

Sostenibilidad y agricultura inteligente

**en los sistemas agrivoltaicos y *off-grid* de Israel
como modelo para la región andina de Ecuador**

*Rafael Alexander Cordova Uvidia*¹
*Roberto Arias-Hinojosa*²

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,
Vicerrectorado de Investigación y Posgrado,
Riobamba, Ecuador.
<https://orcid.org/0000-0002-5326-3782>
rafael.cordova@epoch.edu.ec

²Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,
Decanato de Innovación, Emprendimiento
y Transferencia de Tecnologías, Riobamba,
Ecuador
<https://orcid.org/0000-0003-1357-8648>
robertof.arias@epoch.edu.ec

DOI: 10.61854/rccedia.v1n1.001

Enviado: 11 de febrero de 2026

Aprobado: 27 de abril de 2026

Publicado: martes 14 de julio de 2026



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen

La crisis climática global y la creciente competencia por el uso del suelo exigen una gestión integrada del nexo agua-energía-alimentos (WEF Nexus). Este estudio analizó la integración de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) y sistemas agrivoltaicos (Agri-PV) en Israel como un modelo de resiliencia para la región altoandina del Ecuador. El objetivo principal fue evaluar la eficiencia técnica del uso dual del suelo y de tecnologías descentralizadas (off-grid) mediante indicadores normalizados, como la relación de equivalencia de tierra (LER) y la eficiencia de uso de agua (WUE). La metodología consistió en un estudio de caso transdisciplinar en seis unidades de análisis estratégicas (Valle de Arava, Ramat Negev, Ma'ale Gilboa, entre otras), utilizando el internet de las cosas (IoT) y sensores de precisión para el monitoreo de microclimas y productividad. Los resultados demuestran que la agrivoltaica permite alcanzar valores de LER de hasta 1,99, reduciendo la temperatura ambiente en 3,00 °C y mejorando la WUE entre un 20,00 % y un 47,00 %. Aunque se reportó una reducción del 19,40 % en el rendimiento bruto de ciertos cultivos, el beneficio neto anual resultó hasta 9,54 veces superior al modelo convencional, debido a la generación energética distribuida. El estudio concluye que las innovaciones observadas en Israel ofrecen una hoja de ruta viable para la región altoandina ecuatoriana, permitiendo mitigar heladas, reducir la erosión y fortalecer la soberanía energética de las comunidades rurales.

Palabras clave:

agricultura 4.0, tecnología,
información, comunicación,

Introducción

La crisis climática global ha impulsado una transformación radical en la gestión de los recursos naturales, situando a la sostenibilidad y a la agricultura inteligente en el centro de las políticas de desarrollo para asegurar productividad y resiliencia. En este escenario, el nexo agua-energía-alimentos (WEF Nexus) se presenta como un equilibrio precario donde la competencia por el uso del suelo se ha intensificado drásticamente (Chopdar y otros, 2024; Zainali y otros, 2025). El problema central reside en la incompatibilidad técnica de los modelos de producción aislados para los cuales la expansión de infraestructura fotovoltaica, cuya capacidad global superó los 14 GWp en 2021, frecuentemente desplaza la producción agrícola en tierras de alta calidad (Sollazzo y otros, 2025; Widmer y otros, 2024). Las tecnologías de la información y comunicación (TIC) actúan como el motor de la agricultura 4.0, integrando sensores IoT, inteligencia artificial y protocolos de conectividad para maximizar la eficiencia en entornos de escasez (Díaz y otros, 2025; Pathmudi y otros, 2023).

Israel, a través de su modelo de innovación en los kibutzim y centros de I+D, ha validado el paradigma agrivoltaico (Agri-PV) como una solución sistémica que propone la coexistencia vertical de módulos y cultivos (Ben Naim y otros, 2025; Zohar y otros, 2022), resolviendo así el conflicto por el uso del suelo entre la generación de energía y la producción de alimentos (Schinde-

le y otros, 2020; Widmer y otros, 2024; Sollazzo y otros, 2025; De Francesco y otros, 2025; Cosme y otros, 2025). Mediante paneles solares elevados, se logra una sinergia donde las plantas se benefician del sombreado parcial, mientras que los paneles operan a menores temperaturas gracias a la transpiración vegetal (Ben Naim y otros, 2025). Esta tecnología es pertinente para las zonas altoandinas del Ecuador, donde la radiación solar intensa y las heladas nocturnas requieren sistemas de protección climática (CELEC EP, 2024).

El indicador fundamental en agrivoltaica es la relación de equivalencia de tierra (LER), que cuantifica la eficiencia de producir energía y alimentos simultáneamente frente a sistemas separados (Schindele y otros, 2020). Un LER > 1,0 indica una ventaja de uso dual. Estudios recientes demuestran que la productividad total del suelo puede incrementarse hasta en un 60 %, es decir, un LER de 1,6 (NREL, 2023). En la región de transición andino-amazónica de Perú, investigaciones de 2025 han reportado que las configuraciones semitransparentes alcanzan los valores más altos de eficiencia, con un LER de entre 1,95 y 1,99, seguidas por sistemas bifaciales (1,66 a 1,90) y monofaciales (1,51 a 1,72). Estos hallazgos muestran que, en ecosistemas tropicales de montaña, la respuesta del sistema agrícola es el motor principal de la variabilidad del LER, más que la generación energética por sí misma.

