Naturaleza y TECNOLOGÍA
Número Especial "Pasado, presente y futuro del PSE y sus aplicaciones"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

APLICACIONES DE LA INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PROCESOS EN EL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTO: AVANCES, RETOS Y PERSPECTIVAS

Diana Karen Zavala-Vega [a], César Ramírez-Márquez [a], José María Ponce-Ortega[a,*]

[a] Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México, 58060. jose.ponce@umich.mx

Resumen

La Ingeniería de Sistemas de Procesos (ISP) es una rama de la ingeniería que se enfoca en analizar, diseñar y optimizar sistemas complejos. Su aplicación en el nexo agua-energía-alimento resulta esencial para enfrentar los grandes desafíos de la sostenibilidad, ya que permite comprender cómo se interrelacionan estos tres recursos fundamentales. A través de modelos, simulaciones y herramientas de optimización, la ISP ha impulsado avances en áreas como la agricultura de precisión, el uso eficiente del agua, la integración de energías renovables y la mejora en la producción de alimentos. No obstante, aún enfrenta retos como la falta de datos confiables, los altos costos de implementación y la necesidad de políticas integradas. Mirando hacia el futuro, la ISP abre perspectivas prometedoras para lograr sistemas más resilientes, eficientes y sostenibles, contribuyendo a garantizar la seguridad hídrica, energética y alimentaria en un contexto de cambio climático y de creciente demanda global.

Palabras clave: Ingeniería de Sistemas de Procesos; Nexo agua-energía-alimento; Innovación tecnológica; Sostenibilidad; Retos y perspectivas.

Naturaleza y TECNOLOGÍA

Número Especial "Pasado, presente y futuro del PSE y sus aplicaciones"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

APPLICATIONS OF PROCESS SYSTEMS ENGINEERING IN THE WATER-ENERGY-FOOD NEXUS: ADVANCES, CHALLENGES, AND PERSPECTIVES

Abstract

Process Systems Engineering (PSE) is a branch of engineering that focuses on analyzing, designing, and optimizing complex systems. Its application in the water-energy-food nexus is essential for addressing the major challenges of sustainability, as it provides an understanding of how these three fundamental resources interrelate. Through models, simulations, and optimization tools, PSE has driven advances in areas such as precision agriculture, efficient water use, renewable energy integration, and improved food production. However, it still faces challenges such as a lack of reliable data, high implementation costs, and the need for integrated policies. Looking ahead, PSE offers promising prospects for achieving more resilient, efficient, and sustainable systems, thereby helping to ensure water, energy, and food security in a context of climate change and growing global demand.

Keywords: Process Systems Engineering; Water-energy-food nexus; Technological innovation; Sustainability; Challenges and prospects.

1. Introducción

El nexo agua-energía-alimento explica la compleja y estrecha relación entre tres recursos esenciales para la vida humana y el desarrollo de las sociedades. Estos recursos mantienen dependencias mutuas que hacen necesario abordarlos de manera conjunta para avanzar hacia un desarrollo sostenible que integre las dimensiones social, económica y ambiental. El agua, la energía y los alimentos constituyen la base del bienestar humano y del crecimiento económico (Li y col., 2019).

El agua, que representa alrededor del 80% de la masa de los seres vivos, es indispensable para la fotosíntesis, el mantenimiento de los ecosistemas y la producción agrícola. Además, desempeña un papel decisivo en la industria, el abastecimiento urbano y la generación eléctrica. La energía es el motor de todas las actividades productivas y posibilita el bombeo, transporte y tratamiento del agua, así como la mecanización agrícola y el procesamiento industrial de los alimentos. En cuanto a estos últimos, su producción y

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

distribución dependen directamente de la disponibilidad de agua y energía; el riego, la fertilización, la refrigeración y el transporte de los productos alimentarios requieren ambos recursos. Por ello, el equilibrio entre la oferta hídrica y energética condiciona de manera directa la seguridad alimentaria y, en consecuencia, el bienestar social (Ávila-Castañeda y col., 2023).

El término "nexo" enfatiza la interdependencia entre los sistemas alimentario, hídrico y energético (**Figura 1**). Este enfoque busca comprender y gestionar de manera integrada los vínculos entre dichos sectores para aprovechar sus sinergias y reducir los impactos negativos que surgen cuando se actúa de forma aislada. Cualquier política o intervención aplicada en uno de ellos repercute inevitablemente en los otros dos. Por ello, resulta indispensable considerar sus interacciones de forma simultánea. En un principio, la investigación se centró en los vínculos entre pares como agua y energía (Dai y col., 2018), agua y alimentos o energía y alimentos, pero con el tiempo se reconoció la necesidad de analizar la triada completa y las relaciones que se establecen entre los tres recursos (Cansino-Loeza y Ponce-Ortega, 2024).



