



EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE TRES SISTEMAS DE LABRANZA CON *Zea mays* L. BAJO RIEGO EN MÉXICO

ENERGY EVALUATION OF THREE TILLAGE SYSTEMS WITH *Zea mays* L. UNDER IRRIGATION IN MEXICO

Olimpya Talya Aguirre Salado¹, Joel Pérez Nieto^{1*},
Venancio Cuevas Reyes² e Ithan Carlos Solano Aguirre³

¹Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Departamento de Fitotecnia, Academia de Ecología, Texcoco, Estado de México, México. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México, Texcoco, Estado de México, México. ³UACH, Departamento de Suelos, Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (jperezn@chapingo.mx)

RESUMEN

El flujo de energía es un componente esencial en los ecosistemas que sustentan la vida en la tierra. La agricultura y la energía están estrechamente relacionadas, ya que el uso eficiente de la energía es un factor necesario para la producción agrícola sostenible. El objetivo de esta investigación fue evaluar los flujos de energía en tres sistemas de labranza del suelo (labranza cero, labranza mínima y labranza convencional) sosteniendo cultivo de maíz, mediante un análisis energético con la finalidad de identificar los más eficientes, en la búsqueda de orientar prácticas agrícolas que reduzcan el consumo energético y contribuyan a la mitigación del cambio climático en México. Se estimaron los flujos energéticos de cada sistema a partir de la cuantificación de insumos directos e indirectos; para el cálculo se aplicaron coeficientes de conversión para determinar energía invertida, energía producida, balance de energía y eficiencia energética. La entrada total de energía fue cercana a 20 GJ ha⁻¹ en los tres sistemas. La mayor producción energética se registró con labranza cero (341.29 GJ ha⁻¹), seguida por labranza mínima (313.71 GJ ha⁻¹) y convencional (260.27 GJ ha⁻¹). Los sistemas de labranza cero y mínima presentaron el balance energético más alto (321.38 GJ ha⁻¹), un índice de eficiencia de 17.15 y el menor índice de consumo (0.06), lo que refleja mayor eficiencia en el uso de la energía en el sistema de manejo. Los principales insumos de energía fueron fertilizantes (32.5 %), semillas (30.3 %) y electricidad para riego (25.3 %), los cuales concentraron el 88.1 % de la energía invertida. Estos hallazgos respaldan el potencial de los sistemas de labranza cero y mínima, en los esquemas de agricultura de conservación, como estrategias viables para reducir el uso de energía fósil, mejorar la eficiencia energética y fortalecer la sostenibilidad de los agroecosistemas agrícolas bajo riego.

Palabras clave: Balance energético, eficiencia energética, labranza cero, labranza convencional, labranza mínima.

SUMMARY

Energy flow is an essential component in the ecosystems that support life on earth. Agriculture and energy are closely linked, as efficient energy use is a necessary factor for sustainable agricultural production. The aim of this research is to evaluate energy flows in three soil tillage systems (zero, minimum and conventional tillage) supporting maize crop, through an energy

analysis in order to identify the most efficient ones, in the search for guiding agricultural practices that reduce energy consumption and contribute to climate change mitigation in Mexico. Energy flows of each system were estimated from the quantification of direct and indirect inputs; for this calculation, conversion factors were applied to calculate energy input, energy output, energy balance and energy efficiency. The total energy input was approximately 20 GJ ha⁻¹ in all three systems. The highest energy output was recorded under zero tillage (341.29 GJ ha⁻¹), followed by minimum tillage (313.71 GJ ha⁻¹) and conventional tillage (260.27 GJ ha⁻¹). The zero and minimum tillage achieved the highest energy balance (321.38 GJ ha⁻¹), an energy efficiency index of 17.15, and the lowest consumption index (0.06), which reflects higher energy efficiency in the management system. The main energy inputs were fertilizers (32.5 %), seeds (30.3 %), and electricity for irrigation (25.3 %), which concentrated 88.1% of the invested energy. These findings support the potential of zero- and minimum tillage in conservation agriculture schemes as viable strategies to reduce fossil energy use, improve energy efficiency and strengthen the sustainability of irrigated agro-ecosystems.

Index words: Energy balance, energy efficiency, conventional tillage, minimum tillage, zero tillage.