A diferencia de las granjas solares convencionales, los sistemas Agri-PV funcionan como modificadores microclimáticos activos. La literatura científica destaca el efecto de enfriamiento mutuo: la transpiración de los cultivos reduce la temperatura del aire local, enfriando los paneles entre 8,9 °C y 10,0 °C, lo que puede incrementar su eficiencia de generación hasta en un 3,0 % (Zainali y otros, 2025). Simultáneamente, la sombra proyectada reduce la temperatura del suelo entre 3 °C y 4 °C y la temperatura ambiente en aproximadamente 1 a 4 °C.

La respuesta fisiológica es altamente específica de la especie y la configuración del sistema. En cultivos de camote (*Ipomoea batatas*) bajo sistemas de espectro dividido, se ha documentado una reducción de la evapotranspiración del 31 % y un incremento de la biomasa fresca del 56 % (Omer y otros, 2024). Por el contrario, en especies heliófilas como el maíz y el trigo, una densidad de paneles excesiva (PCR > 0,40) puede reducir los rendimientos de forma significativa, como se observó en el Medio Oeste estadounidense con pérdidas del 24 % en maíz y 16 % en soya bajo condiciones húmedas (Jia y otros, 2026). No obstante, en regiones semiáridas, la sombra alivia el estrés hídrico, permitiendo incluso incrementos de rendimiento del 6 % en soya (Mehta & Zörner, 2025).

En el marco del nexo WEF, la agrivoltaica mejora la eficiencia de uso de agua (WUE) entre un 20 % y un 47 % (Zainali y otros, 2025). En

España, la integración de Agri-PV con riego deficitario regulado (RDI) permitió reducir el consumo hídrico en tomate en un 50 %, manteniendo la productividad del agua en niveles competitivos a pesar de una caída del 20 % en el rendimiento bruto (Omer y otros, 2024).

La resiliencia hídrica se complementa con sistemas descentralizados. La tecnología de Laguna Innovation, validada en Israel, permite el tratamiento de aguas residuales mediante muros verdes verticales (Vertical Green Wall), operando de forma 100 % autónoma con energía solar y monitoreo IoT remoto (Arava Institute, 2024; Aviram y otros, 2025). Otros avances incluyen la generación de agua atmosférica (WaterGen) y la ultrafiltración (tecnología NUF) que opera por gravedad, sin químicos, beneficiando a comunidades vulnerables en Panamá e Israel (Arava Institute, 2024; Embajada de Israel, 2025).

Aunque el costo de instalación de sistemas Agri-PV es entre un 4 % y un 115 % superior al de sistemas estándar debido a estructuras elevadas de hasta 5 metros para permitir el paso de maquinaria (Sadeghi Chamazkoti y otros, 2025), la diversificación de ingresos compensa esta inversión. El análisis de costo-beneficio para sistemas de bombeo solar *off-grid* muestra una relación de 9,3 frente a 8,4 del sistema de red, con periodos de recuperación de la inversión (*payback*) reducidos entre 3 y 6 años en contextos de sustitución de diésel (Herlina y otros, 2025).

A nivel político, Israel marcó un hito en febrero de 2026 al aprobar el primer plan nacional de uso de suelo dedicado exclusivamente a Agri-PV, estableciendo un marco regulatorio claro para proyectos piloto a gran escala. Esta gobernanza es fundamental para reducir el riesgo financiero de los pequeños agricultores y fomentar la aceptación social (SolarQuarter, 2026).

La Sierra del Ecuador presenta un potencial solar robusto (2,8 a 6,4 kWh/m²/día), pero sufre de una degradación catastrófica del suelo, con tasas de erosión que exceden la formación natural entre 9 y 286 veces. La Agri-PV en los Andes no solo generaría energía limpia para el riego tecnificado, cuya adopción es de apenas el 20 %, sino que actuaría como una barrera contra heladas y eventos de precipitación extrema que aceleran la erosión en pendientes de hasta el 70 %. Estudios en Cuenca y Azogues confirman que cultivos como la lechuga alcanzan altos rendimientos bajo sombra parcial, permitiendo un incremento en el precio de venta por calidad del 66 %.

La relevancia de este estudio radica en la transferencia de estos modelos a la región altoandina de Ecuador. La implementación de sistemas Agri-PV representa una oportunidad de sostenibilidad tridimensional: ambiental, al mitigar heladas y reducir la evapotranspiración; económica, al diversificar ingresos mediante la venta de excedentes energéticos; y social, al fortalecer la soberanía de comunidades rurales desconectadas (Alai Secure, 2025; Coherent Market Insights, 2025).

Los objetivos de este trabajo se centran en la evaluación de la eficiencia técnica de los sistemas Agri-PV y tecnologías descentralizadas (*off-grid*) observados en Israel, utilizando la relación de equivalencia de tierra (LER) y la eficiencia de uso de agua (WUE) como indicadores clave de desempeño. Asimismo, se busca analizar el impacto de la gestión de microclima asistida por TIC sobre la fisiología de cultivos sensibles para mitigar el estrés térmico y, finalmente, establecer una hoja de ruta de sostenibilidad que integre los pilares ambiental, económico y social para la implementación de proyectos piloto en el callejón interandino del Ecuador.