Figura 1. Representación del nexo agua-energía-alimento.

La falta de acceso seguro al agua y la energía puede comprometer la producción y disponibilidad de alimentos, del mismo modo que un sistema alimentario ineficiente o dependiente de combustibles fósiles incrementa la presión sobre los recursos hídricos y energéticos. En conjunto, estas interrelaciones sustentan el enfoque del nexo agua-energía-alimentos como un sistema integrado, reforzando la importancia de una gestión conjunta de los recursos (Li y col., 2019).

Durante gran parte del siglo XX, el crecimiento económico y demográfico impulsó la explotación intensiva de los recursos naturales sin considerar las

consecuencias ecológicas y sociales. La expansión agrícola, el uso indiscriminado de combustibles fósiles y la sobreexplotación de los acuíferos reflejan una gestión fragmentada que ha deteriorado los ecosistemas y amenazado la seguridad de los recursos. Si no se adoptan estrategias integrales de administración, el nexo agua-energía-alimento podría enfrentar un colapso funcional, con graves efectos sobre el ambiente, la economía y la estabilidad social (Afkhami y Zarrinpoor, 2022). Por ello, es urgente desarrollar políticas y herramientas científicas que promuevan la optimización de sinergias entre sectores y la reducción de impactos negativos, garantizando al mismo tiempo la seguridad hídrica, energética y alimentaria con criterios económicos, sociales y ambientales (Ghodsvali y col., 2022).

A nivel mundial, las proyecciones son preocupantes. Se estima que para 2050 la producción de alimentos y energía deberá incrementarse en un 70% y un 50%, respectivamente, mientras que la demanda de agua aumentará cerca de un 55%, impulsada por el crecimiento poblacional y el desarrollo económico (Raya-Tapia y col., 2023). Frente a este panorama, han surgido instrumentos analíticos como el Índice de Seguridad del Nexo Agua-Energía-Alimento, que permite evaluar de manera integral la disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad de los recursos. Este tipo de indicadores constituye una herramienta fundamental para orientar la formulación de políticas públicas. Además, permite diseñar estrategias de gestión sostenible que respondan tanto a las presiones ambientales como al aumento de la demanda.

En este escenario, la ingeniería de sistemas de procesos (ISP) se consolida como una disciplina clave para el estudio, diseño y optimización de sistemas complejos en los que interactúan agua, energía y alimentos. La ISP se centra en el desarrollo y la mejora de la concepción de procesos y productos, así como en su dinámica y control, con una orientación explícita hacia la sostenibilidad. Las iniciativas encaminadas a este objetivo han ampliado de manera significativa los límites tradicionales de la disciplina, incorporando de forma integral los componentes económicos, ecológicos y sociales asociados a los procesos, los productos y sus respectivos ciclos de vida (Bakshi, 2019). Gracias a este enfoque, es posible identificar estrategias que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de agua sin afectar la productividad agrícola. Un ejemplo de ello es

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

el trabajo de Cansino-Loeza y Ponce-Ortega (2024), quienes demostraron que la incorporación de sistemas de riego alimentados con energía solar puede disminuir significativamente las emisiones de dióxido de carbono y los requerimientos hídricos. De manera similar, Yadav y col. (2024) propusieron un esquema de gestión energética que maximiza el uso de energía fotovoltaica, garantiza el suministro eléctrico y reduce el consumo de agua, fortaleciendo el nexo agua-energía-alimentos.

La aplicación de la ISP en el estudio del nexo agua-energía-alimento ha permitido evaluar de manera integrada la eficiencia económica junto con los impactos ambientales y sociales. Los modelos desarrollados bajo este enfoque cuantifican las consecuencias de diferentes decisiones tecnológicas y políticas, considerando los costos financieros, los impactos ecológicos y las implicaciones sociales. En América Latina, la investigación ha mostrado que la agricultura intensiva puede transformarse en un sistema sustentable mediante el uso de tecnologías de eficiencia energética, la reutilización de aguas residuales tratadas y el aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de biogás (Bedolla-Rivera y col., 2023).

Diversos organismos internacionales han reconocido la relevancia de la ISP como una herramienta clave para vincular la investigación científica con la toma de decisiones en contextos complejos (Kiss y Grievink, 2019). La Comisión Económica para América Latina y el Caribe y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente han señalado que el enfoque integrado del nexo agua-energía-alimento requiere la colaboración de ingenieros, economistas, científicos y responsables de políticas públicas. La ISP facilita esta cooperación mediante marcos analíticos que integran información cuantitativa y cualitativa, permitiendo formular soluciones adaptadas a cada contexto.

