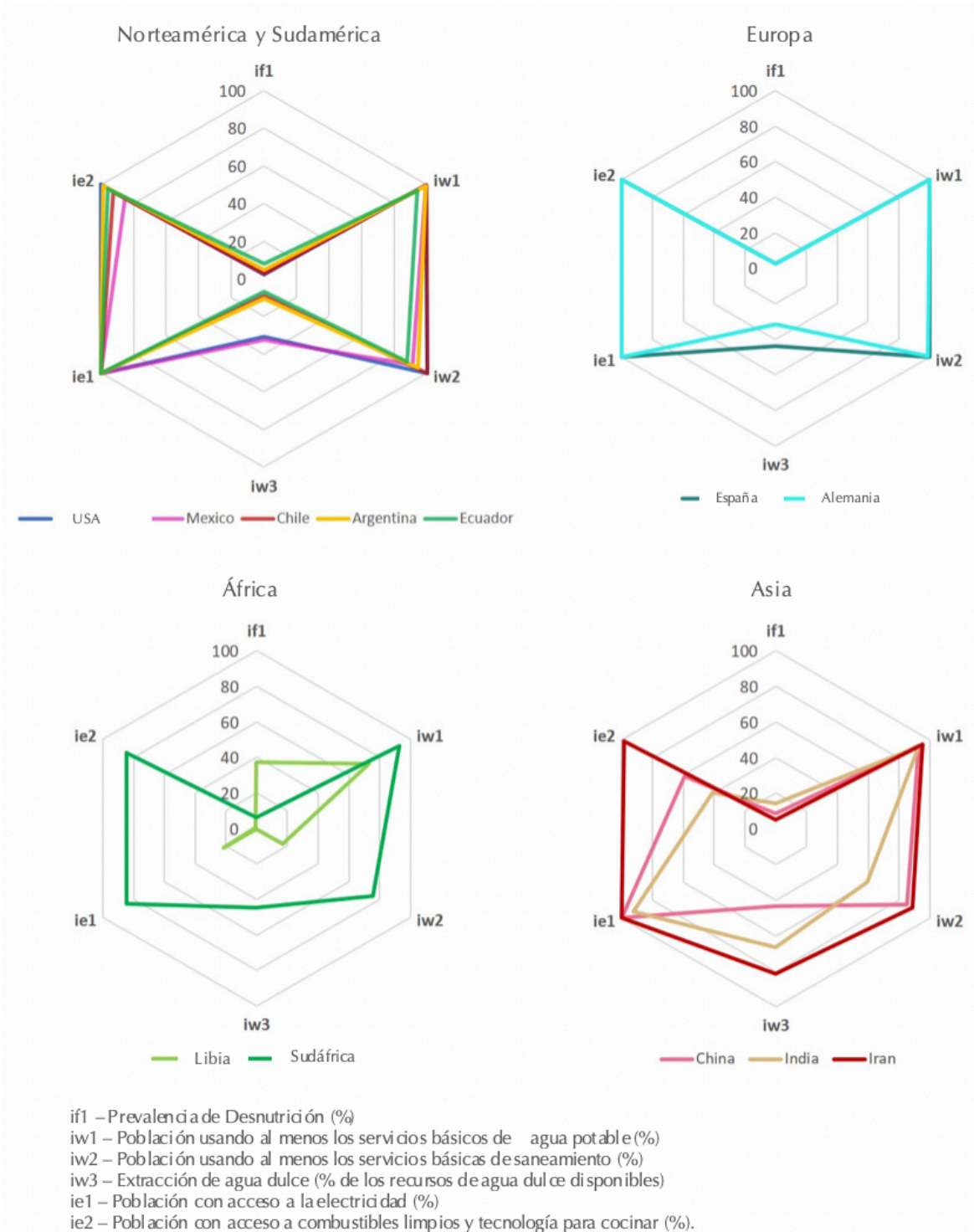


Figura 3. Indicadores de Agua, Energía y Alimentos de acuerdo al reporte de los Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible para distintos países.

ANTECEDENTES

El acceso a recursos como el agua, la energía y los alimentos es esencial para que cualquier civilización se desarrolle sustentablemente. El constante crecimiento de la población y los cambios en el uso y manejo de estos recursos sin una evaluación que permita controlar y direccionar el mismo, inevitablemente dirige a las poblaciones a enfrentarse, en un futuro cercano, a grandes retos que van desde garantizar el acceso al agua hasta satisfacer las necesidades alimentarias de todos los habitantes, así como los requerimientos energéticos que la vida actual demanda para llevar a cabo las actividades diarias.

Martin Dahinden, Director General de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la cooperación expresó en la conferencia del Nexo WEF en Bonn, Alemania en 2011 que “La comunidad global ha reconocido que todo ser humano tiene el derecho al acceso al agua, energía y a los alimentos y que nadie estará completamente seguro hasta que toda persona lo esté”

El Nexo Agua-Energía-Alimentos (WEF por sus siglas en inglés y como el trabajo se referirá a este concepto) es fundamental para la toma de decisiones cuando el objetivo principal es el desarrollo sustentable de una región. El Nexo WEF es una herramienta integral, el concepto de este Nexo fue conocido por primera vez en la conferencia de Bonn,¹² donde despertó interés a nivel global para estudiar las interrelaciones y el impacto que tienen estos tres sectores de manera simultánea. En las últimas décadas, la rápida urbanización, el crecimiento exponencial de la población y los cambios en las dietas, han sido los principales factores que han modificado considerablemente los patrones de demanda de agua, energía y alimentos.¹³ Se estima que para el 2050, la demanda de agua crezca en un 55%.¹⁴ También se prevé que el 57% de la población mundial experimentará escasez de agua,¹⁵ que el consumo de energía aumentará hasta un 50%¹⁶ y que la demanda de alimentos crecerá en un 60%.¹⁷ Aunado a esto, el cambio climático es fundamental a tomar en cuenta durante el proceso de la toma de decisiones y debe ser referencia primordial pues se ha llegado al punto en el que no sólo no puede evitarse sino que se debe buscar

minimizar pues es posible que la total seguridad de recursos pueda nunca ser lograda debido a las grandes demandas de los mismos y su disponibilidad en una región específica.¹⁶ Con esto, es evidente que la realización de una evaluación de la seguridad de este Nexo y el estudio de sus interrelaciones es y debe ser mandatorio para prever futuros escenarios y tener referencias confiables que permitan proponer alternativas de usos y optimizaciones que conduzcan a una economía verde.

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar en qué condiciones se encuentra la región a estudiar respecto al Nexo agua-energía-alimentos. Esta evaluación no sólo será cualitativa, sino que se desarrollará cuantitativamente para así identificar las principales áreas de oportunidad para mantener el Nexo en equilibrio.
- Determinar a través de índices de manera objetiva la seguridad del Nexo agua, energía y alimentos de la Región de Sonora en México.
- Identificar los principales problemas y proponer soluciones para mejorar los índices del Nexo agua-energía-alimentos en la región de Sonora en México.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar qué tan alejada de la idealidad se encuentra la región a estudiar en los tres niveles del Nexo.
- Identificar áreas de oportunidad y de sinergias en el uso y manejo de los recursos.
- Proponer soluciones que impacten positivamente al desarrollo sustentable.

MARCO TEÓRICO

Para que una población pueda desarrollarse y satisfacer las exigentes necesidades que el ritmo de vida actual demanda, es de vital importancia el acceso a recursos como lo son el Agua, la Energía y los Alimentos de manera eficiente y rápida. Cada uno de estos sectores a lo largo del tiempo, se ha estudiado y se han propuesto soluciones para las problemáticas complejas que presenta cada uno de ellos. Robyne Anderson, representante de la Organización Mundial de Agricultores (WFO, por sus siglas en inglés), expresó claramente esta interrelación en la conferencia cuando dijo: “Incrementar la producción de alimentos en un 70% para satisfacer las crecientes necesidades de la población pone una tremenda presión sobre los agricultores, quienes son altamente adaptables pero están limitados por los suministros de agua y energía”. Con el paso del tiempo y con la población total mundial acercándose a los 8 mil millones de habitantes y por ende, el aumento de la demanda de los recursos de agua, energía y alimentos para satisfacer las necesidades básicas de la población, así como sus deseos de vivir con una mayor calidad de vida y mayor consciencia se ha generado en cómo la toma de decisiones en un sector afecta, indudablemente, el desempeño de los otros dos sectores por lo que la utopía en la que cada sector debe ser operado independientemente no puede continuar siendo el statu quo.

Es importante reconocer que cada uno de los sectores tiene una estrecha relación con el ecosistema y viceversa y que las decisiones y acciones que se tomen en cada uno de estos puede y debe siempre buscar proteger el medio ambiente.

Como se ha mencionado anteriormente, el crecimiento de la población en países en desarrollo y los cambios en los patrones de consumo más exigentes en recursos de los países ya desarrollados, son los factores principales que hacen que un estudio de las interrelaciones de los tres sectores, al cual se le llama Nexo, se vuelva no sólo evidente sino que también urgente e indispensable para solventar las problemáticas en cada sector pues son altamente dependientes entre ellos y deben ser considerados simultáneamente para

obtener resultados eficientes y garantizar satisfacer las necesidades de la población, que de no hacerlo, se enfrentarían a serios problemas sociales, de hambruna, de seguridad y que, en general, trastocarían la integridad del ser humano. Sin embargo, el concepto de un NEXO entre los sectores del Agua, la Energía y la Alimentación adquirió importancia a nivel global cuando en Noviembre de 2011, más de 550 personas de distintas partes del mundo se reunieron en Bonn, Alemania para la conferencia llamada “The Water, Energy and Food Security Nexus – Solutions for the Green Economy” para conocer una entonces novedosa forma de ver las interconexiones entre estos sectores, así como colaborar con ideas para encontrar mejores maneras de solucionar los intensos problemas que se presentan en los diversos sectores y buscar alcanzar la sostenibilidad, apuntando siempre hacia una “Economía Verde”.

Es importante definir que la llamada Green Economy (Economía Verde) está considerada de acuerdo al UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) como la economía que resulta en el mejoramiento del bienestar humano y la equidad social mientras que se reduzcan significativamente los riesgos ambientales y la escasez ecológica; es la economía en la que el consumo de carbón y los niveles de contaminación son bajos así como su uso eficiente de recursos alto. La Economía Verde “busca en principio, unir bajo una solo estandarte, todo el conjunto de políticas económicas de relevancia para el desarrollo sostenible”. En pocas palabras busca “crear más con menos” lo que conlleva un aumento en la productividad de todos los sectores. Esto en Ingeniería Química ha sido llamado *Intensificación de Procesos*.