INTRODUCCIÓN

El flujo de energía es un componente esencial en los ecosistemas que sustentan la vida en la tierra. Las plantas captan la radiación solar y la transforman en energía química mediante la fotosíntesis (Odum y Barrett, 2008), proceso que ha sido aplicado en estudios recientes para evaluar la eficiencia energética (Kumar *et al.*, 2023; Moitzi *et al.*, 2021). La energía fluye a través de un ecosistema solo una vez y no se recicla, se transforma en calor y finalmente se pierde en el sistema. Únicamente el aporte continuo de nueva energía solar mantiene el ecosistema en funcionamiento. Los ecosistemas naturales dependen en gran medida de la energía solar como su principal fuente de vida. De la energía solar total, las plantas utilizan sólo alrededor del 0.02 % para la fotosíntesis, y la mayor

parte de la energía restante es reflejada por la atmósfera o convertida en calor, de acuerdo con Krebs (2008).

En los agroecosistemas, las entradas de energía pueden clasificarse en dos categorías principales: la energía ecológica, proveniente fundamentalmente de la radiación solar, y la energía cultural, asociada con los insumos energéticos derivados de la actividad humana (Gliessman, 2015; Pimentel *et al.*, 1973; Wang *et al.*, 2022). Esta última puede subdividirse en energía directa e indirecta. La energía directa se utiliza de forma inmediata en actividades agrícolas como la preparación del suelo, el riego, la cosecha y el transporte de insumos; por su parte, la energía indirecta está contenida en insumos como semillas, fertilizantes, pesticidas, herbicidas y fungicidas, cuya producción, procesamiento, transporte y aplicación implican un alto consumo de energía, principalmente de origen fósil, lo que evidencia la creciente dependencia de insumos energéticos externos en los sistemas agrícolas modernos (Dhanapala *et al.*, 2023; Rasul *et al.*, 2024).

El incremento en el uso de energía fósil en la producción agrícola ha suscitado una creciente preocupación, como señalaron Chamorro *et al.* (2016), debido al aumento en el consumo de combustibles y al uso de insumos indirectos, cuya fabricación y aplicación están vinculadas con la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Estos GEI se acumulan en la atmósfera, retienen parte de la energía solar e intensifican el efecto invernadero, lo que contribuye al calentamiento global y agrava el cambio climático.

La agricultura y la energía están estrechamente relacionadas, ya que el uso eficiente de la energía es un factor necesario para la producción agrícola sostenible, entendida como aquella que mantiene la productividad mientras conserva los recursos naturales y equilibra las dimensiones ambiental, económica y social (Gombkötő *et al.*, 2026). Tal como señalaron Khoshroo *et al.* (2018), la eficiencia energética en la agricultura es una vía para reducir los impactos ambientales y mejorar la sostenibilidad de los sistemas productivos. Si bien la energía es fundamental para el funcionamiento de los agroecosistemas, el problema radica en la forma en que se obtiene y se utiliza, especialmente cuando proviene de fuentes fósiles.

La eficiencia energética es la relación entre la energía contenida en los productos cosechados y la energía necesaria para su producción (Hercher-Pasteur *et al.*, 2020). Puede evaluarse a través del análisis de los flujos de energía en el sistema (entradas y salidas), conocido como balance energético. Las unidades equivalentes frecuentemente utilizadas son Mjoulles (MJ) o Kcalorías

(Kcal). Dhanapala *et al.* (2023) indicaron que en los agroecosistemas este balance puede ayudar a comparar y comprender los flujos de energía y la eficiencia en los sistemas agrícolas, lo que también ayuda a encontrar formas de ahorrar energía.

La agricultura de conservación (AC) representa una alternativa sostenible a los sistemas de producción agrícola convencionales con alta dependencia energética cultural (Pretty y Bharucha, 2014). La AC, de acuerdo con FAO (2015), se basa en tres principios: 1) mínima o nula perturbación mecánica del suelo; 2) mantenimiento de una cobertura permanente de biomasa sobre la superficie del suelo; y 3) diversificación de especies de cultivos (adopción de un sistema de cultivo con otros cultivos en rotaciones, secuencias o asociaciones, incluyendo una combinación equilibrada de cultivos leguminosos y no leguminosos). Derpsch *et al.* (2014) consideran que la AC se practica verdaderamente cuando los tres principios se aplican meticulosamente.