Más allá de su dimensión técnica, el nexo agua-energía-alimento plantea un desafío institucional y cultural. La incorporación de la ISP en las políticas públicas puede mejorar la coordinación entre sectores, reducir desigualdades y favorecer la sostenibilidad a largo plazo. Desde esta perspectiva, la ingeniería deja de ser una práctica exclusivamente operativa para convertirse en un instrumento de planeación estratégica, capaz de equilibrar productividad, equidad y conservación ambiental. Comprender el nexo agua-energía-alimento desde la óptica de la

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

Ingeniería de Sistemas de Procesos implica analizar no solo las interacciones físicas y económicas, sino también los mecanismos de gobernanza y planificación territorial que permitan orientar las decisiones hacia un uso racional de los recursos y una transición sostenible que asegure el bienestar de las generaciones presentes y futuras.

2. Desarrollo y aplicaciones de la Ingeniería de Sistemas de Procesos en el nexo agua-energía-alimento

Debido a la complejidad inherente a la gestión conjunta de los recursos naturales, la aplicación de herramientas cuantitativas provenientes de la ISP ha adquirido una relevancia central para abordar los retos del nexo agua-energía-alimento (**Figura 2**). Esta disciplina proporciona marcos metodológicos rigurosos para analizar sistemas complejos y proponer estrategias de optimización en los que confluyen variables económicas, ambientales y sociales. Su valor radica en que permite representar de manera matemática los flujos de agua, energía y materia, identificar sus interdependencias y evaluar distintas alternativas de gestión que busquen simultáneamente sostenibilidad y eficiencia (Sušnik y col., 2022).

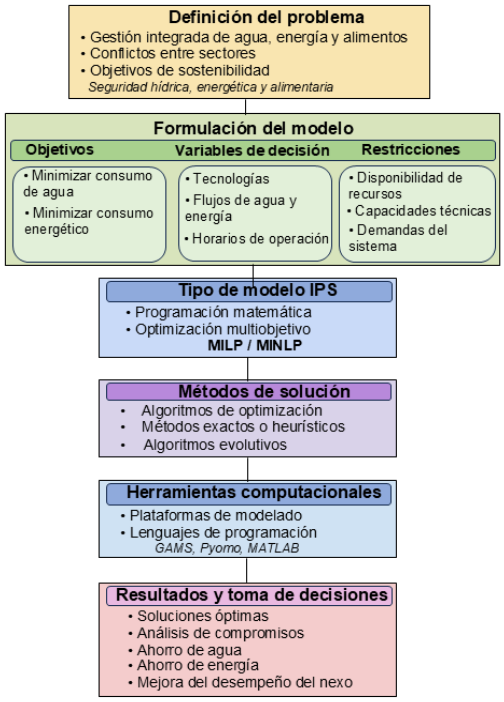


Figura 2. Formulación de problemas del nexo agua-energía-alimentos mediante ISP.

Entre las principales contribuciones de la ISP al nexo se encuentra el desarrollo de modelos de optimización multiobjetivo, que permiten equilibrar objetivos contradictorios como la minimización de costos, la reducción de emisiones contaminantes y la maximización de la seguridad alimentaria. Estos modelos han sido aplicados en diversos estudios regionales para diseñar estrategias que compatibilicen la disponibilidad hídrica y energética con la producción de alimentos. Raya-Tapia y col. (2023) propusieron un modelo para regiones agrícolas en México que optimiza simultáneamente la extracción de agua y las emisiones de dióxido de carbono

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

mediante la incorporación de plantas de tratamiento y sistemas de reúso. Los resultados mostraron que las decisiones de diseño en infraestructura hídrica pueden reducir hasta un 30% el impacto ambiental total si se integran criterios energéticos desde la etapa de planificación.

Otra aplicación destacada de la ISP es la creación de indicadores integrales de seguridad del nexo agua-energía-alimento. El Índice de Seguridad propuesto por Hejnowicz y col. (2022) constituye un ejemplo de cómo la ingeniería puede cuantificar la disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad de los recursos a escala regional. Este índice combina datos sobre consumo energético, disponibilidad hídrica y productividad agrícola, generando un diagnóstico multidimensional que orienta las políticas públicas. En comparación con los enfoques tradicionales que analizan los sectores de manera aislada, la ISP permite vincularlos y ofrecer una visión más realista de los desafíos de seguridad de recursos (ver **Tabla 1**).