Es notorio y predecible, como se ha visto a lo largo de la historia, que el no tener un sistema de medición que permita controlar el uso y consumo de un recurso pueda llevar a la escasez o inclusive a la carencia total del mismo y en este caso, como humanidad no podemos permitirnos que no haya suficiente agua, energía o alimentos para todos, mucho menos como profesionistas. El ritmo de vida actual obliga a implementar políticas de control y mejoramiento del acceso y consumo de los recursos pues existe evidencia suficiente de que las medidas tomadas hasta ahora no han sido suficientes. Constantemente se escucha hablar

de problemas para la distribución del agua de consumo local, de acuíferos con escasez de agua, de las sequías causadas por el cambio climático y su efecto en el sector ganadero y agrícola causando preocupación y malestar entre los ciudadanos de una población. La humanidad se encuentra en un periodo en el que la constante búsqueda de soluciones y optimización de recursos que generen sinergias es prioridad y crucial para la sobrevivencia.

Como mencionó Alexander Müller, Director General para los Recursos Naturales de la Organización de Agricultura y Alimentos: "Limitar el crecimiento en países en desarrollo no es una solución aceptable, así que todos debemos movernos hacia una Economía Verde que apoye el desarrollo sustentable", por lo que claramente mantener como objetivo principal una economía verde es crucial para mantener un equilibrio en el Nexo. Las decisiones que se tomen en relación al Nexo WEF tienen un gran alcance en el ecosistema y respecto al cambio climático lo que puede verse reflejado en la elevación o disminución de la temperatura, descongelamiento de los polos, altas emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros factores.

Existen diversos estudios y trabajos de investigación en torno al Nexo WEF, algunos que se enfocan en la producción y consumo de recursos¹⁸, otros en entender el pensamiento Nexo WEF^{19,20}, evaluar las tecnologías para la integración de recursos^{21,22} y otros que buscan emplear modelos matemáticos para el diseño sustentable del Nexo WEF a nivel macroscópico^{23,24}. Recientemente, se ha considerado al Nexo WEF como una herramienta eficiente para alcanzar los Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible entre los cuales se encuentra la salud y el bienestar, el acceso a agua limpia y saneamiento, la erradicación del hambre, la energía asequible y no contaminante y la producción y el consumo responsables, entre otros²⁵, ya que se encuentran íntimamente ligados pues el Nexo permite mejorar el acceso a los alimentos seguros, al agua limpia y a servicios de energía accesibles, además de que muestra el camino para controlar el uso y consumo de recursos de manera responsable en función del cambio climático y la urbanización con el fin de erradicar la pobreza y proteger el planeta.

La seguridad del Agua se identifica como el acceso adecuado a los recursos de agua en términos de cantidad y calidad.²⁶ Se podría creer que el agua, al ser un recurso renovable, existe en cantidades suficientes para satisfacer las necesidades de la población mundial, no obstante, su abastecimiento es uno de los desafíos más grandes a los que se enfrenta el día de hoy, ya que en la mayoría de los casos, la demanda de la misma es mucho mayor a la oferta, lo cual causa que exista una sobreexplotación de los recursos de agua en diversos sectores causando gran preocupación en la comunidad científica mundial.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés), que es la mayor organización mundial con el objetivo de alcanzar la seguridad alimentaria, definida como el acceso regular a una cantidad suficiente a alimentos de calidad que permitan llevar una vida activa y saludable.²⁷ En 2018, en el informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura se estimó que 821 millones de personas sufrían de malnutrición, es decir 1 de cada 10 seres humanos) mientras que en otras partes del mundo se intentaba combatir la creciente tasa de sobrepeso y obesidad. Cabe mencionar que el hambre y la malnutrición son el principal riesgo a la salud a nivel mundial. Además de los casi ocho mil millones de habitantes que hay en el mundo, se estima que dos mil millones de personas son afectadas por algún nivel de inseguridad alimentaria, es decir, que no tienen acceso regular a una porción de alimentos de alto valor nutritivo suficientes.²⁸

La seguridad alimentaria es uno de los objetivos principales de las SDG, que se proponen ser cumplidas para 2030, con lo que nuevamente se observa una necesidad del uso de herramientas referidas al Nexo WEF que faciliten la imposición de soluciones. Se ha demostrado que aún en las zonas en las que la oferta de agua es suficiente para cubrir la demanda, prevalece la inseguridad alimentaria. El crecimiento en la producción de alimentos ha derivado en la expansión de las tierras agrícolas así como la intensificación en las ya existentes lo cual ha tenido repercusiones en el ecosistema y en sus alrededores. Recordemos que la agricultura ocupa casi el 70% del agua consumida por los humanos y que en algunos países, esta cifra alcanza hasta el 90%, por lo que las decisiones en este

sector afectan directamente al otro, además de ser el principal responsable de la sobreexplotación del agua de consumo y de la degradación de la tierra y el ecosistema. Una de las soluciones que se han dado para la alta demanda de alimentos, es la implementación de tecnología que ha automatizado en un porcentaje el trabajo en el campo causando así una mayor demanda de energía por parte del sector alimentario, el cual se considera consume el 30% de la energía global durante la preparación de la tierra, la producción, cuidados y transportación de alimentos. Además algunos métodos de obtención de energía como la deforestación para obtener biocombustibles, repercute negativamente en zonas que podrían aprovecharse en el sector agrícola para obtener una mayor cantidad de alimentos.

Otro aspecto importante a considerar en el sector alimentario es que se considera ser responsable de casi el quince por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Por otra parte, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)²⁹, que brinda soporte a los países que buscan transformar sus formas de energía en renovables, establece que el sector más importante del Nexo WEF es el energético y que la seguridad energética consta del acceso asequible a todos los combustibles y fuentes de energía. El sector energético se encuentra ligado al sector del agua pues se necesita energía para la extracción, tratamiento y distribución del agua. Respecto al medio ambiente, se considera que la producción de energía representa casi el veintisiete por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero globalmente.

En la actualidad, es de gran interés trabajar en el desarrollo de indicadores que permitan evaluar las interacciones de los recursos y con los que se pueda medir su nivel de sostenibilidad. En estudios previos se han propuesto distintos indicadores con los que se puede evaluar el rendimiento del agua, la energía y los alimentos como sectores independientes. Para el sector del agua se utilizan indicadores que miden el consumo del agua^{30,31}, la disponibilidad del agua³², huella hídrica^{33,34} y la seguridad del agua³⁵. Para el energético se consideran indicadores de consumo de energía³⁶, seguridad de la energía^{37,38},

producción de energía³⁹ e intensidad de la energía⁴⁰. Finalmente, para el sector alimentario se utilizan indicadores relacionados con el consumo de alimentos⁴¹, el rendimiento de los cultivos⁴² y la producción de los mismos⁴³.

Sin embargo el uso de indicadores que consideren simultáneamente los tres sectores son claves para cuantificar el consumo y la producción de recursos además de que una evaluación del Nexo WEF se considera una herramienta de gran utilidad que permitirá identificar los sectores más vulnerables. En este sentido, existen herramientas como la propuesta por Saladini et al. (2018) que utiliza indicadores que evalúan las interrelaciones para el desarrollo en la región del Mediterraneo.⁴⁴ Otra investigación realizada por Yuan y Lo (2020) desarrolló la herramienta LIFEWAY (“Indicadores relacionados para la disponibilidad FEW”) que mide los logros de sostenibilidad de un país.⁴⁵ Por otra parte, Mahlknecht et al. (2020) propusieron un índice WEF que evalúa el progreso a nivel nacional de la seguridad de cada uno de los sectores el cual expuso la necesidad de mejorar el manejo de los recursos en las naciones latinoamericanas.

En la **Tabla 2** se presenta un resumen de los estudios de indicadores para medir la seguridad del WEF Nexus. Estos indicadores están enfocados principalmente en la evaluación de la seguridad hídrica, energética y alimentaria a nivel nacional a través del análisis de disponibilidad y acceso a recursos. En el caso del índice ODS, la metodología se centra en la evaluación de la sostenibilidad considerando metas más sociales. Sin embargo, estas metodologías no consideran la evaluación de la seguridad del WEF Nexus que involucra el acceso, la disponibilidad y la sostenibilidad de los recursos energéticos, hídricos y alimentarios en el mismo índice. Además, los indicadores propuestos se utilizan para medir la seguridad o sostenibilidad del WEF Nexus en un país, sin dar flexibilidad para ser utilizados a cualquier escala. Otra desventaja de los índices propuestos anteriormente es que no se pueden introducir fácilmente en modelos de optimización para mejorar la planificación y gestión de recursos o hacer proyecciones de años futuros con la implementación de políticas que faciliten el proceso de toma de decisiones. Por tanto, la novedad de este trabajo es el desarrollo de un enfoque sistemático denominado Índice de

Seguridad WEF que implica la evaluación de algunos de los ODS relacionados con el Nexo. Este índice permite medir la seguridad del Nexo a través de la evaluación de indicadores que representan la disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad del agua, energía y alimentos, los cuales pueden mostrarse en gráficos de radar para una mejor representación visual. Un aporte novedoso de este enfoque es que a través del WEF Nexus Security es posible realizar proyecciones de las demandas de recursos, sus producciones y consumos para escenarios futuros en regiones a cualquier escala. De esta manera, será posible determinar los sectores más vulnerables para tomar acciones y generar políticas que enfrenten los desafíos actuales para garantizar el acceso sostenible a los recursos y servicios básicos en los próximos años. Sin embargo, se deben continuar los esfuerzos en el desarrollo de indicadores que mejoren la comprensión de las interdependencias de los recursos. Para probar el enfoque propuesto, se presenta un estudio de caso para una región árida de México.

Tabla 2. Índices para medir la sostenibilidad o seguridad del WEF Nexus.