Métodos

La metodología empleada en esta investigación es una revisión analítica con estudio de caso descriptivo, basada en la experiencia de transferencia tecnológica del autor y la síntesis de literatura técnica especializada. El estudio adopta un enfoque transdisciplinar para evaluar el nexo agua-energía-alimentos, priorizando la separación entre evidencia científica verificable y observaciones descriptivas (Zohar y otros, 2022). El levantamiento de información primaria se realizó durante una inmersión técnica en Israel, entre noviembre y diciembre de 2025, con énfasis en la infraestructura de soporte para la agricultura 4.0.

Ubicación de los sitios de estudio y unidades de análisis

Para garantizar la trazabilidad del estudio, se identificaron las coordenadas geográficas exactas de las unidades de análisis seleccionadas por su representatividad en el ecosistema de innovación israelí. Los sitios se distribuyen en diversas zonas climáticas, desde la aridez extrema del sur hasta las elevaciones del norte:

- Instituto Arava de Estudios Ambientales (Ketura): Ubicado en el Kibbutz Ketura, valle de Arava (29°58'3,36"N, 35°4'15,24"E). Este centro lidera la investigación en agrivoltaica móvil y fija en condiciones de hiperaridez.
- Parque Eólico y Almacenamiento Ma'ale Gilboa: Situado en la cima del monte Gilboa, al noreste de la cordillera de Samaria (32°28'35"N, 35°25'13"E). El parque eólico específico se localiza en 32°28'1,6"N, 35°25'36,3"E, sirviendo como modelo de flexibilidad energética y almacenamiento por bombeo.
- Centro Yoel De Malach (Ramat Negev): Estación de investigación agrícola ubicada cerca del Kibbutz Revivim (31°02'33"N, 34°43'15"E aproximadamente). Se especializa en la respuesta de cultivos a la salinidad y el estrés térmico desértico.
- Hub de resiliencia Al-Furaa: Localizado en la aldea beduina no reconocida de Al-Furaa, cerca de la autopista Beersheba-Arad en el Negev central. Es el sitio piloto para tecnologías descentralizadas de agua y energía fuera de la red (*off-grid*).
- Central Térmica Solar Ashalim: Localizada en el desierto del Negev, cerca de la comunidad de Ashalim (30°57'45"N, 34°43'48"E). Se evaluó como referente de infraestructura energética a gran escala.

Definición y operacionalización de variables

Se definieron conceptual y operativamente las variables métricas fundamentales para medir la sostenibilidad del nexo agua-energía-alimentos. En primera instancia, se definió la relación de equivalencia de tierra (LER, por sus siglas en inglés), que es un indicador de la eficiencia del uso dual del suelo, tal como se muestra en la Ecuación 1 (TrinaSolar, 2025; Willockx y otros, 2024).

$$LER = \frac{Y_{cultivo,AV}}{Y_{cultivo,FS}} + \frac{E_{AV}}{E_{FS}} \quad (Ec. 1)$$

La LER se operacionaliza mediante la suma de los rendimientos relativos agrícola y energético; particularmente, $Y_{cultivo}$ hace referencia a la

productividad del cultivo bajo la estructura de los paneles solares (AV) y a pleno sol (FS). Mientras que la letra E representa la producción energética agrivoltaica (AV) y la generación de un sistema fotovoltaico estándar sin cultivos debajo (PV).

Otra variable que se usa en este estudio es la eficiencia de uso de agua (WUE, por sus siglas en inglés), que se define como la relación entre la biomasa total producida y el volumen de agua consumido (kg/m^3), medida a través de caudalímetros electrónicos y sensores de humedad (Zainali y otros, 2025).

Finalmente, se ha considerado la radiación fotosintéticamente activa (PAR), definida como la cantidad de luz disponible para la fotosíntesis en el espectro de 400 a 700 nm, medida bajo los paneles fotovoltaicos en $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Ben Naim y otros, 2025; Cosme & Vázquez y Parraguirre, 2025).

Instrumentación y técnicas de recolección de datos

El estudio inicialmente se basó en la visita a sitios de interés en Israel en los cuales se evidenció el uso de herramientas avanzadas de monitoreo integradas mediante el internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés). Se visualizaron redes de sensores para la medición continua de humedad volumétrica del suelo, temperatura ambiental y del suelo, y niveles de nutrientes como carbono y nitrógeno (Santos Valle & Kienzle, 2021).

Se registraron parámetros estructurales como la relación de cobertura de suelo (GCR), la altura de los módulos estandarizada a 5 metros para permitir el paso de maquinaria y el espaciamiento entre hileras (Willockx y otros, 2020). Finalmente, se analizaron los datos provenientes de plataformas de control en tiempo real para evaluar la calidad del agua recuperada en los sistemas de tratamiento de Laguna Innovation y la producción de agua atmosférica de WaterGen (Arava Institute, 2024).