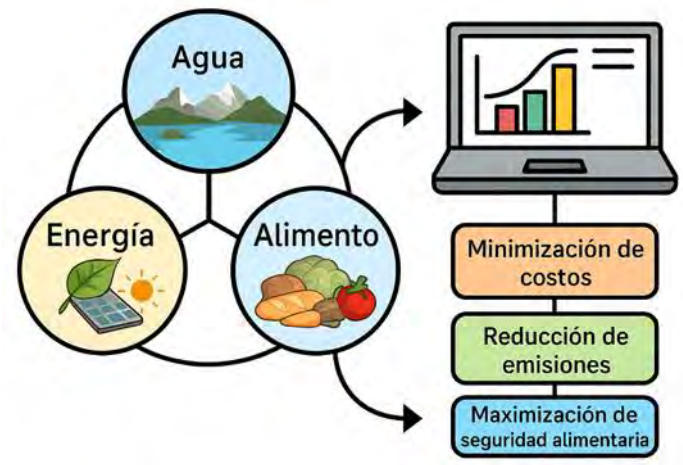


Figura 3. Aplicación de la Ingeniería de Sistemas de Procesos en el estudio del nexo agua-energía-alimento.

Tabla 1. Aplicaciones de la Ingeniería de Sistemas de Procesos en el nexo agua-energía-alimentos.

Aplicación de la ISP al nexo	Recurso(s) involucrado(s)	Herramientas empleadas	Principales beneficios	Referencia
Optimización multiobjetivo de sistemas agrícolas	Agua - Energía - Alimentos	Modelos de optimización multiobjetivo	Reducción de costos y emisiones; mejora de la seguridad alimentaria	Raya-Tapia y col. (2023)
Índices de seguridad del nexo	Agua - Energía - Alimentos	Indicadores integrales	Evaluación integral para políticas públicas	Hejnowicz y col. (2022)
Integración de energías renovables en agricultura	Energía - Agua - Alimentos	Modelado de procesos, balances energéticos	Reducción de GEI y costos operativos	Afshar y col. (2022)
Uso de SIG y análisis espacial	Agua - Energía - Alimentos	SIG y modelado matemático	Optimización territorial de infraestructura	Sušnik y col. (2022)

Inteligencia artificial y modelos dinámicos predictivos	Agua - Energía	Simulación en tiempo real y análisis de datos	Mayor eficiencia y resiliencia	Jiao y col. (2024)

1

La integración de energías renovables dentro del marco del nexo ha sido otra línea de trabajo prioritaria. Afshar y col. (2022) demostraron que la introducción de fuentes solares y de biogás en sistemas agrícolas irrigados puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en más del 25%, además de disminuir los costos operativos y la dependencia de combustibles fósiles. A través del modelado de procesos, la ISP permite analizar los balances energéticos y diseñar sistemas híbridos capaces de aprovechar los residuos agrícolas para generar energía, cerrar ciclos de materia y reducir la presión sobre los ecosistemas. Estas estrategias coinciden con los principios de la economía circular y la simbiosis industrial, que buscan convertir los desechos de un proceso en insumos para otro.

El avance tecnológico también ha favorecido el uso de herramientas digitales y sistemas de información geográfica (SIG) que amplían las capacidades de la ISP. Gracias a estas plataformas, es posible representar espacialmente los flujos de agua, energía y alimentos, identificar zonas de alta vulnerabilidad y proponer estrategias de manejo territorial basadas en evidencia. La combinación de modelado matemático y análisis geoespacial ofrece una visión integral del territorio y permite optimizar la localización de infraestructuras clave como plantas de tratamiento, biodigestores o parques solares, de modo que se minimicen los impactos ambientales y los costos de transporte.

Asimismo, la incorporación de tecnologías emergentes como los gemelos digitales y la inteligencia artificial ha abierto nuevas perspectivas para el monitoreo y la gestión del nexo. Jiao y col. (2024) demostraron que la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático en la gestión del riego agrícola puede reducir el consumo de agua hasta en un 15% y aumentar la eficiencia energética del sistema. Los gemelos digitales, que reproducen en tiempo real el comportamiento físico de los sistemas productivos, permiten prever escenarios de falla, ajustar variables operativas y mejorar la resiliencia frente a condiciones climáticas extremas. La ISP, al integrar estas tecnologías, transforma la toma

de decisiones en un proceso dinámico y predictivo, orientado hacia la sostenibilidad.

La planificación territorial y la cooperación intersectorial constituyen también campos donde la ISP ha mostrado resultados notables. Su enfoque jerárquico facilita el diseño de modelos de optimización a distintas escalas, desde la planta individual hasta el nivel regional o nacional. Terrapon-Pfaff y col. (2018) destacaron que esta capacidad multiescala es esencial para garantizar coherencia entre las políticas locales de agua, energía y agricultura. En este sentido, la ISP no solo proporciona herramientas analíticas, sino que también contribuye al desarrollo de marcos de gobernanza que promuevan la coordinación entre actores públicos y privados.