Indicador	Descripción	Referencia
Índice SDG	El índice SDG se compone por indicadores oficiales de SDG que reflejan el marco conceptual de los 17 SDGs; mide el desempeño absoluto de un país.	(ONU, 2015) ⁴⁶
Índice de Seguridad RAND FEW	Índice compuesto por tres subíndices relacionados con agua, energía y alimentos que a su vez comprenden indicadores de disponibilidad y accesibilidad. El índice se calcula para la evaluación de la seguridad del Nexo WEF.	(Willis et al., 2016) ⁴⁷
LIFEWAY	Indicador a escala nacional que mide la sostenibilidad en términos de agua, energía y logros alimentarios de un país.	(Yuan y Lo, 2019) ⁴⁴
Índice de Seguridad STE FEW	Índice basado en los índices sectoriales bien establecidos: el Índice Internacional de Riesgo de Seguridad Energética, el Índice Global de Seguridad Alimentaria y el Marco de Riesgo de Agua de Aqueduct. El índice de seguridad STE FEW permite comparar los recursos de seguridad de diferentes países.	(Venghaus y Dieken, 2019) ⁴⁸

Aún cuando se han desarrollado y estudiado distintas metodologías para realizar la evaluación de la seguridad del Nexo WEF, hasta el momento ninguna de ellas, hasta donde sabemos, ha cuantificado la seguridad de los recursos considerando e incluyendo el progreso SDG, por lo que en este trabajo se pretende llevar a cabo la evaluación de la seguridad del Nexo WEF en una región donde la escasez de recursos es obvia, mediante un acercamiento sistemático que permite especialmente evaluar la seguridad del Nexo WEF en regiones donde hay escasez de recursos. El índice WEF Nexus que se determina mediante este método es un aspecto que se puede utilizar para hacer proyecciones de futuros escenarios pues permite conocer la disponibilidad, el acceso y la sostenibilidad de los recursos en distintos periodos de tiempo y que aunado a la evaluación del progreso SDG se muestran los sectores con mayor vulnerabilidad en una región. Con estos datos, se pueden ofrecer mejores soluciones para los conflictos complejos que existen entre los tres sectores y poder finalmente implementar políticas que garanticen la seguridad del agua, alimentaria y energética para una región con escasez.

METODOLOGÍA

Para evaluar la seguridad del WEF Nexus se propone el siguiente esquema: el índice WEF Nexus es una métrica para evaluar la seguridad del progreso en el agua, la energía y los alimentos de una región basados en sus objetivos y metas de desarrollo sustentable en particular los objetivos 2 Hambre Cero, 6 Agua limpia y saneamiento y 7 Energía asequible y no contaminante. Estos objetivos están sumamente interrelacionados con el resto de objetivos enumerados en la Agenda 2030; por lo tanto, una mejora en el WEF Nexus se reflejará en una mejora de la mayoría de los objetivos de desarrollo sostenible. Está compuesto por nueve parámetros que se representarán en un gráfico radial para poder visualizar las deficiencias de recursos de cada sector. Cada parámetro será un indicador de seguridad de agua, energía y alimentos en una región. La seguridad del agua se evaluará con los siguientes tres parámetros: disponibilidad del agua (W-1), acceso al agua (W-2) y sostenibilidad del agua (W-3). La disponibilidad de agua (W-1) se calcula como la relación entre el agua generada en la región y la huella hídrica entre el agua generada:

$$W - 1 = \frac{\textit{AguaTotalGenerada} - \textit{HuellaAguaTotal}}{\textit{AguaTotalGenerada}} \quad (1)$$

El acceso al agua (W-2) representa la población que tiene acceso a los servicios de agua:

$$W - 2 = \frac{\textit{PoblaciónTotal} - \textit{PoblaciónSinAccesoTotal}}{\textit{PoblaciónTotal}} \quad (2)$$

La sostenibilidad del agua (W-3) se calcula como la relación entre la huella hídrica y el agua importada para satisfacer la demanda de la región:

$$W - 3 = \frac{\textit{HuellaAguaTotal} - \textit{CantidadAguaImportada}}{\textit{HuellaAguaTotal}} \quad (3)$$

En el caso de la energía: disponibilidad de energía (E-1), acceso a la energía (E-2) y sostenibilidad de la energía (E-3). La disponibilidad de la energía (E-1) determina la relación entre la capacidad energética de la región y su huella energética total:

$$E - 1 = \frac{\text{CapacidadEnergíaTotal} - \text{HuellaEnergéticaTotal}}{\text{CapacidadEnergíaTotal}} \quad (4)$$

El acceso a la energía (E-2) representa la población con acceso a la energía en la región:

$$E - 2 = \frac{\text{PoblaciónTotal} - \text{PoblaciónSinAccesoTotal}}{\text{PoblaciónTotal}} \quad (5)$$

La sostenibilidad de la energía (E-3) se calcula como la huella energética total menos la energía proveniente de energías no renovables sobre la huella energética total:

$$E - 3 = \frac{\text{HuellaEnergéticaTotal} - \text{EnergíaProvNoRenovables}}{\text{HuellaEnergéticaTotal}} \quad (6)$$

Y finalmente, para los alimentos: Disponibilidad de alimentos (F-1), acceso a los alimentos (F-2) y sostenibilidad alimentaria (F-3). La disponibilidad de los alimentos (F-1) es igual al promedio de la energía alimentaria requerida por una persona para llevar un estilo de vida saludable menos el promedio de la energía alimentaria consumida sobre la energía alimentaria promedio requerida:

$$F - 1 = \frac{\text{EnergíaAlimPromedioRequerida} - \text{EnergíaAlimPromedioConsumida}}{\text{EnergíaAlimPromedioRequerida}} \quad (7)$$

EL acceso a los alimentos (F-2) representa a la población sin desnutrición:

$$F - 2 = \frac{PoblaciónTotal - PoblaciónDesnutrición}{PoblaciónTotal} \quad (8)$$

La sostenibilidad alimentaria (F-3) indica la relación entre los alimentos consumidos en el sector doméstico y los alimentos importados:

$$F - 3 = \frac{TotalAlimentosConsumidos - TotalAlimentosImportados}{TotalAlimentosConsumidos} \quad (9)$$

Los indicadores serán evaluados mediante el uso de las siguientes relaciones (Ecuaciones (1)-(9)). Un resultado de 1 (100%) indicará el mejor desempeño del parámetro y el promedio de los nueve constituirá el Índice WEF Nexus. Es importante destacar que un resultado de 1 para los parámetros es casi imposible de alcanzar pues el desarrollo sostenible es difícil de conseguir.

El Índice de Seguridad WEF podría aplicarse para la evaluación de una región a cualquier escala y podría usarse como herramienta de apoyo para la toma de decisiones, pero no da una solución para lograr la seguridad del Nexo. La idea principal de este enfoque es revelar el estado de la seguridad del agua, la energía y los alimentos y mostrar las debilidades de los sectores que requieren una pronta intervención mediante la evaluación de los indicadores propuestos.

CASO DE ESTUDIO

En este trabajo se seleccionó el estado de Sonora, ubicado en el norte de México, como caso de estudio sobre el cual se evaluará la seguridad del WEF Nexus. La selección del caso de estudio se basó en que, al estar casi completamente cubierto por el desierto de Sonora (el desierto más cálido del país), es un estado que sufre de una gran escasez, así como una distribución no equitativa de recursos la cual se le atribuye a las condiciones geográficas de la región. Sonora es un estado reconocido por su desarrollo económico e industrial, líder en minería a nivel federal, sobre todo en la producción de plata de la cual México ocupa el primer lugar a nivel mundial. Sin embargo, la ubicación de sus minas en zonas con escasez de agua, ha provocado la competencia de los usuarios por el recurso hídrico. Adicionalmente, las prácticas inadecuadas en la minería se han traducido en un alto consumo y contaminación del agua, lo que dificulta el acceso al agua para todos los usuarios.

En los últimos años, el incremento de temperatura en Sonora ha dado lugar a cambios en las precipitaciones y la disponibilidad de agua, y la creciente presión para satisfacer las demandas de la sociedad dando lugar a un desequilibrio en el WEF Nexus. Por otro lado, la zona sur de Sonora es conocida por su alto potencial en la producción de alimentos, siendo también una zona gravemente afectada debido a la escasez de agua

Se deben realizar varios esfuerzos para asegurar el acceso al agua principalmente en las ciudades industrializadas. Uno de los mayores desafíos del estado ha sido la ciudad de Hermosillo, que es la capital de Sonora. Hermosillo es la ciudad con el problema de abastecimiento de agua más serio del país. Los ríos San Miguel y Zanjón son los más cercanos a la ciudad, los cuales solían desembocar en la presa Abelardo L. Rodríguez, la cual se utilizaba para suministrar agua a la capital. Hoy en día, se encuentra totalmente drenada. Debido a esto, a la sobreexplotación de las represas y a los tiempos prolongados de sequía extrema de esta región, se construyó un acueducto con la finalidad de cumplir

con los requerimientos de la demanda de agua de la ciudad, transportándola así desde la presa “El Novillo” localizada a 152 km de la ciudad hasta la capital pero causando descontento en la población de Obregón, específicamente en los usuarios del agua de la región agrícola del Yaqui pues reclaman que corresponde a la ciudad de Obregón por asignación de derechos de riego. Esta decisión no sólo ha causado malestar social, sino que ha demostrado que es insostenible satisfacer las necesidades de agua para los distintos sectores, en especial el sector Agrícola que representa el 88% del consumo de agua del estado (CONAGUA, 2018), lo que hace que sea de total prioridad encontrar soluciones que además de resolver lo anteriormente mencionado, evite o disminuya lo máximo posible el deterioro ambiental que esta provocando y que está poniendo en riesgo la funcionalidad y seguridad de la región y de sus habitantes.

Hasta hoy, los esfuerzos que se han realizado para atender esta demanda han generado conflictos, y por otro lado, esto ha provocado un deterioro ambiental, que pone en riesgo principalmente la disponibilidad de agua en los acuíferos de la región y los de las poblaciones más cercanas. Reconociendo este problema, una forma de evaluar la sostenibilidad de los recursos es a través de la evaluación de la seguridad del WEF Nexus. A continuación se describirán las principales características relacionadas con la seguridad del agua, energía y alimentos en el estado de Sonora.

SEGURIDAD HÍDRICA

La escasez de agua superficial en Sonora hace que el agua subterránea sea la principal fuente de suministro. Sonora tiene un total de 62 acuíferos pero, debido al manejo insostenible, muchos de ellos actualmente sufren de intrusión salina y 18 están sobreexplotados. La recarga anual total de estos acuíferos es de aproximadamente 3,235 hm³ y tiene una extracción anual de 2,560.8 hm³; por lo tanto, la disponibilidad global restante es de aproximadamente 674.2 hm³. Las principales cuencas hidrológicas involucradas en Sonora son el río Sonora, el río Yaqui y el río Mayo (**Tabla 3**).

Tabla 3. Características de las principales cuencas hidrológicas del estado de Sonora.