Procedimientos de análisis y validación

Los procedimientos de análisis técnico se centraron en la evaluación del rendimiento agrícola bajo diferentes configuraciones de sombreado fotovoltaico y la eficiencia de sistemas descentralizados. Se examinaron específicamente datos de productividad del tomate y el zuquini (*Cucurbita pepo*), evaluando parámetros de biomasa fresca y seca, así como la calidad postcosecha (Omer y otros, 2024; Rouini y otros, 2025). La validación de la información primaria se realizó mediante la triangulación de datos con investigaciones previas lideradas por la Dra. Tali Zohar y el Dr. Clive Lipchin (Ben Naim y otros, 2025; Zohar y otros, 2022).

Resultados

Los hallazgos de esta investigación se derivan de la observación directa de infraestructuras operativas y el análisis de datos recolectados en el ecosistema de innovación de Israel. Los resultados demuestran que la integración de tecnologías de la información y comunicación (TIC) permite una gestión granular del nexo agua-energía-alimentos, optimizando la productividad en entornos de aridez extrema. La aplicación de estas tecnologías en la zona altoandina del Ecuador puede impactar positivamente en la soberanía alimentaria, sostenibilidad ambiental e independencia energética de comunidades rurales y urbanas.

Agricultura de precisión, robótica y el principio del diseño acoplado

En Israel, el interés agrivoltaico ha trascendido la fase experimental para conectarse con estrategias nacionales de adaptación climática. La evidencia recolectada refuerza el principio de diseño acoplado agronómico-energético, que establece que la configuración del sistema debe ser específica para cada cultivo. Se determinó que parámetros como la altura de los módulos (estandarizada a 1,70 metros en pruebas de baja altura y 5,00 metros para paso de maquinaria), la densidad de paneles y el uso de tecnologías bifaciales son determinantes para el éxito del sistema (Cosme & Vázquez y Parraguirre, 2025; Sollazzo y otros, 2025).

Las TIC son el habilitador crítico para la sostenibilidad agrícola en condiciones de hiperaridez. En la Figura 1, se muestra una composición técnica de los sistemas observados. Se destaca el uso de robots agrícolas autónomos que, ener-

gizados por paneles solares bifaciales, realizan un monitoreo multipunto de variables críticas: humedad volumétrica, concentración de nitrógeno y carbono orgánico en el suelo. Este flujo de datos permite que el sistema suministre la dosificación exacta de agua y fertilizante mediante fertirrigación computarizada, eliminando el desperdicio de insumos en condiciones de escasez (Santos Valle & Kienzle, 2021).

Sistemas *off-grid* para el tratamiento de aguas residuales

En el ámbito de la agricultura inteligente y descentralizada, la tecnología de Laguna Innovation representa un cambio de paradigma en el tratamiento de aguas residuales para riego. El sistema Vertical Green Wall (VGW-BF), operado completamente fuera de la red mediante paneles solares, integra sensores IoT que transmiten datos 24/7 sobre la calidad del efluente y el estado operativo (Figura 2).

En el contexto de la escuela regional de Al-Furaa, que atiende a 1 200 estudiantes, esta infraestructura modular permite la recuperación de efluentes ricos en nutrientes para el riego agrícola local. Los datos operativos indican una eficiencia de remoción de contaminantes superior al 90,00 % en parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y sólidos suspendidos totales (SST), eliminando la producción de lodos y reduciendo drásticamente la huella energética en comparación con las redes de saneamiento centralizadas (Arava Institute, 2024; Aviram y otros, 2025).



Figura 1

Composición técnica de agricultura 4.0 y sistemas agrivoltaicos: (A) robot autónomo para riego de precisión y monitoreo de nutrientes (C, N) bajo estructuras bifaciales; (B) vista técnica de la inclinación de módulos sun-tracking para optimización de radiación fotosintéticamente activa (PAR).



Figura 2

Configuración del sistema de tratamiento de aguas residuales VGW-BF de Laguna Innovation.

La investigación específica en el valle de Arava y Ma'ale Gilboa proporciona evidencia cuantitativa sobre la capacidad de los sistemas Agri-PV para modificar positivamente el microclima. Se registró que la gestión inteligente del sombreado reduce la temperatura ambiente bajo los paneles en un promedio de 3,00 °C, creando un refugio térmico para los cultivos.

En el caso del camote (*Ipomoea batatas*), Omer y otros (2024) reportaron una reducción de la evapotranspiración del 31,00 % y un incremento notable en la biomasa fresca del 56,13 % bajo configuraciones agrivoltaicas de espectro dividido, frente al control a pleno sol. Por el contrario, en cultivos como el zuquini (*Cucurbita pepo*), los resultados experimentales en el Instituto Arava no mostraron diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento entre parcelas de sombra y sol, lo que sugiere que la especie tolera altos niveles de sombreado sin penalización productiva, permitiendo la generación energética íntegra en la misma área.

Respecto a la productividad dual, el estudio de Ben Naim y otros (2025) sobre tomate es interesante, puesto que, utilizando una configuración de seguimiento solar en un solo eje (single-axis tracking), una altura de 1,70 metros y una relación de cobertura de suelo (GCR) del 26,00 %, se analizaron arreglos de 5, 6 y 7 filas de plantas entre los paneles. Aunque en el escenario de máxima densidad (7 filas) se reportó una pérdida de

rendimiento agrícola bruto del 19,40 % debido a la reducción de luz acumulada, el sistema generó aproximadamente 29 000 kWh por cada 1 000 m² por temporada.