Además, la ISP ha sido fundamental en la evaluación ambiental mediante el análisis de ciclo de vida (ACV). Esta herramienta, que cuantifica los impactos ambientales de un producto o proceso desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, se ha utilizado para evaluar los efectos acumulativos de los sistemas agro-energéticos. Los resultados obtenidos permiten priorizar tecnologías más limpias, definir puntos críticos y proponer estrategias de mitigación en los sectores involucrados en el nexo.

En conjunto, las aplicaciones de la Ingeniería de Sistemas de Procesos en el nexo agua-energía-alimento evidencian su potencial como marco científico y práctico para integrar sostenibilidad, eficiencia y equidad. Gracias a su capacidad para combinar datos, modelos y herramientas de optimización, la ISP transforma la manera en que se diseñan y operan los sistemas productivos, ofreciendo soluciones que responden simultáneamente a las demandas de seguridad hídrica, energética y alimentaria. Esta integración marca un avance decisivo hacia una gestión más inteligente de los recursos naturales y un futuro donde las decisiones se basen en evidencia técnica, cooperación institucional y responsabilidad ambiental.

Debido al carácter divulgativo de este trabajo, en la **Tabla 2** se presentan definiciones conceptuales de los principales términos técnicos utilizados en el análisis del nexo agua-energía-alimento desde la perspectiva de la Ingeniería de Sistemas de Procesos (ISP), con el fin de facilitar su comprensión.

Tabla 2. Definición de conceptos clave utilizados en el enfoque de la Ingeniería de Sistemas de Procesos (ISP).

Concepto	Definición
Optimización multiobjetivo	Metodología que busca identificar las mejores soluciones posibles cuando se deben cumplir varios objetivos simultáneamente, los cuales pueden estar en conflicto, como minimizar costos y emisiones mientras se maximiza la eficiencia energética.
Modelado de procesos	Representación matemática o computacional de un proceso real que permite analizar su comportamiento, evaluar distintos escenarios y apoyar la toma de decisiones.
Balances energéticos	Herramientas que permiten cuantificar la energía que entra, se transforma y sale de un sistema, con el fin de evaluar su eficiencia e identificar pérdidas energéticas.
Sistema multiescala	Sistema que opera e interactúa en diferentes niveles o escalas, desde componentes individuales hasta el sistema completo, o desde intervalos de tiempo cortos hasta largos.
Dependencias dinámicas	Relaciones entre variables que cambian con el tiempo, donde el estado actual del sistema depende de su comportamiento previo.
Algoritmos evolutivos con métodos deterministas	Técnicas de optimización que combinan algoritmos inspirados en la evolución natural con métodos matemáticos tradicionales para explorar y refinar soluciones de manera eficiente.
Estrategias de simplificación jerárquica	Métodos que reducen la complejidad de un sistema mediante su división en niveles, conservando los elementos más relevantes sin perder representatividad.

Calor residual	Energía térmica liberada como subproducto de un proceso que normalmente no se aprovecha, pero que puede recuperarse para mejorar la eficiencia energética.

3. Retos y perspectivas futuras

A pesar de los avances logrados por la ISP en el estudio y la optimización del nexo agua-energía-alimento, su aplicación a gran escala todavía enfrenta desafíos considerables. Uno de los principales problemas es la falta de información homogénea y confiable sobre consumo, eficiencia, emisiones y disponibilidad de recursos, tanto en los sectores productivos como en los domésticos. En muchos países, la información estadística se encuentra fragmentada o desactualizada, lo que limita la construcción de modelos precisos y la validación de resultados. La calidad y disponibilidad de los datos son factores determinantes para la utilidad de los sistemas de optimización. Estos elementos resultan clave tanto en la planificación de políticas públicas como en la gestión regional del nexo. Cuando los modelos carecen de información consistente, las proyecciones pueden conducir a errores en la asignación de recursos o en la estimación de impactos ambientales (Beven, 2018).