Característica	Río Sonora	Río Yaqui	Río Mayo
Precipitación (mm)	401.0	475	555
Escorrentía natural media (hm ³)	439.0	3,163	1,212
Área (km ²)	27,740.0	72,540	15,113
Longitud del río (km)	421.0	410	386
Temperatura anual promedio (°C)	24.4	20.8	23.0
Evaporación anual promedio (mm)	2,540.0	1,999	2,150

A lo largo del río Sonora se encuentran las represas "Abelardo L. Rodríguez" y "El Molinito", mientras que las represas "Álvaro Obregón", "Lázaro Cárdenas" y "El Novillo" se ubican a lo largo del río Yaqui. Las principales características de estas se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Características principales de las presas involucradas en el caso de estudio.

Característica	"Abelardo L. R."	"El Novillo"	"El Molinito"	"Álvaro Obregón"	"Lázaro Cárdenas"
Capacidad (hm ³)	219.5	2,833.10	130.04	2,989.20	703.38
Net Vol (hm ³)	0.01	1851.83	7.16	2,134.96	517.87

En Sonora, los requerimientos de agua son aproximadamente de 7,293 hm³ por año, de los cuales 771 son utilizados por usuarios domésticos, 6,390 en el sector agrícola, 115 por industrias y 16 en producción de electricidad excluyendo la hidroelectricidad (**Figura 4**).

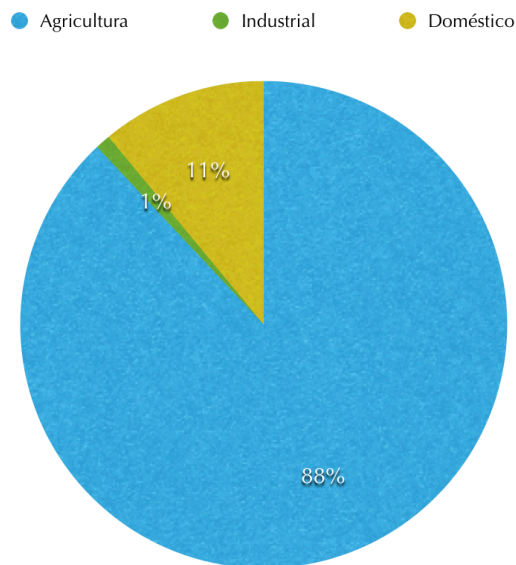


Figura 4. Distribución Total del consumo de agua en Sonora.

Hermosillo es la ciudad más importante del estado de Sonora, y su desarrollo económico se ha basado principalmente en la agricultura y la ganadería; se estima que el consumo diario de agua por persona es de 380 L según el Consejo Nacional del Agua, por día.

SEGURIDAD ENERGÉTICA

La seguridad energética está relacionada con la disponibilidad de recursos naturales para la producción de energía, como son los combustibles fósiles, la energía solar y otras fuentes primarias. Los componentes principales de la producción de energía primaria en Sonora son leña, carbón e hidroenergía (**Figura 5**). En el estado se cuenta con tres centrales hidroeléctricas: Plutarco Elías Calles (El Novillo) en el municipio de Soyopa; el Oviáchic, en Cajeme; y el Mocúzari, en Alamos. La **Tabla 5** presenta una lista de las plantas existentes. La capacidad total instalada es de 2.086 GW; de ese total, 54% corresponde a plantas que utilizan petróleo (termoeléctricas), 35% gas natural (plantas de ciclo combinado), 8% hidroeléctricas (hidroeléctricas) y 3% diésel (plantas de turbo gas y diésel). El consumo de energía se divide en cuatro grandes sectores: agrícola, de transporte, industrial, así como

residencial, comercial y público. El consumo total es de 320,6 petajulios (PJ), lo que representa el 59,9% del consumo energético interno bruto. El porcentaje de consumo de energía en los diferentes sectores se presenta en la **Figura 6**.

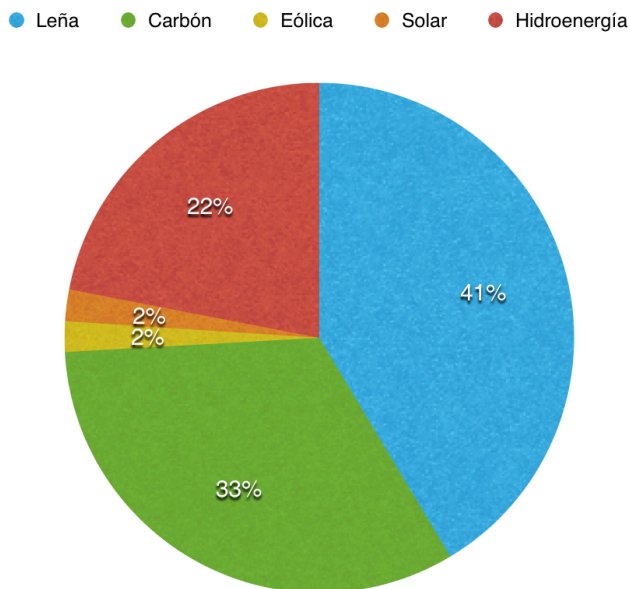


Figura 5. Producción primaria de energía de la región.

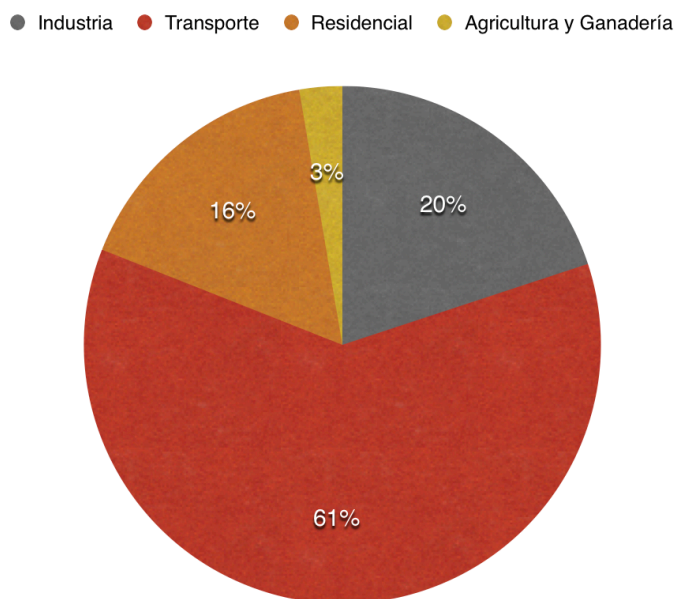


Figura 6. Porcentaje de consumo de energía por sector en la región.

Tabla 5. Centrales eléctricas en Sonora.

Planta	Tipo de Energía	Capacidad (MW)	Ubicación
Plutarco Elías Calles (El Novillo)	Hydro energy	135.00	Soyopa
Oviáchic	Hydro energy	19.20	Cajeme
Mocúzari	Hydro energy	9.60	Álamos
Puerto Libertad	Fuel oil	632.00	Pitiquito
Carlos Rodríguez Rivero (Guaymas II)	Fuel oil	484.00	Guaymas
Hermosillo	Natural Gas	227.02	Hermosillo
Hermosillo	Natural Gas	250.00	Hermosillo
Naco-Nogales	Natural Gas	258.00	Agua Prieta
Ciudad Obregón	Diesel	28.00	Cajeme
Caborca	Diesel	42.00	Caborca
Yécora	Diesel	1.80	Yécora

El consumo total de energía en Hermosillo alcanzó poco más de 90.32 PJ, lo que representa un 28% del consumo de energía en el estado, lo que la ubica como una de las ciudades con mayor consumo en Sonora. El consumo desglosado de energía en Hermosillo muestra una utilización del 78,6% en la industria, el comercio y los servicios, 13,5% en los hogares, 4,10% en la agricultura y 3,8% en el alumbrado público y bombeo de agua (Hermosillo y Sonora, 2013).

SEGURIDAD ALIMENTARIA

El estado de Sonora tiene una extensión territorial de 18,484,644 ha, representando así el 9.2% de la superficie Nacional. De esta área, 759,476 ha están designadas para uso agrícola, lo que representa el 4.1% del área total del estado. Además, del área agrícola total, alrededor del 90% son cultivos de riego, y el resto de temporal. El sector agrícola en el estado de Sonora se divide en diferentes distritos de riego.⁴³ Para el caso de estudio, los

distritos de riego son: el 051 Costa de Hermosillo, 041 Río Yaqui, 018 Colonias Yaquis, 038 Río Mayo y 084 Guaymas. La **Tabla 6** muestra los principales datos de los distritos de riego. Los principales cultivos de riego que se producen en el Estado de Sonora son trigo (52%), alfalfa (6%), maíz (6%) y garbanzo (6%). Los cultivos restantes se cultivan en el 30% del área total de riego del Estado. Por grupos de cultivos, los granos son los de mayor alcance dentro del Estado de Sonora, con el 57.4% del área cultivada total, en segundo lugar está el grupo de forrajes con el 12% del área total, los árboles frutales están en tercer lugar y las verduras junto con las legumbres secas en cuarto lugar. El uso y la gestión del agua son esenciales para el desarrollo agrícola. Actualmente, el sector agrícola opera con una eficiencia del 38%. Esto se debe al mal estado de la infraestructura hidráulica y al uso generalizado de los sistemas de riego por gravedad e inundaciones, que es en gran medida la causa principal de la pérdida de grandes volúmenes de agua. Dada la complejidad de la situación actual en Sonora, se debe considerar el pensamiento Nexus, ya que si bien el norte del estado es árido con un alto potencial para sufrir de escasez de agua pero también para el uso de energía solar renovable; el sur del estado se dedica principalmente a actividades agrícolas; por tanto, es fundamental gestionar adecuadamente el agua para asegurar su acceso en los diferentes sectores. Al mismo tiempo, es importante mejorar la producción de alimentos y energía, y evaluar las interrelaciones entre estos recursos.

Tabla 6. Características de los principales distritos de irrigación en la región.