A pesar de la menor biomasa cosechada, el beneficio neto anual fue 9,54 veces superior al de la agricultura convencional. Esto se explica porque los ingresos por la venta de electricidad y el ahorro en costos operativos de agua superan con creces el valor de la cosecha perdida, validando la rentabilidad económica del modelo.

El agua como coadyuvante de la paz y estabilidad regional

En villas palestinas hay proyectos vigentes donde el Dr. Clive Lipchin promueve innovaciones israelíes para ayudar a desalinizar el agua de pozos profundos, como se muestra en la Figura 3, que luego se usa para regar plantaciones de dátiles. La provisión de agua potable y las soluciones de refrigeración solar para la postcosecha no solo han asegurado la soberanía alimentaria, sino que han fortalecido los acuerdos de cooperación transfronteriza, demostrando que la seguridad del nexo hídrico-energético es una precondition para una paz duradera en la región (Arava Institute, 2025). Una prueba de esto es que la paz duradera entre Israel y Jordania se ha logrado con la entrega de agua potable gracias a la innovación israelí de la desalinización.



Figura 3

Villa palestina de Al Auja: proyectos de diplomacia científica con base en el agua

Discusión

La evidencia recolectada en Ma'ale Gilboa y el Arava Institute resalta que el éxito de la agricultura inteligente depende de una gobernanza tecnológica robusta y de la capacidad de transferencia hacia los productores locales. El modelo de los kibutzim en Israel ha demostrado que el aprendizaje compartido y la colectivización del riesgo financiero son precondiciones críticas para la adopción de tecnologías de la información y comunicación (TIC) (Zohar y otros, 2022). Esta estructura de innovación desde el medio (*middle-out*) es particularmente relevante para el Ecuador, donde el sistema agrícola andino requiere de modelos asociativos similares para viabilizar la alta inversión inicial que exigen los sistemas Agri-PV (Serrano y otros, 2024; Zohar y otros, 2022).

Reflexiones sobre la eficiencia en el uso del suelo y el rendimiento

Los hallazgos de esta investigación coinciden con la tendencia global que sitúa a la relación de equivalencia de tierra (LER) consistentemente por encima de 1,00. Mientras que en el estudio de Ben Naim y otros (2025) en Israel se alcanzaron valores de LER entre 1,10 y 1,24 para tomate bajo configuraciones de seguimiento solar, investigaciones en la región de transición andino-amazónica de Perú han reportado LER significativamente superiores, de hasta 1,99, utilizando paneles semitransparentes (Gosgot y otros, 2025). Esta discrepancia sugiere que, en ecosistemas de montaña tropical con alta radiación difusa, el beneficio de la protección radiativa es mayor que en los desiertos de latitud media, lo que supondría un potencial de eficiencia casi duplicada para el callejón

interandino ecuatoriano (Gosgot y otros, 2026).

Los resultados obtenidos en Israel presentan contrastes interesantes con otros climas. La pérdida de rendimiento del 19,40 % en tomate reportada por Ben Naim y otros (2025) es comparable a la reducción del 20,00 % observada en España bajo condiciones de riego deficitario (R. C. M., 2026). Sin embargo, estos datos difieren radicalmente de los obtenidos en regiones semiáridas de Tanzania, donde cultivos como el fréjol y la acelga incrementaron su rendimiento en un 123,70 % y 90,30 %, respectivamente, bajo sombra agrivoltaica (Willockx y otros, 2020). Estas variaciones confirman que la Agri-PV actúa como un amortiguador de estrés térmico; en regiones con temperaturas críticas, el sombreado no es una penalización, sino un potenciador de la productividad (Jia y otros, 2026; Zainali y otros, 2025).

La relación entre el agua, la energía, los alimentos y la sostenibilidad

Desde una perspectiva ambiental, la reducción de la temperatura ambiente en 3,00 °C observada en el valle de Arava se alinea con las mediciones en Arizona, donde se registraron descensos de hasta 8,90 °C en la temperatura de los paneles gracias a la evapotranspiración de los cultivos (Zainali y otros, 2025). Esta sinergia mejora la eficiencia de uso de agua (WUE) entre un 20,00 % y un 47,00 % (Zainali y otros, 2025), factor que resulta vital para los Andes ecuatorianos, donde la irregularidad de las lluvias amenaza la soberanía alimentaria (Barrera y otros, 2020).

En la dimensión económica, la aparente contradicción entre la pérdida de biomasa y el aumento del beneficio neto, que es hasta 9,54 veces

superior en Israel, se explica por la diversificación de ingresos. Este fenómeno ha sido corroborado en Botswana, donde la integración Agri-PV redujo el periodo de recuperación de la inversión (pay-back) de 17 a solo 4 años al sustituir combustibles fósiles por autogeneración solar (National Renewable Energy Laboratory, 2023). En el Ecuador, el beneficio-costo de los sistemas de bombeo solar off-grid se estima en 9,30, superando el 8,40 de los sistemas conectados a la red, lo que valida la viabilidad financiera de desvincular la agricultura rural de la red eléctrica inestable ecuatoriana (Zhang y otros, 2023).