En la actualidad, ante los desafíos del cambio climático, como la variabilidad en la temperatura y la precipitación, así como el incremento en la frecuencia de eventos climáticos extremos (Aduteye y Tubene, 2026); además de la escasez de recursos y el crecimiento de la población, se ha intensificado la necesidad de implementar prácticas agrícolas eficientes y sostenibles que reduzcan el consumo de energía y contribuyan a la mitigación del impacto ambiental generado por la agricultura (Benedek *et al.*, 2023). En este contexto, la agricultura de conservación (AC), particularmente la labranza cero, ha sido ampliamente reconocida como una alternativa para mejorar la eficiencia en el uso de energía en los sistemas agrícolas; sin embargo, su adopción a nivel mundial es desigual. Kassam *et al.* (2019) señalaron que los países con mayor superficie bajo AC en 2016 fueron Estados Unidos (43.2 millones de hectáreas), Brasil (32 millones de hectáreas) y Argentina (31 millones de hectáreas); en contraste, México ocupó la posición 26, con aproximadamente 41 mil hectáreas, a pesar de que la investigación y promoción de esta práctica inició desde la década de 1970 (Jiménez *et al.*, 2004). Esta situación evidencia un bajo nivel de adopción y un amplio potencial para fortalecer políticas e incentivos que promuevan la agricultura de conservación en el país.

La AC se ha asociado con numerosos beneficios ambientales, que incluyen la mejora de la calidad del suelo, la conservación de la biodiversidad, el uso eficiente del agua y los nutrientes, el control de la erosión del suelo, el aumento en la captura de carbono en suelos agrícolas y la producción sostenible de cultivos (Gura *et al.*, 2022).

En el caso de México, existen aún pocos estudios que analicen los flujos energéticos en sistemas de agricultura de conservación, particularmente en cultivos como el maíz bajo condiciones de riego. La mayoría de las investigaciones se han centrado en componentes aislados, como la productividad o el impacto económico, sin incorporar un enfoque energético sistémico. Entre los pocos trabajos que abordan este tema destaca el estudio de Martínez *et al.* (2020), realizado en la región de la Frailesca de Chiapas, México, donde se analizó el balance energético y la eficiencia económica de tres sistemas de manejo en maíz. A pesar de estos aportes, persiste un vacío en la literatura nacional respecto a análisis energéticos de la agricultura de conservación en México.

Derivado de lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar los flujos de energía en tres sistemas de labranza bajo esquemas de agricultura de conservación en el cultivo de maíz bajo riego, mediante un análisis energético que incluyó el balance y la eficiencia energética, considerando el conjunto de insumos y prácticas agrícolas asociados a cada sistema, con la finalidad de identificar los sistemas más eficientes en el uso de energía para

orientar prácticas agrícolas que reduzcan dicho consumo energético, lo que implica una menor dependencia de combustibles fósiles y una reducción de emisiones de CO₂ en la producción agrícola en México.

MATERIALES Y METODOS

Ubicación del área de estudio y descripción de tratamientos

El estudio se realizó en el módulo de Agricultura de Conservación (AC) en condiciones de riego ubicado en el Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo, Estado de México, México (19.497706° N, 98.883317° O) (Figura 1). En el campo, los tratamientos se instalaron bajo un diseño experimental cuadro latino con tres repeticiones. Se establecieron cultivos anuales en parcelas separadas por callejones conformados por hileras de arbustos de *Leucaena*. El sitio experimental cuenta con 25 años de manejo continuo bajo un sistema de rotación trianual de cultivos, que incluye frijol, avena y maíz. Cada parcela experimental tuvo una superficie de 2116 m² (46 × 46 m).



Figura 1. Localización del área de estudio en el Campo Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Mexico. Fuente: Elaboración propia.