Distrito	Área total (ha)	Superficie regada (ha)	Volumen distribuido (hm³)
Costa de Hermosillo 051	117,360	47,933	416.7
Río Yaqui 041	232,792	207,132	2,106.2
Colonias Yaquis 018	22,880	18,280	235
Río Mayo 038	95,989	76,133	609.2
Guaymas 084	20,042	11,670	78.3

RESULTADOS

Al evaluar las interacciones del WEF Nexus en períodos de tiempo pasados, se puede obtener información valiosa para generar proyecciones hacia el futuro; de esta manera, es posible tener una visión general de los desafíos que tendrán que enfrentar para mejorar la seguridad de los recursos. En este trabajo, se evaluó la posición y las interacciones del agua, la energía y los alimentos en los años 2013, 2015 y 2019 para predecir su seguridad en los años 2025 y 2030. Los gráficos de radar muestran el índice resultante con nueve vértices. El color rojo representa la situación más crítica para la seguridad del índice, el naranja representa un riesgo medio y la zona verde de bajo riesgo (**Figura 7**), donde puede verse que el esquema para los años 2013 y 2015 presenta una tendencia similar. Estos resultados indican que en ese período de tiempo, no se implementaron acciones para favorecer a los sectores analizados.

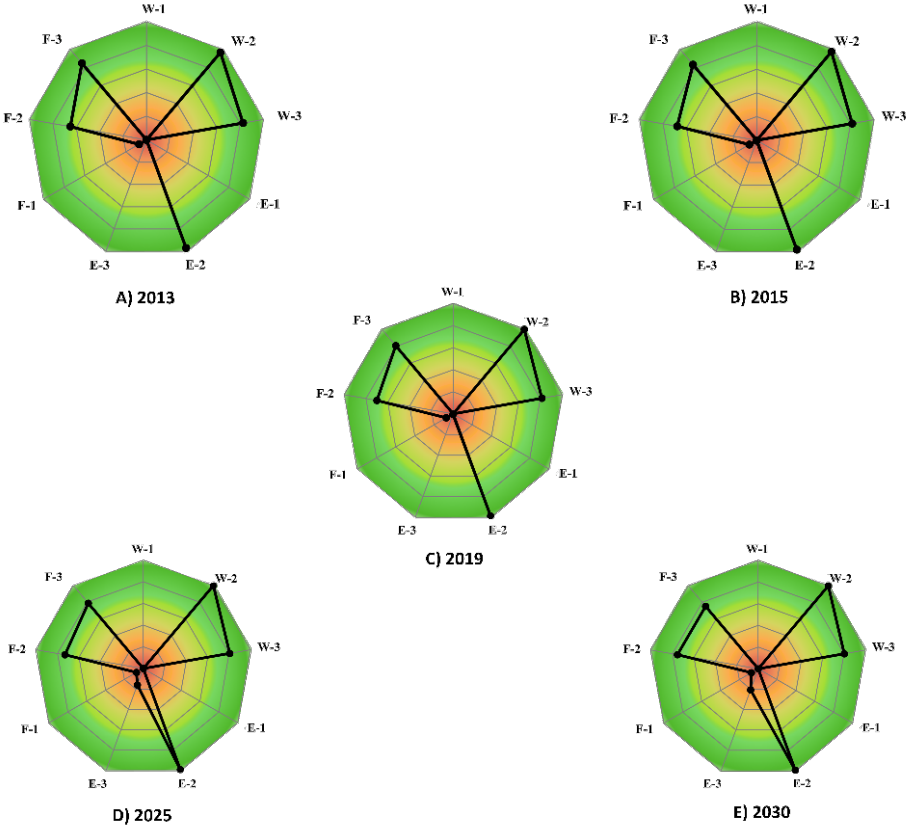


Figura 7. Evaluación del índice de seguridad WEF para 2013, 2015, 2019, 2025 y 2030.

En el caso de seguridad energética, los indicadores de disponibilidad energética (E-1) y accesibilidad energética (E-3) muestran valores bajos debido a que la capacidad energética en Sonora no es suficiente para satisfacer la demanda y, por lo tanto, prevalece la baja disponibilidad de energía. Cabe señalar que la capacidad energética representa solo alrededor del 14% del consumo total de energía. A pesar de esto, el indicador de accesibilidad energética (E-2) presenta una ejecución satisfactoria. Como resultado de la sobreexplotación y la mala gestión de los recursos, el indicador de accesibilidad al agua (W-1) presenta un panorama fatídico, ya que el agua utilizada en los diferentes sectores fue mayor que el agua generada. Por otra parte, los indicadores de acceso al agua (W-2) y sostenibilidad (W-3), así como acceso a alimentos (F-2) y sostenibilidad alimentaria (F-3) no representaron un alto riesgo en los años anteriores. El acceso al agua (W-2) y a los alimentos (F-2) fueron los sectores más favorecidos en 2015 con respecto a los datos de 2013. El estado de Sonora ha sido notable por su destacada actividad agrícola, tiene cinco distritos de riego en los que principalmente se cultivan granos. La distinguida actividad agrícola en Sonora ha favorecido la accesibilidad (F-2) y la sostenibilidad de los alimentos (F-3), en consecuencia, la población no dependía de los alimentos importados. No obstante, se encontró que la disponibilidad de alimentos (F-1) estaba en alto riesgo, debido a los hábitos alimenticios poco saludables de la población.

En el año 2019 (**Figura 8**), los indicadores de acceso a la energía (E-2), disponibilidad de agua (W-1), acceso al agua (W-2) y sostenibilidad del agua (W-3) fueron similares a los analizados de años anteriores. Dentro del sector alimentario, el acceso a los alimentos (F-2) y la sostenibilidad alimentaria (F-3) mostraron una mejora debido a que disminuyó el número de personas en desnutrición. Por otro lado, como consecuencia del aumento de la producción agrícola, no fue necesario importar más alimentos que en años anteriores. En materia de seguridad energética, el indicador de accesibilidad energética (E-2) continuó con poco riesgo. Sin embargo, se deben realizar grandes esfuerzos para reemplazar las tecnologías fósiles por energías renovables con el fin de mejorar la sostenibilidad y la disponibilidad de energía (E-1 y E-3).

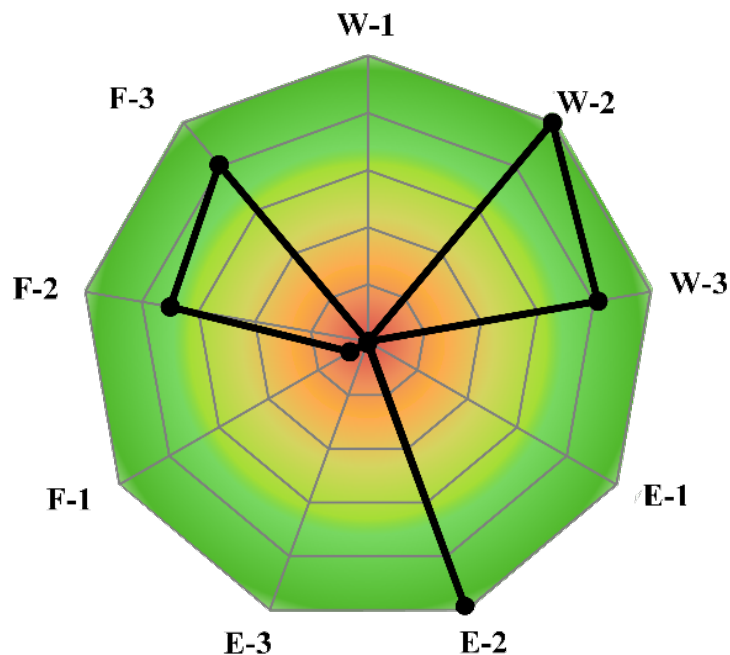


Figura 8. Evaluación del índice para 2019.

A partir del comportamiento de los recursos en los años anteriores, se realizaron proyecciones para el estudio de la seguridad del WEF Nexus. En este trabajo se evaluaron los años 2025 y 2030 con el fin de tener una perspectiva del avance en el cumplimiento de las metas presentadas en la agenda de desarrollo sostenible. Los resultados muestran que la disponibilidad de recursos es un problema preocupante en los tres sectores del Nexo. La disponibilidad de agua ha sido uno de los mayores desafíos que ha enfrentado el estado; sin embargo, no se han tomado las medidas adecuadas para gestionar mejor los recursos hídricos. Esto a su vez se refleja en el indicador de sostenibilidad del agua (W-3), sabiendo que la población aumentará en los próximos años, es de esperarse que la demanda de agua supere la capacidad de suministro de la misma. Al mismo tiempo, se espera que aumenten los indicadores de acceso a la energía (E-2) y sostenibilidad (E-3). El problema radica en su baja capacidad energética, su mínima generación de energía por fuentes renovables, su dependencia de combustibles importados y su elevado consumo energético. Según la Ley General de Cambio Climático, el estado debe hacer una transición para que el 40% del total de energía consumida sea a través de fuentes renovables en 2030, estas acciones promoverán el uso de energías renovables y así el indicador de sostenibilidad mejorará

notablemente (E -3). El estado no depende de la importación de alimentos gracias a su productividad agrícola. Sin embargo, la sobreexplotación de los suelos y los cambios en el uso de la tierra pueden generar un mayor riesgo en los indicadores de acceso a los alimentos (F-2) y sostenibilidad de los mismos (F-3). Asimismo, la existencia de estos problemas podría provocar un aumento de la desnutrición, debido a la falta de alimentos necesarios para satisfacer las ingestas recomendadas de macronutrientes y micronutrientes (F-1). Hoy en día, una forma de prevenir y abordar estos problemas, es la implementación de tecnologías y políticas de riego más eficientes centradas en reducir el agotamiento del agua para garantizar la seguridad del Nexo.

La **Tabla 7** describe la Tasa de Crecimiento porcentual de 2015 a 2030, una disminución en los indicadores se denota con un signo negativo (-). Para el cálculo de la tasa de crecimiento porcentual, se utilizó el enfoque lineal de acuerdo a la ecuación (10):

$$\% \Delta = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (10)$$

donde V_1 representa el valor del indicador actual mientras que V_0 el valor del indicador en el pasado.

Tabla 7. Tasa de crecimiento porcentual desde 2015 hasta 2030.

	Agua			Energía			Alimentos		
	W-1	W-2	W-3	E-1	E-2	E-3	F-1	F-2	F-3
2015	-20.41	0.91	-1.30	29.56	0.93	145.29	0.00	4.62	-1.36
2019	-4.59	2.46	-0.02	-35.17	0.71	74.77	0.00	2.94	-3.11
2025	316.40	0.00	-0.97	-15.74	0.35	2558.46	0.00	4.29	-2.75
2030	37.04	0.00	-0.47	-20.92	0.25	28.17	0.00	3.19	-4.25

El sector energético es el de mayor crecimiento principalmente en sostenibilidad, debido al incremento de las fuentes renovables. Por el contrario, se espera que para el año 2030, el indicador de disponibilidad de agua (W-1) disminuya, al igual que la sostenibilidad del agua y alimentaria.