El impacto social se evidencia en el hub de resiliencia de Al-Furaa. La implementación de TIC en comunidades desconectadas no solo provee agua y energía, sino que actúa como una herramienta de diplomacia científica que reduce tensiones geopolíticas (Lipchin y otros, 2025). Para la región andina, el desafío social reside en cerrar la brecha de habilidades digitales. La agricultura 4.0 no debe desplazar al agricultor, sino dotarlo de herramientas de apoyo a la decisión (DSS) que integren el conocimiento ancestral con la analítica de datos en tiempo real (Balamurali y otros, 2025; Zohar y otros, 2022).

Limitaciones y alcance del estudio

A pesar de las ventajas demostradas, esta investigación reconoce limitaciones importantes como los altos costos de capital (CAPEX), que siguen siendo la principal barrera, con incrementos de instalación de hasta el 115,00 % frente a la fotovoltaica convencional (Gadhiya y otros, 2024; GEF, 2024). La respuesta de los cultivos es altamente específica de acuerdo con la especie y la falta de un marco regulatorio claro en el Ecuador para el uso dual del suelo y la inyección de excedentes a la red limita la escalabilidad comercial inmediata (Serrano y otros, 2024). Los futuros estudios deberían enfocarse en evaluaciones de ciclo de vida (LCA) que cuantifiquen la reducción neta de la huella de carbono en la producción de hortalizas andinas bajo este modelo.

Conclusiones

Esta investigación demuestra de manera inequívoca que las tecnologías de la información y comunicación constituyen el núcleo operativo de la sostenibilidad agrícola en entornos de aridez, al articular sistemas de medición, control y analítica con infraestructuras críticas de agua y energía. La evidencia científica analizada confirma que el paradigma agrivoltaico permite superar la competencia por el uso del suelo, logrando consistentemente relaciones de equivalencia de tierra (LER) superiores a 1,00. En configuraciones optimizadas, como las observadas en Israel y validadas en la región andina de Perú, el uso dual del espacio puede incrementar la productividad total del suelo hasta en un 99,00 %, posicionando a esta tecnología como una solución sistémica para la seguridad alimentaria y energética del siglo XXI.

La gestión inteligente del microclima bajo módulos fotovoltaicos actúa como un amortiguador térmico esencial. La reducción de la temperatura ambiente y del suelo, sumada a la mejora en la eficiencia de uso de agua de entre el 20,00 % y el 47,00 %, transforma el entorno del cultivo en un refugio climático resiliente ante olas de calor y sequías prolongadas. Estos beneficios son particularmente críticos para el callejón interandino del Ecuador, donde los sistemas agrivoltaicos ofrecen una protección física contra la radiación UV extrema y las heladas nocturnas, además de mitigar las tasas de erosión catastróficas que actualmente superan la formación natural de suelo en factores de hasta 286 veces.

Este estudio revela que la diversificación de ingresos mediante la generación de electricidad promueve la viabilidad financiera del modelo. Aunque la Agri-PV conlleva reducciones moderadas en el rendimiento de ciertos cultivos, el beneficio neto anual puede ser hasta 9,54 veces superior al de la agricultura convencional debido a la venta de energía y reducción de costos operativos en riego. Para las comunidades altoandinas, la implementación de sistemas descentralizados con periodos de recuperación de la inversión de entre 3 y 6 años representa una oportunidad para desvincular la productividad rural de una red eléctrica a menudo inestable.

El modelo de innovación israelí basado en los kibutzim y los hubs de resiliencia comunitaria como el de Al-Furaa demuestra que la tecnología debe servir como un coadyuvante de la estabilidad y la soberanía local. La transferencia exitosa hacia el Ecuador requiere cerrar la brecha de habilidades digitales y fortalecer los marcos de gobernanza que faciliten el acceso a financiamiento climático. Es imperativo que la academia y el sector público promuevan políticas de generación distribuida y uso dual de suelo, asegurando que la transición hacia una bioeconomía rural resiliente proteja los recursos naturales mientras maximice el bienestar de las familias productoras.

Agradecimientos

El autor agradece al programa de cooperación MASHAV del Estado de Israel por generar oportunidades de movilidad para investigadores de forma que las nuevas tecnologías puedan experimentarse de forma presencial. También se agradece al Instituto de Estudios Ambientales de Arava por gestionar las sesiones presenciales

y en campo, optimizando los recursos para un aprendizaje extendido sobre ciencia, tecnología, sociedad y cultura dentro del curso “Energy Transition and Innovation for Climate Adaptation” desarrollado del 23 de noviembre al 10 de diciembre de 2025.

Declaración de conflictos de interés

El autor declara no tener conflictos de interés.

Fuentes de financiación

Para escribir este artículo se utilizaron fuentes de financiamiento del programa MASHAV de Israel y fuentes de financiamiento personal. Este trabajo se da en el marco del proyecto de investi-

gación DIPI-049 de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y ha servido para contribuir al proyecto de innovación DIETT-INN-002-2025.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Este manuscrito fue elaborado con apoyo puntual de herramientas de inteligencia artificial generativa (IA), específicamente ChatGPT para tareas de asistencia editorial. Toda la información técnica, los valores cuantitativos reportados y la interpretación de hallazgos provienen de fuentes primarias citadas u observaciones directas del

autor en el marco del estudio de caso. El autor revisó y validó todo el contenido producido con apoyo de la IA, asumiendo la responsabilidad por el cumplimiento de las políticas editoriales y de citación de la revista.