El sitio experimental presenta un clima templado subhúmedo, clasificado como C (W_o)(w)b(i'), con régimen de lluvias en verano (García, 1988), una precipitación media anual cercana a 600 mm y una temperatura media anual entre 9 y 25 °C. Esta información se basa en registros históricos de la estación meteorológica No. 15150 (San Mateo Huexotla, Texcoco, México). El suelo se clasifica como Mollisol, de acuerdo con el sistema de Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2022), caracterizado por la presencia de un epipedón mólico, con alto contenido de materia orgánica, color oscuro y una alta saturación de bases. Presenta un horizonte superficial de 15 a 30 cm de espesor, de color pardo oscuro y textura migajón limosa, seguido de horizontes subsuperficiales con textura arcillosa a franco limosa y estructura bien desarrollada. Se estudiaron tres tratamientos, los cuales se describen a continuación.

Labranza cero (LC)

En este tratamiento no se realizó remoción del suelo en ninguna etapa del manejo del cultivo y se mantuvo bajo este sistema durante 25 años. Se conservó al menos el 30 % de cobertura del suelo con residuos del cultivo anterior, lo que se logró estimando mediante cuadrantes de área conocida colocados aleatoriamente en las parcelas. La siembra en todos los tratamientos se realizó con una sembradora hidráulica para labranza de conservación, desarrollada por el Programa de Agricultura de Conservación Chapingo,

acoplada a un tractor agrícola de aproximadamente 70 hp. El control de malezas se realizó mediante la aplicación de un herbicida de contacto de origen orgánico (Sec-Natural®), de acción post-emergente, a una dosis de 2.25 L ha⁻¹. La fertilización se realizó con una dosis de 178 kg ha⁻¹ de urea y 89 kg ha⁻¹ de superfosfato triple y ajustados a la superficie experimental.

Labranza mínima (LM)

Este tratamiento consistió en un único paso de preparación del suelo mediante arado de cinceles previo a la siembra. Las condiciones de cobertura de residuos (30 %) y el manejo del cultivo fueron las mismas que en el tratamiento de labranza cero.

Labranza convencional (LCV)

Este tratamiento consistió en una preparación intensiva del suelo mediante barbecho con arado de discos, seguido de un rastreo mecánico para la fragmentación de agregados y nivelación superficial; adicionalmente, se realizaron labores complementarias como desvarado, rastrillado y empacado para el manejo de residuos y afinamiento del terreno. Se redujo la cobertura de residuos del cultivo anterior a valores inferiores al 15 %, estimados mediante cuadrantes de área conocida colocados aleatoriamente en las parcelas. El manejo del cultivo (herbicida y fertilización) fue el mismo que en el tratamiento de labranza cero.

Cuadro 1. Prácticas agrícolas realizadas por sistema de labranza.

Práctica agrícola	LCV	LM	LC
Barbecho con tractor y arado de discos	X		
Rastreo con tractor y rastra de discos	X		
Tractor con cinceles		X	
Siembra y fertilización con tractor y sembradora doble hilera	X	X	X
Riego (4 eventos)	X	X	X
Aplicación de herbicida (postemergente)	X	X	X
Aplicación de insecticida	X	X	X
Cosecha mecanizada con cosechadora	X	X	X
Desvarado con tractor	X	X	X
Rastrillado con tractor	X	X	X
Empacado con tractor	X	X	X
Trituración y esparcido de rastrojo con desvaradora		X	X

LCV: labranza convencional, LM: labranza mínima, LC: labranza cero.

El número y tipo de prácticas agrícolas implementadas varió entre los sistemas de labranza evaluados (Cuadro 1); sin embargo, las diferencias entre tratamientos se basaron principalmente a las operaciones mecánicas realizadas, ya que los demás insumos y prácticas de manejo se mantuvieron constantes.

El sistema convencional (LCV) involucró un total de 10 prácticas agrícolas, destacando el uso intensivo de implementos de labranza primaria y secundaria, como el barbecho con arado de discos y el rastreo. La labranza mínima de conservación (LM) también integró 10 prácticas, pero reemplazó el rastreo por el uso de cinceles y añadió la trituration y esparcido del rastrojo como práctica de manejo postcosecha. En contraste, el sistema de conservación de labranza cero (LC) operó con nueve prácticas agrícolas, eliminando las labores de labranza primaria y secundaria, lo que refleja una simplificación operativa enfocada en la mínima perturbación del suelo y en un menor gasto energético comparado con los sistemas de LM y LCV.