En la **Figura 9**, los indicadores evaluados para todos los años analizados se ilustran en el mismo gráfico de radar, donde se observa la tendencia en la evaluación del índice WEF Nexus. Es importante señalar que a través de la evaluación de estos indicadores podemos tomar decisiones a mediano y largo plazo. Además, el índice WEF Nexus puede ser una herramienta eficiente para el desarrollo de políticas que podría ayudar a mejorar la seguridad de cada uno de los sectores involucrados a través de la planificación sostenible.

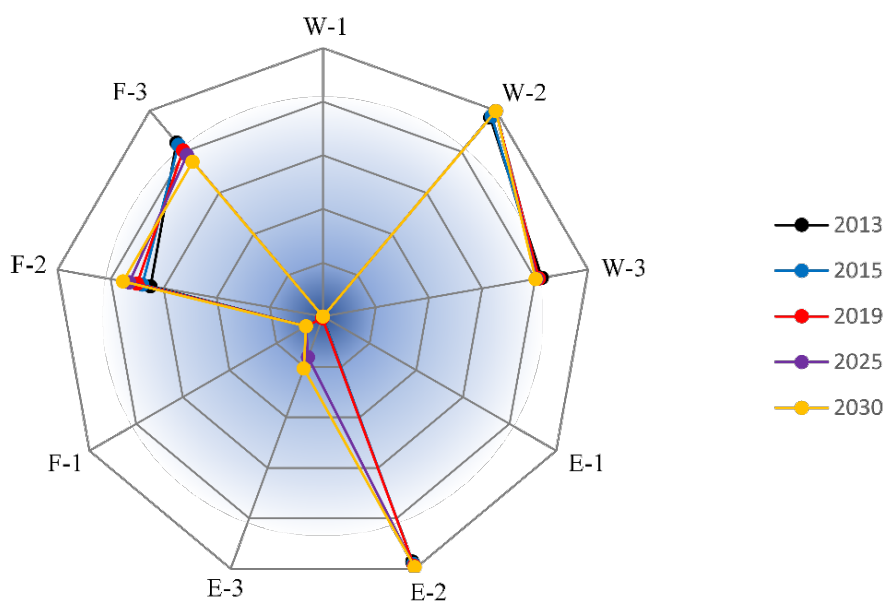


Figura 9. Evaluación de los índices del WEF Nexus en 17 años.

La **Figura 10** muestra el estado actual de producción y consumo de los sectores de Agua, Energía y Alimentos en el Estado de Sonora. Si bien el análisis de la seguridad del WEF a nivel estatal presenta algunos índices cercanos a 1 (W-2, E-2, F-2, W-3, F-3), es importante mencionar que en Sonora existe una desigualdad en la distribución espacial de los recursos.

En el caso de la seguridad hídrica, se debe prestar especial atención a la disponibilidad de agua. El pronóstico para el año 2030 muestra la disminución de los indicadores de disponibilidad de agua y sostenibilidad del agua, esto es consecuencia de la sobreexplotación de los recursos y la necesidad de trasvasar agua de otras cuencas para satisfacer las necesidades hídricas de los usuarios de la región. En cuanto al sector energético, es necesario aprovechar el recurso solar para implementar tecnologías solares para la generación de energía eléctrica y, de esta forma, incrementar la capacidad energética.

La evaluación del índice del WEF Nexus nos ayuda a cuantificar las tendencias en la seguridad de los recursos para comprender mejor las relaciones entre los recursos. Además, nos permite visualizar las perturbaciones que ponen en riesgo el desarrollo de la región y permite a los tomadores de decisiones implementar acciones o políticas para alcanzar los objetivos y metas de desarrollo sostenible.

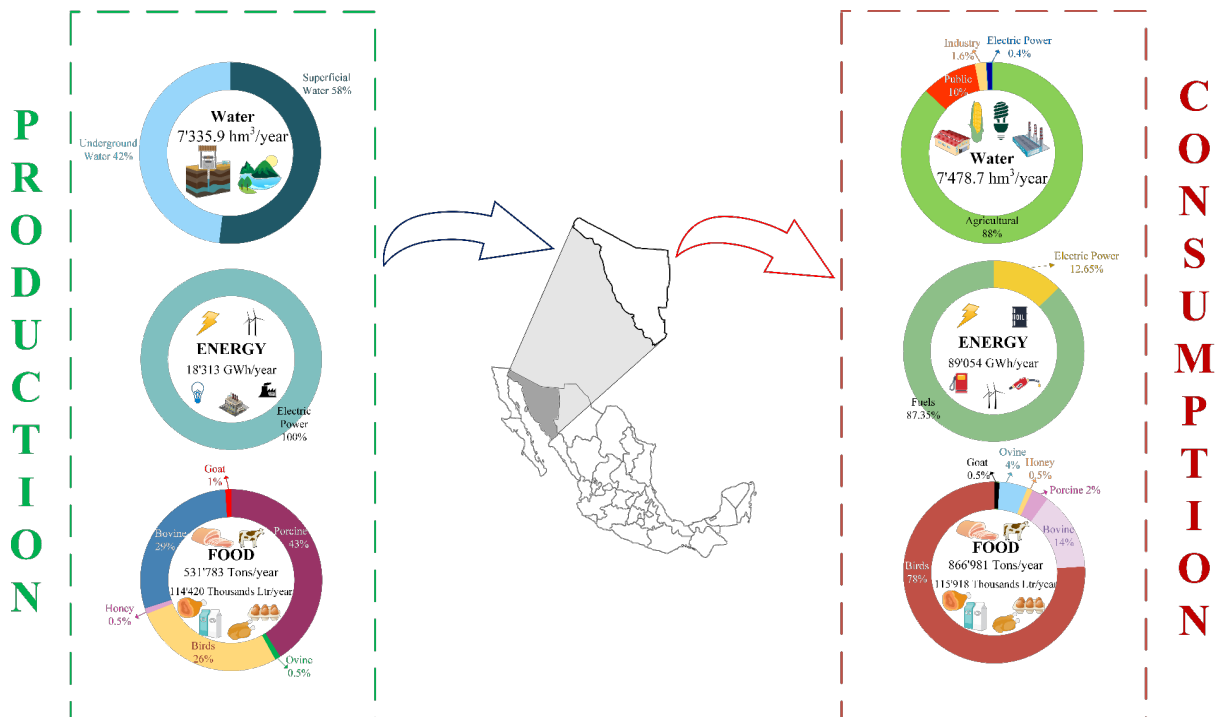


Figura 10. Producción y consumo de Agua, Energía y Alimentos en Sonora.

INDICADORES DE LOS OBJETIVOS Y METAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

En la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible se incluyen 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible como los principales para acabar con el hambre, los impactos del cambio climático y las desigualdades sociales. La evaluación de los indicadores de los SDG permite evaluar la calidad de una región desde diferentes perspectivas. En este trabajo se evaluaron los indicadores de los SDG para una mejor comprensión de las interrelaciones de recursos con el fin de identificar las áreas en las que se presentan las mayores deficiencias. En 2015, México se comprometió a tomar acciones con una perspectiva de largo plazo para promover el cumplimiento de los SDG⁴⁹, por lo que se evalúa la situación actual y los resultados de los 17 indicadores se presentan en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Indicadores de los Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible en Sonora

Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible	Indicador
1 Fin de la Pobreza	63.1
Recuento de la pobreza (%)	36.9
2 Hambre Cero	68.3
Prevalencia de desnutrición (%)	4.0
Prevalencia de obesidad en adultos (%)	22.2
3 Salud y Bienestar	68.3
Razón de mortalidad materna (por cada 100,000 nacimientos)	42.0
Mortalidad en niños menores de 5 años (por cada 1000 nacimientos)	14.1
Muertes de tráfico (por cada 100,000)	18.0
Esperanza de vida al nacer (años)	73.0
Fecundidad de las adolescentes (nacimientos por cada 1,000)	68.0
Fumadores diarios (% , edad 15+)	7.7
4 Educación de Calidad	91.3
Matriculación en la enseñanza primaria (%)	96.0
Matriculación en secundaria (%)	92.0
Alfabetización de las personas de 15 a 24 años de edad (%)	98.0

Matriculación en educación preescolar (% edades 4-6)	99.0
Población con educación terciaria (%)	97.0
Retraso educativo	34.0
5 Igualdad de Género	69.5
Años de escolaridad de mujeres (% masculino)	95.5
Participación femenina en mano de obra (% masculino)	63.1
Brecha salarial de género (% salario masculino)	50
6 Agua Limpia y Saneamiento	94.0
Población que utiliza al menos servicios básicos de agua (%)	96.0
Población que utiliza al menos servicios básicos de saneamiento (%)	91.9
7 Energía Asequible y No Contaminante	62.9
Acceso a la electricidad (%)	98.5
Acceso a energías no contaminantes (%)	85.0
Energía renovable en consumo final (%)	5.3
8 Trabajo Decente y Crecimiento Económico	64.5
Prevalencia de esclavitud moderna (víctimas por cada 1,000)	1.9
Acceso a una cuenta bancaria o dinero móvil(% adult pop.)	36.0
Tasa de desempleo (%)	3.6
Relación empleo-población (%)	95.0
Jóvenes desocupados (%)	5.1
9 Industria, Innovación e Infraestructura	70.3
Uso de Internet (%)	81.0
Suscriptores de Banda Ancha Móvil (por cada 100)	70.0
Mujeres en ciencia e ingeniería	60.0
10 Reducción de las Desigualdades	41.0
Coefficiente de Gini ajustado por ingresos máximos (1-100)	41.0
11 Ciudades y Comunidades Sostenibles	71.9
Fuente de agua mejorada, en tubería (%)	95.0
Satisfacción con el transporte público (%)	45.0
Casas con paneles solares (%)	0.6
Casas con colector solar (%)	3.2
12 Producción y Consumo Responsables	80.0
Residuo sólido municipal (kg/persona/día)	1.4
Residuo sólido municipal no reciclable (kg/persona/día)	1.1
13 Acción por el Clima	90.6

Emisiones de CO ₂ por energía (ton CO ₂ /cápita)	3.9
14 Vida Submarina	71.8
Índice de salud oceánica- Aguas limpias (0-100)	80.0
Poblaciones de peces sobreexplotadas o colapsadas (%)	63.5
15 Vida de Ecosistemas Terrestres	33.4
Sitios terrestres, área protegida media(%)	33.4
16 Paz, Justicia e Instituciones Sólidas	56.4
Homicidios (por cada 100,000)	0.1
Sensación de seguridad al caminar por la noche (%)	30.0
Nacimientos registrados (%)	95.0
Índice de percepción de la corrupción (0-100)	50.0
17 Alianzas para Lograr los Objetivos	53.0
Secrecy score (best 0-100 worst)	53.0

Sistema de Indicadores del estado de Sonora⁵⁰

Al investigar los indicadores que componen los SDG, es posible identificar los sectores que requieren más atención, en este caso, es el *SDG 15 Vida de ecosistemas terrestres*, y los relacionados con los aspectos sociales (*SDG 10, SDG 16 y SGD 17*), *Reducción de las desigualdades, Paz, justicia e instituciones sólidas y Alianza para lograr objetivos*, respectivamente .