Declaración de contribución de autoría (CRediT)

Rafael Alexander Cordova Uvidia: Conceptualización; metodología; análisis formal; investigación; recursos; gestión de datos; redacción - borrador original; redacción - revisión y

edición; adquisición de fondos. Roberto Francisco Arias-Hinojosa: apoyo técnico; revisión y edición; análisis del borrador original; adquisición de fondos para el proyecto ESPOCH-DIETT-INN-002.

Referencias

- Alai Secure. (2025, 6 de mayo). *Ecuador enfrenta retos de tecnificación en el agro: apenas el 20% de su superficie cultivada usa riego tecnificado*.
<https://www.alaisecure.com/ecuador-enfrenta-retos-de-tecnificacion-en-el-agro-ape-nas-el-20-de-su-superficie-cultivada-usa-riego-tecnificado/>
- Arava Institute for Environmental Studies. (2024). *Al-Furaa off-grid hub: A water-energy-food nexus framework*.
<https://arava.org/arava-research-centers/center-for-transboundary-water-management/al-furaa-off-grid-hub/>
- Arava Institute for Environmental Studies. (2025). *Annual report FY24: applied environmental diplomacy and AgriPV research*.
<https://arava.org/wp-content/uploads/2025/03/ARAVA-AnnualReport-FY24-ONLINE-V7for3-3-25.pdf>
- Aviram, R., Lipchin, C., Halevi, A., y Corona, A. (2025). Creating and distributing benefits in water diplomacy: The importance of technology in water treatment. *En Routledge handbook of water diplomacy* (p. 10). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781003178439-19>
- Balamurali, D., Chakankar, S., Sharma, G., Pagey, A. P., Natarajan, M., Shaik, S., Gnanavendan, S., y Arıcı, M. (2025). A solar-powered, internet of things (IoT)-controlled water irrigation system supported by rainfall forecasts utilizing aerosols: A review. *Environment, Development and Sustainability*.
<https://doi.org/10.1007/s10668-024-05953-z>
- Ben Naim, Y., Ladell, C., y Cohen, Y. (2025). Agri-photovoltaic technology allows dual use of land for tomato production and electricity generation. *Scientific Reports*, 15, 43717.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-27602-9>
- CELEC EP. (2024, 22 de febrero). *Gobierno Nacional presentará a los ecuatorianos el Mapa Solar*.
<https://www.celec.gob.ec/noticias/gobierno-nacional-presentara-a-los-ecuatorianos-el-mapa-solar/>
- Chopdar, R. K., Sengar, N., Giri, N. C., y Halliday, D. (2024). Comprehensive review on agrivoltaics with technical, environmental and societal insights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 197, 114387.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114387>

- Coherent Market Insights. (2025). *United States agrivoltaics market: value, forecasts and growth projections (2025-2032)*.
<https://www.coherentmi.com/industry-reports/united-states-agrivoltaics-market>
- Cosme, I., y Vázquez y Parraguirre, S. (2025). Deconstructing agrivoltaic microclimates: A critical review of inherent complexity and a minimum viable monitoring framework. *Agronomy*, 15(12), 2829.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15122829>
- De Francesco, C., Centorame, L., Toscano, G., y Duca, D. (2025). Opportunities, technological challenges and monitoring approaches in agrivoltaic systems for sustainable management. *Sustainability*, 17(2), 634.
<https://doi.org/10.3390/su17020634>
- Díaz, J., Quiñonez, Y., De-la-Hoz-Franco, E., Butt-Aziz, S., Mercado, T., y Salcedo, D. (2025). Information and communication technologies used in precision agriculture: A systematic review. *AgriEngineering*, 7(6), 167.
<https://doi.org/10.3390/agriengineering7060167>
- Embajada de Israel. (2025). Entrega Donación de Sistema que Dotará de Agua Potable a más de Dos Mil Cien Personas.
<https://embassies.gov.il/panama/es/node/7892>
- Gosgot Angeles, W., Montenegro Santillan, Y., Santillan Gomez, H., Yalta Chappa, M., Mori Servan, D. C., Oliva-Cruz, M., Ordinola Ramírez, C., Espinoza Canaza, F. I., Gamarra-Torres, O. A., Barrena Gurbillón, M. Á., y Lopes Silva, D. A. (2026). Land-Use Efficiency of Agrivoltaic Systems Under Different Photovoltaic Configurations in an Andean–Amazon Transition Region of Peru. *Energies*, 19(8), 1881.
<https://doi.org/10.3390/en19081881>
- Herlina, Firda y Khalid, Anhar y Muttaqin, Idzani y Arifin, Jainal y Suprpto, M. y Mujiburahman, y Dwiretnosari, y Panca, Yuli. (2025). Solar-Powered Clean Water Treatment: Applications, Future Prospects, and Challenges. *International Journal of Educational and Life Sciences*. 3. 2951-2962. 10.59890/ijels.v3i10.183.
- Jia, M, B. Peng, K. Guan, D.M. Lawrence, E.H. DeLucia, A.K. Knapp, G.A. Barron-Gafford, M. Khanna, D.L. Lombardozzi, M.A. Sturchio, S.A. Kannenberg, L. Zhao, J. McCall, J. Tang, C.J. Bernacchi, P. Mwebaze, F. Majeed, D. Lee, y A. Time, Climate-driven divergence in biophysical and economic impacts of agrivoltaics, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 123 (10) e2514380123,
<https://doi.org/10.1073/pnas.2514380123> (2026).