En este estudio se consideró el ciclo de producción del año 2024. En todos los tratamientos el cultivo fue maíz, cultivado en rotación después de avena y frijol. El cultivo de maíz se estableció utilizando semilla del híbrido Ocelote de Asgrow® con una densidad de población inicial de 86,000 plantas por ha.

Análisis energético

El análisis de los flujos de energía en los agroecosistemas se basó en la cuantificación de las entradas y salidas de energía para estimar el balance energético (Chamorro *et al.*, 2016). Para su estimación, se empleó un enfoque metodológico basado en coeficientes de equivalencia energética (Astier *et al.*, 2014; Dhanapala *et al.*, 2023). La dinámica del sistema se estructuró en tres componentes: 1) entrada, que comprende la energía directa (combustibles, electricidad y maquinaria) y la energía indirecta incorporada en insumos agrícolas (fertilizantes, pesticidas y semillas); 2) uso, referido a la distribución y transformación de la energía dentro del sistema productivo; y 3) salida, correspondiente a la energía contenida en los productos agrícolas, expresada en términos de su poder calorífico. Este enfoque, sustentado en la primera ley de la termodinámica, permitió estimar los indicadores energéticos del sistema (Hercher-Pasteur *et al.*, 2020).

Estimación del balance y eficiencia energéticos

En cada tratamiento se estimó el balance energético (BE) y la eficiencia energética (EE). El BE se calculó como la diferencia entre la energía de salida y la energía de entrada en cada sistema evaluado (salida – entrada), expresada

en unidades de energía MJ ha⁻¹. La eficiencia energética (EE) se estimó como la relación entre la energía producida (salida) y la energía invertida (entrada); es decir, como la razón salida/entrada. El índice de consumo energético se definió como la relación entrada/salida. Para realizar el cálculo del BE y de la EE se determinó la cantidad de insumos utilizados y productos obtenidos por hectárea, y posteriormente, cada uno fue multiplicado por su correspondiente factor de conversión energética. Estos factores se obtuvieron de diversas fuentes bibliográficas (Chamorro *et al.*, 2016; Dhanapala *et al.*, 2023; Dos Santos *et al.*, 2020), empleando valores promedio para homogenizar la estimación de las entradas y salidas energéticas, expresadas en MJ ha⁻¹ año⁻¹.

Cálculo de la entrada total de energía

La entrada total de energía derivada de los insumos para los diferentes tratamientos se estimó aplicando la Ecuación 1 (Dhanapala *et al.*, 2023)

$$EI = (CI_{mo} \times EC_{mo}) + (CI_s \times EC_s) + (CI_f \times EC_f) + (CI_p \times EC_p) + (CI_{cer} \times EC_{cer}) + (CI_{cd} \times EC_{cd}) + (CI_{maq} \times EC_{maq})$$

Ecuación (1)

Donde *EI* representa la entrada total de energía para la producción agrícola, expresada en MJ ha⁻¹, *CI* corresponde a la cantidad de insumos energéticos utilizados por unidad de área y *EC* al coeficiente energético asignado a cada insumo según lo indicado en el Cuadro 2. Los términos *mo*, *s*, *f*, *p*, *cer*, *cd* y *maq* hacen referencia a los insumos de mano de obra (h), semillas (kg), fertilizantes (kg), pesticidas (kg), consumo eléctrico para riego (kWh), combustible diésel (L) y maquinaria (kg), respectivamente. Los insumos considerados fueron comunes para todos los tratamientos; no obstante, las diferencias en el consumo energético se derivaron de la intensidad y tipo de labores realizadas en cada sistema de labranza.

Cálculo de la salida total de energía

La salida total de energía para los tratamientos se estimó de acuerdo con la Ecuación 2 (Dhanapala *et al.*, 2023).

$$EO = (CY_{grano} \times EC_{grano}) + (CY_{bs} \times EC_{bs})$$

Ecuación (2)

Donde *EO* es la salida total de energía en MJ ha⁻¹ para la producción del cultivo, *CY* es el rendimiento por unidad de superficie en kg y *EC* factor de coeficiente de energía del grano (kg), biomasa seca (kg) (Cuadro 3).

Cuadro 2. Factores usados para calcular los coeficientes energéticos de los insumos en la producción de cultivos.