El indicador que presenta el mejor desempeño es el *SDG 6 Agua limpia y saneamiento* de acuerdo con los indicadores de seguridad hídrica mostrados anteriormente (ver **Figura 11**). Comparando las metas relacionadas con el Índice WEF Nexus evaluadas para diferentes años, el *SDG 2 Hambre Cero* exhibe un indicador de 68.3, esto expresa los esfuerzos que se deben realizar para reducir la dieta desequilibrada y así disminuir el porcentaje de obesidad y la prevalencia de desnutrición en la población del estado. El *SDG 6 Agua Limpia y saneamiento* presenta un indicador de 94, este indicador se atribuye a que la mayoría de la población tiene acceso a servicios de agua potable y saneamiento. Por otro lado, en cuanto al *SDG 7 Energía asequible y no contaminante*, se presenta un indicador de 62,93 debido a la necesaria inclusión de las energías renovables en el sector energético. Los

resultados de los indicadores de los SDG y los obtenidos con el índice WEF Nexus presentan tendencias similares, por lo que es importante poner especial atención en estos sectores.

Cabe señalar que a pesar de las condiciones climáticas del estado de Sonora y la demanda de agua en los diferentes sectores, existen indicadores que muestran un buen manejo de los recursos hídricos. Sin embargo, se deben continuar los esfuerzos para que los impactos del cambio climático y el comportamiento de la población no perjudiquen al sector del agua por ser un recurso sine qua non para la seguridad energética y la producción agrícola.

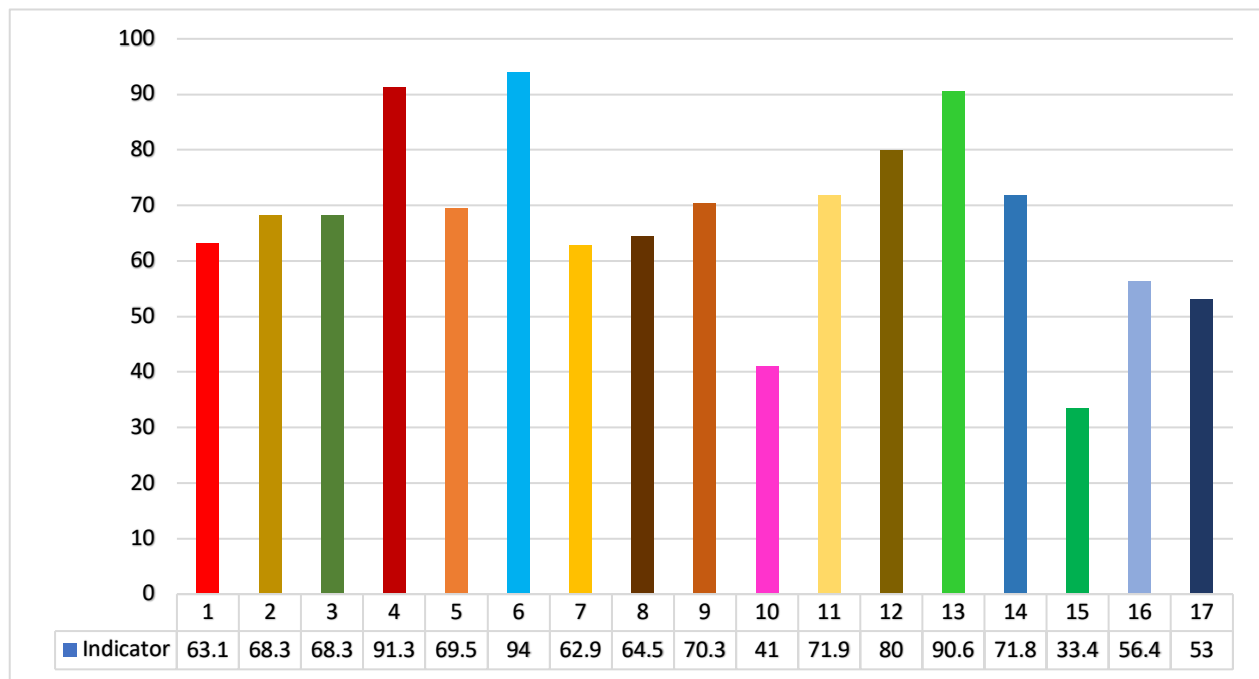


Figura 11. Representación de los Indicadores de los Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible.

CONCLUSIONES

La evaluación cuantitativa de la seguridad del Nexo Agua-Energía-Alimentos y el impacto que tienen estos tres sectores de manera simultánea, además de considerarse una herramienta integral y confiable para realizar predicciones de las demandas de recursos, sus producciones y consumos, debe ser referencia primordial para implementar políticas que enfrenten los desafíos actuales, buscando garantizar el desarrollo sostenible de una región y que, además, permite identificar los sectores más vulnerables y así ofrecer mejores soluciones.

Existen varios estudios e indicadores propuestos que han permitido tener una idea de las interrelaciones que existen entre los tres sectores, sin embargo, en este trabajo se presentó la cuantificación de la seguridad de los recursos considerando e incluyendo el progreso SDG, lo cual no se había hecho hasta ahora, además de que permite realizar proyecciones para escenarios futuros en regiones a cualquier escala. Este documento ha presentado un enfoque para evaluar el Nexo del WEF a nivel regional, especialmente para las zonas donde existe escasez de recursos, que incorpora la evaluación de nueve indicadores que representan el acceso, disponibilidad y sostenibilidad de Agua, Energía y Alimentos. Estos indicadores componen el Índice WEF Nexus, que es una herramienta útil para que los tomadores de decisiones obtengan información sobre las compensaciones entre la gestión de los recursos en línea con la agenda para los objetivos de desarrollo sostenible. El estado mexicano de Sonora se utilizó como estudio de caso. Esta región está constituida en su mayor parte por un territorio desértico donde hay un uso limitado de los recursos hídricos. Sin embargo, la parte sur del estado ha sido económicamente importante debido a las actividades agrícolas y ganaderas. Este contraste lleva a evaluar la situación en la que se encuentran los recursos.

Los resultados muestran que a pesar de las condiciones climáticas de la región, la Seguridad del Agua aún se puede mantener, y para el año 2030, habrá un pequeño aumento en el acceso, disponibilidad y sostenibilidad del agua.

Al mismo tiempo, la Seguridad Alimentaria y la Energética no presentan el mejor comportamiento ya que el crecimiento porcentual de la Seguridad Alimentaria es menor que los últimos años en términos de accesibilidad, y presenta una disminución en el indicador de sostenibilidad. Además, el sector de Energía es el que muestra tener las áreas más vulnerables debido a que no es capaz de producir suficiente electricidad para cubrir la alta demanda del estado. No obstante, las proyecciones para 2030 muestran que el indicador de sostenibilidad energética podría mejorarse con la implementación de tecnologías renovables y, en consecuencia, también se mejorará la disponibilidad y el acceso a la energía.

Para evaluar la situación actual en la que están involucrados los recursos, se consideraron los indicadores de los SDG. A través de este análisis fue posible identificar las áreas vulnerables en el estado. Los resultados obtenidos para los SDG relacionados con el agua, la energía y la seguridad alimentaria muestran predicciones similares a las obtenidas con el índice WEF Nexus. No obstante, se debe seguir investigando para comprender las interrelaciones de los recursos y, por lo tanto, implementar estrategias y formulación de políticas efectivas para lograr el desarrollo sostenible y el mejor desempeño de los SDG para 2030. La evaluación del índice WEF Nexus es una herramienta eficaz que se puede utilizar para evaluar y comprender las sinergias entre los recursos en cualquier nivel de escala, y proporcionar el estado actual de los recursos en una perspectiva social, económica y ambiental. El enfoque presentado es general y se puede aplicar a otras regiones del mundo.

Se deben continuar los esfuerzos en el desarrollo de indicadores que mejoren la comprensión de las interdependencias de los recursos. Entre algunas de las soluciones que podrían implementarse, se encuentra que para el sector hídrico, en la agricultura se podrían establecer esquemas de riego por goteo en lugar de riego por irrigación pues esto disminuye

en un gran porcentaje el consumo de agua, en el sector doméstico podrían establecerse sistemas de reutilización. Por otra parte, es evidente que producir energía eléctrica consume enormes cantidades de agua, por lo que es preciso la implementación de energías renovables. Una de las alternativas preferidas, es el uso de aerogeneradores, los cuales cada vez son más eficientes y competitivos económicamente con las plantas de potencia tradicionales.

Por último, es trascendental recalcar que nunca como hoy el estudio de la seguridad del Nexo Agua-Energía-Alimentos había sido tan importante, pues deben preservarse estos recursos no solo para garantizar la subsistencia de una región, sino la prosperidad del planeta.

BIBLIOGRAFÍA:

- (1) Zhang, X.; Li, H. Y.; Deng, Z. D.; Ringler, C.; Gao, Y.; Hejazi, M. I.; Leung, L. R. Impacts of climate change, policy and water-energy-food nexus on hydropower development. *Renew. Energ.* **2018**, 116, 827–834. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.030>.
- (2) Water Footprint Network. Water Stress <https://waterfootprint.org/en/about-us/news/news/water-stress-affect-52-worlds-population-2050/> (acceso Ago 15, 2020).
- (3) Water Footprint Network. Water Scarcity. <https://waterfootprint.org/en/about-us/news/news/water-scarcity-what-does-it-mean-sustainable-devel/> (acceso Ago 15, 2020).
- (4) European Commission. Water Scarcity and Drought in the European Union https://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/water_scarcity.pdf (acceso Jul 30, 2020).
- (5) U.S. Energy Information Administration (EIA). Texas - State Energy Profile Analysis. <https://www.eia.gov/state/analysis.php?sid=TX> (acceso Aug 15, 2020).
- (6) Renewable Energy Agency, I. Renewable Energy Prospects: China https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_REmap_China_report_2014.pdf (acceso Jul 30, 2020).
- (7) European Environmental Agency. Water Scarcity. <https://www.eea.europa.eu/archived/archived-content-water-topic/featured-articles/water-scarcity> (acceso Jul 30, 2020).
- (8) World Wildlife Fund. Water Scarcity. http://awsassets.wwf.es/downloads/informe_sequia_wwf_marzo2012.pdf (acceso Jul 30, 2020).
- (9) World Resources Institute. Ranking the World's Most Water-Stressed Countries in 2040. <https://www.wri.org/blog/2015/08/ranking-world-s-most-water-stressed-countries-2040> (acceso Ago 15, 2020).