Otro reto importante está relacionado con la complejidad computacional de los modelos que emplea la ISP. El nexo agua-energía-alimento constituye un sistema multiescala en el que convergen procesos físicos, químicos, económicos y sociales altamente interdependientes. Representar estas interacciones mediante una formulación matemática unificada implica manejar un elevado número de variables, restricciones no lineales y dependencias dinámicas. La resolución de modelos de gran escala exige, por tanto, herramientas de cálculo avanzadas y algoritmos de optimización capaces de equilibrar múltiples objetivos, como la minimización de costos, la reducción de emisiones o la mejora de la distribución equitativa de los recursos. Estos modelos suelen integrar variables continuas y discretas, así como ecuaciones diferenciales que describen la evolución temporal de los procesos, lo que incrementa significativamente la carga computacional. A ello se suma la incertidumbre asociada a parámetros clave, como la demanda futura de

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

recursos. En conjunto, la no linealidad, la dinámica, la incertidumbre y la alta dimensionalidad constituyen los principales desafíos en el análisis del nexo agua-energía-alimento. Para abordar este problema, se han desarrollado técnicas híbridas que combinan algoritmos evolutivos con métodos deterministas, así como estrategias de simplificación jerárquica que reducen la complejidad del sistema sin perder representatividad.

También persiste un reto institucional y político. En la mayoría de los países, las políticas de agua, energía y agricultura se elaboran de manera independiente, con poca coordinación entre los organismos responsables. Esta fragmentación dificulta la adopción de un enfoque integral del nexo y genera duplicidades o contradicciones en la gestión de recursos. La falta de mecanismos de gobernanza intersectorial impide que las soluciones propuestas por la ISP puedan aplicarse de forma efectiva. Superar este obstáculo requiere fortalecer la cooperación entre ministerios, promover la interoperabilidad de datos y establecer marcos regulatorios que incentiven la planificación coordinada (Ghodsvali y col., 2022).

La dimensión social constituye otro de los grandes desafíos del nexo agua-energía-alimento. Los modelos de optimización suelen centrarse en la eficiencia técnica y económica, pero no siempre incorporan indicadores que reflejen la equidad en el acceso a los recursos. La seguridad hídrica, energética y alimentaria no puede garantizarse únicamente mediante eficiencia, sino también mediante justicia distributiva y participación comunitaria. Los modelos de la ISP necesitan integrar variables sociales y culturales que permitan evaluar cómo las decisiones tecnológicas impactan en distintos grupos de población, especialmente en aquellos que viven en condiciones de vulnerabilidad o dependencia directa de los recursos naturales. En este sentido, la ingeniería debe avanzar hacia un enfoque más inclusivo, que reconozca la diversidad de realidades locales y fomente la resiliencia social junto con la ambiental.

Desde el punto de vista tecnológico, otro reto es incorporar en los modelos de la ISP criterios de resiliencia y adaptación al cambio climático. Los sistemas deben ser capaces de responder ante perturbaciones como sequías, variaciones en los precios de la energía o crisis alimentarias. Para lograrlo, es necesario integrar la incertidumbre en las

formulaciones matemáticas y desarrollar modelos predictivos capaces de simular escenarios a largo plazo. Esta aproximación estocástica, combinada con la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, ofrece nuevas oportunidades para anticipar riesgos y evaluar estrategias de mitigación de manera más

Las perspectivas futuras del nexo agua-energía-alimento son amplias y prometedoras (ver **Tabla 3**). El avance de la digitalización, la sensorización y los sistemas de monitoreo en tiempo real permitirá recopilar datos con mayor precisión y alimentar modelos de optimización dinámicos. Las herramientas de análisis de grandes volúmenes de datos (big data) facilitarán la identificación de patrones de consumo y la detección temprana de ineficiencias. Además, los gemelos digitales se consolidarán como instrumentos de gestión inteligente, capaces de reproducir el comportamiento físico de los sistemas y de proponer ajustes automáticos para mejorar su desempeño.

La convergencia entre la ISP y la economía circular abrirá nuevas oportunidades para transformar los sistemas productivos. En lugar de considerar los residuos como desechos, estos podrán valorizarse como insumos energéticos o fertilizantes, cerrando los ciclos de materia y energía. Por ejemplo, el aprovechamiento de los residuos agrícolas para producir biogás o biofertilizantes permite reducir la dependencia de combustibles fósiles y mejorar la eficiencia global del sistema (Afshar y col., 2022). De esta manera, el nexo agua-energía-alimento se convierte en una plataforma para impulsar procesos industriales más limpios y regenerativos.