Entradas	Insumos	Dos Santos <i>et al.</i> (2020)	Dhanapala <i>et al.</i> (2023)	Chamorro <i>et al.</i> (2016)	Promedio
Insumos	Labores humanas (h)	-	1.96	-	1.96
	Electricidad (kWh)	-	11.93	-	11.93
	Diésel (L)	-	47.80	-	47.80
	Tractor (kg)	-	93.61	-	93.61
Fertilizantes (kg)	Nitrógeno	77.66	75.46	75.60	76.24
	Fósforo	14.02	13.07	9.50	12.20
	Potasio	9.27	11.15		10.21
Agroquímicos (kg)	Herbicida	418.02	238.00	331.00	329.01
	Insecticida	310.87	238.00	467.00	338.62
	Fungicida	271.58	92.00	338.67	234.08
Semillas (kg)	Maíz	103.79	104.65		104.22

Energía equivalente expresada en MJ unidad⁻¹. Fuente: valores de equivalentes energéticos obtenidos de Dos Santos *et al.* (2020), Dhanapala *et al.* (2023) y Chamorro *et al.* (2016).

Cuadro 3. Factores considerados para el cálculo del coeficiente energético de salidas de energía en los tratamientos

Salidas-rendimiento (kg)	Energía equivalente (MJ unidad ⁻¹)	Referencia
Grano de maíz	18.26	Dhanapala <i>et al.</i> (2023)
Biomasa de rastrojo de maíz (base seca)	15.22	

El rendimiento de grano y la biomasa de rastrojo fueron determinados mediante muestreo directo en campo en unidades de 5 m lineales por sitio. En cada unidad se registró el número de plantas, número de mazorcas y el peso fresco de las mazorcas; posteriormente, las muestras fueron secadas hasta peso constante para obtener el peso en base seca. El grano fue separado y pesado para estimar el rendimiento de grano, el cual fue extrapolado a t ha⁻¹. La biomasa de rastrojo se definió como la fracción aérea no cosechable del cultivo (tallos, hojas y estructuras reproductivas sin grano), expresada en base seca. El rendimiento biológico se estimó como la suma del rendimiento de grano y la biomasa de rastrojo.

Balance energético

El balance energético para el sistema de producción se estimó de acuerdo con la Ecuación 3 (Chamorro *et al.*, 2016).

$BE = EO - EI$

Ecuación (3)

Donde *BE* es el balance energético en MJ ha⁻¹ año⁻¹, *EO* y *EI* fueron definidas previamente.

Eficiencia energética

La eficiencia energética para el sistema de producción se estimó de acuerdo con la Ecuación 4 (Chamorro *et al.*, 2016).

$EE = \frac{EO}{EI}$

Ecuación (4)

Donde *EE* es la eficiencia energética, un índice adimensional; *EO* y *EI* corresponden a la energía de salida y entrada, respectivamente.

La energía total invertida por hectárea se desglosó en cinco categorías principales: labores humanas, electricidad, consumo de diésel, uso del tractor e implementos, así como insumos (fertilizantes, semillas y agroquímicos).

Esta clasificación se realizó con base en la naturaleza de los insumos y su forma de incorporación al sistema productivo, distinguiendo entre energía directa, asociada con las operaciones en campo, y energía indirecta, relacionada con la producción y uso de insumos agrícolas, siguiendo el enfoque propuesto por Moitzi *et al.* (2021).

Análisis comparativo de indicadores energéticos mediante diagrama de radar

Se elaboró un diagrama de radar con el software R (R Core Team, 2023) utilizando el paquete fmsb (Nakazawa, 2023). Para su construcción se consideraron cinco indicadores energéticos: energía invertida, energía producida, balance energético, índice de eficiencia e índice de consumo. Los valores de cada indicador fueron normalizados en una escala de 0 a 1 para permitir su comparación en una misma escala. En el caso del índice de consumo, se aplicó una transformación inversa, de modo que valores menores de consumo energético representaran un mejor desempeño relativo. Posteriormente, se añadieron los valores máximos (1) y mínimos (0) requeridos por el paquete fmsb para la generación del gráfico, permitiendo la comparación visual entre los sistemas de labranza evaluados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Energía invertida por tipo de recurso y tratamiento (entrada)