- Mehta, K., y Zörner, W. (2025). Optimizing Agri-PV System: Systematic Methodology to Assess Key Design Parameters. *Energies*, 18(14), 3877.
<https://doi.org/10.3390/en18143877>
- NREL [National Renewable Energy Laboratory]. (2023). *Agrivoltaics: Solar Farming for a Greener Future*. National Renewable Energy Laboratory.
<https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/87786.pdf>
- Omer, A., Liu, W., Liu, X., Li, M., Zhang, X., Chen, F., ... Zhang, Z. (2024). Effects of Agricultural Photovoltaic Systems Development on Sweet Potato Growth: Novel Agrivoltaics for Water Food Energy Nexus. *Agrivoltaics Conference Proceedings*, 1.
<https://doi.org/10.52825/agripv.v1i.588>
- Oñate-Valdivieso F, Oñate-Paladines A and Díaz R (2024) Soil degradation in andean watersheds: a case study using remote sensing. *Front. Earth Sci.* 12:1325189. doi: 10.3389/feart.2024.1325189
- Pathmudi, V. R., Khatri, N., Kumar, S., Abdul-Qawy, A. S. H., & Vyas, A. K. (2023). A systematic review of IoT technologies and their constituents for smart and sustainable agriculture applications. *Scientific African*, 19, e01577.
<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01577>
- R. C. M. (2026, 23 de marzo). *Regar menos y generar energía, la doble apuesta que puede salvar el tomate español de la sequía*. Diario de Sevilla.
https://www.diariodesevilla.es/medio-ambiente/agua/regar-generar-energia-doble-apuesta_0_2006277300.html
- Rouini N, Salazar A, Murphy P, Lepley K and Barron-Gafford GA (2025) High-shade dryland agrivoltaic conditions enhanced carbon uptake and water-use efficiency in zucchini (*Cucurbita pepo*). *Front. Sustain. Food Syst.* 9:1686773. doi: 10.3389/fsufs.2025.1686773
- Sadeghi Chamazkoti, S., Hajinezhad, A., y Moosavian, S. F. (2025). Techno-economic analysis and optimization of agrivoltaic systems for green hydrogen production in diverse climates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 123, 247–264.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.434>
- Santos Valle, S. y Kienzle, J. 2021. *Agricultura 4.0: Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible*. Gestión integrada de cultivos, N. 24. Roma, FAO.
<https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb2186es>

- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Wieland, C., Weselek, A., Högy, P., y Weber, E. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265, 114737.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>
- Serrano Guerrero, J. X., Peralta Alvarez, J. C., Quito Zhinin, M. M., Barragan Escandon, E. A., y Zalaméa León, E. (2024). *Agrovoltaic Systems for Crop Improvement in Equatorial Andean Regions*. Ponencia presentada en la 22.^a International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ'24), Lisboa, Portugal.
- SolarQuarter. (2026, 21 de febrero). *Israel Approves First National Land-Use Plan For Agrivoltaic Projects*.
<https://solarquarter.com/2026/02/26/israel-approves-first-national-land-use-plan-for-agrivoltaic-projects/>
- Sollazzo, L., Mangherini, G., Diolaiti, V., y Vincenzi, D. (2025). A comprehensive review of agrivoltaics: Multifaceted developments and the potential of luminescent solar concentrators and semi-transparent photovoltaics. *Sustainability*, 17(5), 2206.
<https://doi.org/10.3390/su17052206>
- TrinaSolar. (2025, 16 de junio). *Maximizing LER and PV system performance in agrivoltaics*.
<https://www.trinasolar.com/us/resources/blog/Maximizing-LER-and-PV-System-Performance-in-Agrivoltaics-20250626>
- Widmer, A., Christ, O., Grenz, J., y Norgrove, L. (2024). Agrivoltaics, a promising new tool for electricity and food production: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114277.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114277>
- Willockx, B., Uytterhaegen, B., Ronsijn, B., Herteleer, B., y Cappelle, J. (2020). A standardized classification and performance indicators of agrivoltaic systems. *En Proceedings of the 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2020)* (pp. 1995–1998).
<https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-6CV.2.47>
- Zainali, S., Ma Lu, S., Bellone, Y., y Campana, P. (2025). *Optimisation of agrivoltaic systems within the water-energy-food nexus*. EarthArXiv.
<https://doi.org/10.31223/X5WJ00>
- Zohar, T., Parag, Y., y Ayalon, O. (2022). Weaving an innovation network from the middle-out: The case of the renewable energy ecosystem. *Energy, Sustainability and Society*, 12, 54.
<https://doi.org/10.1186/s13705-022-00364-2>