Figura 4. Marco metodológico para abordar problemas del nexo.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

Tabla 3. Retos y perspectivas futuras de la Ingeniería de Sistemas de Procesos en el nexo agua-energía-alimentos

Categoría	Reto principal	Implicaciones	Perspectivas futuras
Datos e información	Falta de datos homogéneos y confiables	Modelos con alta incertidumbre	Digitalización, sensores y big data
Computacional	Alta complejidad de los modelos	Mayor tiempo de cómputo y costo de cálculo	Algoritmos híbridos e IA
Institucional	Débil coordinación intersectorial en la gestión del nexo	Baja implementación de soluciones integradas	Alinear políticas públicas y fortalecer la coordinación entre sectores.
Social	Baja incorporación de criterios sociales en los modelos de optimización	Riesgo de rechazo social o poca aceptación de las soluciones	Integración de variables sociales
Cambio climático	Alto riesgo de fenómenos extremos	Sistemas poco resilientes	Modelos estocásticos y predictivos

Otro campo emergente es la planificación territorial integrada. La ISP puede apoyar la creación de eco-regiones o parques agroindustriales donde las sinergias entre sectores se maximicen. El diseño de estas regiones, basado en análisis multicriterio y modelos de optimización, permitirá que los excedentes de un proceso (como el calor residual o los efluentes tratados) sean aprovechados por otros sistemas cercanos. Esta visión, inspirada en la simbiosis industrial, fortalece la autosuficiencia local y reduce la huella ambiental de las actividades productivas.

Finalmente, las perspectivas de la ISP en el nexo agua-energía-alimento apuntan hacia una transformación en la forma de tomar decisiones. Las políticas futuras deberán incorporar modelos cuantitativos como herramientas obligatorias de planeación, garantizando que las estrategias de desarrollo se basen en evidencia técnica. Al mismo tiempo, será esencial formar profesionales capaces de trabajar de manera interdisciplinaria, combinando conocimientos de ingeniería, economía, medio ambiente y ciencias sociales. En el futuro, la aplicación del enfoque de ISP permitirá diseñar sistemas más adaptativos, equitativos y sostenibles, consolidando un nuevo paradigma de gestión integrada de los recursos naturales que responda a los desafíos del cambio climático y del crecimiento demográfico global.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

4. Conclusiones

El análisis de la relación entre el agua, la energía y los alimentos confirma que estos tres elementos constituyen un sistema interdependiente, cuya gestión integrada es indispensable para alcanzar un desarrollo verdaderamente sostenible. La aplicación de la ISP en este contexto ha demostrado ser una herramienta poderosa para comprender, modelar y optimizar los flujos de recursos, permitiendo evaluar las implicaciones económicas, ambientales y sociales de cada decisión. Esta disciplina ofrece un marco analítico capaz de conectar el conocimiento técnico con la planeación estratégica, fortaleciendo la capacidad de los gobiernos, las industrias y las comunidades para diseñar políticas y soluciones basadas en evidencia.

Los avances recientes en modelado y simulación del nexo agua-energía-alimento han permitido pasar de enfoques fragmentados a visiones holísticas, en las que los recursos se consideran como partes de un solo sistema socioambiental. Gracias a la ISP, es posible representar matemáticamente la interacción entre los flujos de agua, energía y materia, e identificar configuraciones óptimas que equilibren eficiencia, sostenibilidad y resiliencia. Estas herramientas han sido aplicadas con éxito en el diseño de estrategias para la agricultura de precisión, el uso de energías renovables, la reutilización de aguas residuales y la valorización de residuos agroindustriales.

Sin embargo, persisten desafíos significativos. No obstante, la implementación práctica de soluciones derivadas de la ISP continúa enfrentando desafíos significativos, entre los que destacan la falta de datos consistentes, la fragmentación institucional y la dificultad para incorporar adecuadamente la incertidumbre en los modelos de análisis y toma de decisiones (Chen y col., 2013). Además, los modelos de optimización deben evolucionar hacia enfoques más inclusivos, que incorporen indicadores de justicia distributiva, resiliencia comunitaria y equidad en el acceso a los recursos. La sostenibilidad no puede evaluarse únicamente desde la eficiencia técnica; requiere considerar los factores humanos, sociales y culturales que determinan el éxito de cualquier intervención tecnológica.

De cara al futuro, la convergencia de la ISP con las tecnologías digitales y los principios de la economía circular promete transformar la gestión del nexo agua-energía-alimento. La

incorporación de inteligencia artificial, gemelos digitales y análisis de grandes volúmenes de datos permitirá desarrollar sistemas predictivos y adaptativos que respondan en tiempo real a las condiciones cambiantes del entorno. De igual modo, la integración de energías renovables, la reutilización de residuos y la planificación territorial sustentable favorecerán la transición hacia sistemas más autosuficientes y resilientes.