- (10) International Energy Agency. Access to electricity – SDG7: Data and Projections – Analysis – IEA <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity> (acceso Jul 30, 2020).
- (11) FAO. GIEWS – Global Information and Early Warning System Libya <http://www.fao.org/giews/countrybrief/country.jsp?code=LBY> (acceso Jul 31, 2020).
- (12) Hoff. *Background Paper for the Bonn 2011 Nexus Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus*; 2011.
- (13) Sukhwani, V.; Shaw, R.; Mitra, B. K.; Yan, W. Optimizing food-energy-water (FEW) nexus to foster collective resilience in urban-rural systems. *Prog. Disaster Sci.* **2019**, *1*, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100005>.
- (14) Energy Information Administration. International Energy Outlook 2019 <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/> (acceso Jun 2020).
- (15) United Nations. IHP-VIII: Water Security <https://en.unesco.org/themes/water-security/hydrology/IHP-VIII-water-security> (acceso Jun 2020).
- (16) Boretti, A.; Rosa, L. Reassessing the projections of the world water development report. *npj Clean Water* **2019**, *2* (1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>.
- (17) de Amorim, W. S.; Valduga, I. B.; Ribeiro, J. M. P.; Williamson, V. G.; Krauser, G. E.; Magtoto, M. K.; de Andrade Guerra, J. B. S. O. The nexus between water, energy, and food in the context of the global risks: An analysis of the interactions between food, water, and energy security. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2018**, *72*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ear.2018.05.002>. (7) FAO; Food and Agriculture Organization of the United Nations. How to feed the World in 2050 http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf (acceso Jun 2020).
- (18) Ji, L.; Zheng, Z.; Wu, T.; Xie, Y.; Liu, Z.; Huang, G.; Niu, D. Synergetic optimization management of crop-biomass coproduction with food-energy-water nexus under uncertainties. *J. Clean. Prod.* **2020**, *258*, 120645. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120645>.
- (19) Biggs, E. M.; Bruce, E.; Boruff, B.; Duncan, J. M. A. A.; Horsley, J.; Pauli, N.; McNeill, K.; Neef, A.; Van Ogtrop, F.; Curnow, J.; Haworth, B.; Duce, S.; Imanari, Y.

- Sustainable development and the water-energy-food nexus: A perspective on livelihoods. *Environ. Sci. Policy* 2015, 54, 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>.
- (20) Zhang, X.; Li, H. Y.; Deng, Z. D.; Ringler, C.; Gao, Y.; Hejazi, M. I.; Leung, L. R. Impacts of climate change, policy and water-energy-food nexus on hydropower development. *Renew. Energ.* **2018**, 116, 827–834. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.030>.
- (21) Saidmamatov, O.; Rudenko, I.; Pfister, S.; Koziel, J. Water–Energy–Food Nexus Framework for Promoting Regional Integration in Central Asia. *Water* 2020, 12, 1896.
- (22) Lado, J. J.; Zornitta, R. L.; Vázquez Rodríguez, I.; Malverdi Barcelos, K.; Ruotolo, L. A. M. Sugarcane biowaste-derived biochars as capacitive deionization electrodes for brackish water desalination and water-softening applications. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2019, 7 (23), 18992–19004. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04504>.
- (23) Cansino-Loeza, B.; Ponce-Ortega, J. M. Involving the water-energy-food nexus in integrating low-income and isolated communities. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2019, 7 (1), 1399–1418. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05134>.
- (24) López-Díaz, D. C.; Hu, Y.; Chan, W.; Ponce-Ortega, J. M.; Zavala, V. M. Systems-level analysis of phosphorus flows in the dairy supply chain. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2019, 7 (20), 17065–17073. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03129>.
- (25) United Nations. Sustainable Development Goals. Extraído en Julio de 2020 de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- (26) United Nations. IHP-VIII: Water Security <https://en.unesco.org/themes/watersecurity/hydrology/IHP-VIII-water-security> (acceso Jun 2020).
- (27) United Nations. Alimentación <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/food/index.html> (Extraído en Julio de 2020).
- (28) Energy Information Administration. International Energy Outlook 2019 <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/> (Extraído en Julio de 2020).
- (29) Fernández, J. E.; Alcon, F.; Diaz-Espejo, A.; Hernandez-Santana, V.; Cuevas, M. V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case

- study of a super high density olive tree orchard. *Agric. Water Manag.* 2020, 237, 106074. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>.
- (30) Chen, S.; Chen, B. Urban energy–water nexus: A network perspective. *Appl. Energy* 2016, 184, 905–914. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.042>.
- (31) Herrera-Pantoja, M.; Hiscock, K. M. Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico. *Environ. Sci. Policy* 2015, 54, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.020>.
- (32) D’Ambrosio, E.; Gentile, F.; De Girolamo, A. M. Assessing the sustainability in water use at the basin scale through water footprint indicators. *J. Clean. Prod.* 2020, 244, 118847. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118847>.
- (33) Vanham, D.; Leip, A.; Galli, A.; Kastner, T.; Bruckner, M.; Uwizeye, A.; van Dijk, K.; Ercin, E.; Dalin, C.; Brandão, M.; Bastianoni, S.; Fang, K.; Leach, A.; Chapagain, A.; Van der Velde, M.; Sala, S.; Pant, R.; Mancini, L.; Monforti-Ferrario, F.; Carmona-Garcia, G.; Marques, A.; Weiss, F.; Hoekstra, A. Y. Environmental footprint family to address local to planetary sustainability and deliver on the SDGs. *Sci. Total Environ.* 2019, 25, 133642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133642>.
- (34) Jensen, O.; Wu, H. Urban water security indicators: Development and pilot. *Environ. Sci. Policy* 2018, 83, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.02.003>.
- (35) Schindler, F.; Michl, B.; Krenckel, P.; Riepe, S.; Benick, J.; Müller, R.; Richter, A.; Glunz, S. W.; Schubert, M. C. Optimized multicrystalline silicon for solar cells enabling conversion efficiencies of 22%. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2017, 171, 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.005>.
- (36) Augutis, J.; Krikštolaitis, R.; Martišauskas, L.; Urbonienė, S.; Urbonas, R.; Ušpurienė, A. B. Analysis of energy security level in the Baltic States based on indicator approach. *Energy* 2020, 199, 117427. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117427>.
- (37) Nie, Y.; Avraamidou, S.; Xiao, X.; Pistikopoulos, E. N.; Li, J.; Zeng, Y.; Song, F.; Yu, J.; Zhu, M. A food-energy-water nexus approach for land use optimization. *Sci. Total Environ.* 2018, 659, 7–19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.242>.

- (38) Kazemi, H.; Shokrgozar, M.; Kamkar, B.; Soltani, A. Analysis of cotton production by energy indicators in two different climatic regions. *J. Clean. Prod.* 2018, 190, 729–736. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.195>.
- (39) Liu, G.; Yang, Z.; Fath, B. D.; Shi, L.; Ulgiati, S. Time and space model of urban pollution migration: Economy-energy-environment nexus network. *Appl. Energy* 2017, 186, 96–114. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.132>.
- (40) World Food Programme. Meta Data for the Food Consumption Score (FCS) Indicator | World Food Programme <https://www.wfp.org/publications/meta-data-food-consumption-score-fcs-indicator> (acceso Jun 2020).
- (41) Yang, Y.; Anderson, M. C.; Gao, F.; Wardlow, B.; Hain, C. R.; Otkin, J. A.; Alfieri, J.; Yang, Y.; Sun, L.; Dulaney, W. Field-scale mapping of evaporative stress indicators of crop yield: An application over mead, NE, USA. *Remote Sens. Environ.* 2018, 210, 387–402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.020>.
- (42) Liu, Y.; Wang, S.; Chen, B. Optimization of national food production layout based on comparative advantage index. In *Energy Procedia*; 2019, 158, 3846–3852. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.862>.
- (43) Saladini, F.; Betti, G.; Ferragina, E.; Bouraoui, F.; Cupertino, S.; Canitano, G.; Gigliotti, M.; Autino, A.; Pulselli, F. M.; Riccaboni, A.; Bidoglio, G.; Bastianoni, S. Linking the water-energy-food nexus and sustainable development indicators for the mediterranean region. *Ecol. Indic.* 2018, 91, 689–697. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.035>.
- (44) Yuan, M. H.; Lo, S. L. Developing indicators for the monitoring of the sustainability of food, energy, and water. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, 119, 109565. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109565>.
- (45) Mahlkecht, J.; González-Bravo, R.; Loge, F. J. Water-energy-food security: A nexus perspective of the current situation in Latin America and the Caribbean. *Energy*. 2020, 116824. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116824>.
- (46) United Nations. About the Sustainable Development Goals – United Nations Sustainable Development <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (acceso Jul 31, 2020).

- (47) Willis, H.; Groves, D.; Ringel, J.; Mao, Z.; Efron, S.; Abbott, M. Developing the Pardee RAND Food-Energy-Water Security Index: Toward a Global Standardized, Quantitative, and Transparent Resource Assessment | RAND <https://www.rand.org/pubs/tools/TL165.html> (accesso Jul 31, 2020).
- (48) Venghaus, S.; Dieken, S. From a Few Security Indices to the FEW Security Index: Consistency in Global Food, Energy and Water Security Assessment. *Sustain. Prod. Consum.* **2019**, 20, 342–355. DOI 10.1016/j.spc.2019.08.002.
- (49) The Economist Intelligence Unit; CORTEVA. Global Food Security Index (GFSI) <https://foodsecurityindex.eiu.com/> (accesso Jul 31, 2020).
- (50) Reig, P.; Shiao, T.; Gassert, F. Aqueduct Water Risk Framework <http://www.wri.org/publication/aqueduct-water-> (accesso Jul 31, 2020).