En este contexto, la Ingeniería de Sistemas de Procesos no solo se consolida como una disciplina científica, sino como una estrategia de transformación. Su enfoque sistémico y cuantitativo ofrece la posibilidad de rediseñar los procesos productivos y los modelos de desarrollo bajo un nuevo paradigma de sostenibilidad integral. En última instancia, comprender y aplicar la ISP en el nexo agua-energía-alimento permitirá avanzar hacia una gestión más racional y equitativa de los recursos naturales, fortaleciendo la seguridad hídrica, energética y alimentaria para las generaciones presentes y futuras.

Referencias bibliográficas

Afkhami, P., y Zarrinpoor, N. (2022). The energy-water-food-waste-land nexus in a GIS-based biofuel supply chain design: A case study in Fars province, Iran. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130690. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130690

Afshar, A., Soleimanian, E., Akbari Variani, H., Vahabzadeh, M., y Molajou, A. (2022). The conceptual framework to determine interrelations and interactions for holistic water, energy, and food nexus. *Environment, Development and Sustainability*, 24(8), 10119–10140. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01858-3

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

Bedolla-Rivera, H. I., Negrete-Rodríguez, M. D. L. L. X., Gámez-Vázquez, F. P., Álvarez-Bernal, D., & Conde-Barajas, E. (2023). Analyzing the impact of intensive agriculture on soil quality: A systematic review and global meta-analysis of quality indexes. *Agronomy*, 13(8), 2166. https://doi.org/10.3390/agronomy13082166

Beven, K. (2018). *Environmental modelling*: An uncertain future? CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781482288575

Bakshi, B. R. (2019). Toward Sustainable Chemical Engineering: The Role of Process Systems Engineering. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 10, 265-288. https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060718-030332

Cansino-Loeza, B., y Ponce-Ortega, J. M. (2024). The water–energy–food nexus. In B. Cansino-Loeza y J. M. Ponce-Ortega (Eds.), *Developments in environmental modelling*, 32, 1–19). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13571-2.00001-1

Chen, S., Chen, B., y Fath, B. D. (2013). Ecological risk assessment on the system scale: A review of state-of-the-art models and future perspectives. *Ecological Modelling*, 250,25-33. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.015

Dai, J., Wu, S., Han, G., Weinberg, J., Xie, X., Wu, X., ... y Yang, Q. (2018). Nexo agua-energía: Una revisión de métodos y herramientas para la macroevaluación. *Energía Aplicada*, 210, 393-408.

Ghodsvali, M., Dane, G., y de Vries, B. (2022). An online serious game for decision-making on food-water-energy nexus policy. *Sustainable Cities and Society*, 87, 104220. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104220

Hejnowicz, A., Thorn, J., Giraudo, M., Sallach, J., Hartley, S., Grugel, J., Pueppke, S., y Emberson, L. (2022). Appraising the water-energy-food nexus from a sustainable development perspective: A maturing paradigm? *Earth's Future, 10*(5). https://doi.org/10.1029/2021EF002622

Jiao, L., Luo, X., Zha, L., Bao, H., Zhang, J., y Gu, X. (2024). Machine learning assisted water management strategy on a self-sustaining seawater desalination and vegetable cultivation platform. *Computers and Electronics in Agriculture*, 217, 108569. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108569

Kiss, A. A., y Grievink, J. (2019). Process Systems Engineering from an industrial and academic perspective. En A. A. Kiss, E. Zondervan, R. Lakerveld, y L. Özkan (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering*, *46*, 109-114. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818634-3.50019-9

Li, G., Wang, Y., y Li, Y. (2019). Synergies within the water-energy-food nexus to support the integrated urban resources governance. *Water*, 11(11), 2365. https://doi.org/10.3390/w11112365

Raya-Tapia, A. Y., Cansino-Loeza, B., Sánchez-Zarco, X. G., Ramírez-Márquez, C., y Ponce-Ortega, J. M. (2023). A systematic approach for assessing water, energy and food security during the COVID-19 pandemic: Case study of Mexico. *Environment, Development and Sustainability*, 25(12), 14381–14409. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02671-2

Sušnik, J., Masia, S., Jewitt, G., y Simpson, G. (2022). Tools and indices for WEF nexus analysis. In *Water-energy-food nexus narratives and resource securities*, 67–89. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91223-5.00013-7

Terrapon-Pfaff, J., Ortiz, W., Dienst, C., y Gröne, M.-C. (2018a). Energising the WEF nexus to enhance sustainable development at local level. *Journal of Environmental Management*, 223, 409–416. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.037

Yadav, N., Pattabiraman, B., Tummuru, N. R., Soundharajan, B. S., Kasiviswanathan, K. S., Adeloye, A. J., Sen, S., Maurya, M., y Vijayalakshmanan, S. (2024). Toward improving water-energy-food nexus through dynamic energy management of solar powered automated irrigation system. *Heliyon*, 10(4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25359