Los requerimientos energéticos totales demandados por los sistemas fueron de 20.62, 20.42 y 19.90 GJ ha⁻¹ para LCV, LM y LC, respectivamente (Cuadro 4), los cuales son ligeramente superiores a lo reportado por Moitzi *et al.* (2021), quienes documentaron consumos energéticos de

entre 17.0 y 17.4 GJ ha⁻¹ en sistemas de labranza para maíz en Austria. Esta diferencia puede atribuirse principalmente a que su sistema se desarrolló bajo condiciones de secano, mientras que en este estudio la electricidad para riego representó un elemento importante del consumo energético total (25.3 %). Resultados similares en requerimientos energéticos fueron reportados por Kumar *et al.* (2023) en la India, con valores de 21.7 GJ ha⁻¹ para labranza convencional y 19.1 GJ ha⁻¹ para labranza cero.

Aunque se observaron ligeras reducciones en el total de energía invertida al transitar del sistema de LCV a LM, y posteriormente a LC, estas diferencias no fueron sustanciales. Esto sugiere que el tipo de labranza tiene un impacto limitado sobre las entradas energéticas totales, dado que los principales componentes energéticos permanecen constantes entre tratamientos.

Al analizar la distribución por tipo de insumo, se observó que la mayor parte de la energía en este estudio se concentró en fertilizantes (32.5 %), semillas (30.3 %) y electricidad para riego (25.3 %), que en conjunto representaron más del 88 % del total invertido. Este patrón coincide con lo reportado por Martínez *et al.* (2020) y Kumar *et al.* (2023), quienes también destacaron el peso energético de los fertilizantes en sistemas de maíz. De forma complementaria, Taner *et al.* (2016) identificaron a los fertilizantes y semillas como los principales insumos en sistemas de labranza, lo que refleja una tendencia común en diversos contextos productivos. En contraste, los aportes asociados con labores humanas, el consumo de diésel y el uso del tractor fueron considerablemente menores; sin embargo, estos insumos fueron los principales responsables de las diferencias observadas entre los sistemas de labranza.

Cuadro 4. Energía parcial y total invertida (MJ ha⁻¹) en los sistemas evaluados (entradas).

Entradas	LCV	LM	LC
Labores humanas	10.60	9.95	7.99
Electricidad	5,221.20	5,221.20	5,221.20
Diésel	1,593.33	1,402.13	956.00
Uso de tractor	514.51	504.80	436.85
Fertilizantes	6,700.74	6,700.74	6,700.74
Semillas	6,253.15	6,253.15	6,253.15
Agroquímicos	329.01	329.01	329.01
Total	20,622.54	20,420.98	19,904.93

LCV: labranza convencional, LM: labranza mínima, LC: labranza cero.

Energía producida (salida)

El Cuadro 5 presenta los rendimientos biológicos y de grano obtenidos bajo los tres sistemas de manejo evaluados. El rendimiento biológico varió entre 15.43 y 20.30 t ha⁻¹, mientras que el rendimiento en grano osciló entre 8.36 y 10.74 t ha⁻¹. A partir de estos valores, se estimó la biomasa seca de maíz, la cual fue mayor en el tratamiento de labranza cero con 9.64 t ha⁻¹.

La energía total incluye tanto la generada por el grano como por los residuos agrícolas; de esta forma, la mayor producción energética se obtuvo en el sistema de LC (341.29 GJ ha⁻¹), seguido de la LM (313.71 GJ ha⁻¹) y la LCV (260.27 GJ ha⁻¹). De forma similar, ensayos en el sur de Alemania arrojaron que el maíz presentó los más altos rendimientos energéticos netos entre diversos cultivos, con valores de 354 a 493 GJ ha⁻¹ según el sitio (Simon y Hülsbergen, 2021). Estos resultados respaldan el potencial del maíz como cultivo energético eficiente, particularmente bajo esquemas de agricultura de conservación.

Indicadores de eficiencia energética

El Cuadro 6 presenta los principales indicadores energéticos estimados. El balance energético, definido como la diferencia entre la energía producida y la energía invertida, fue mayor en el sistema labranza cero con 321,383.77 MJ ha⁻¹. El índice de eficiencia energética, expresado como la razón entre la energía producida y la energía invertida, alcanzó un valor de 17.15 en este mismo sistema; asimismo, el índice de consumo energético,

entendido como la relación entrada/salida, fue menor en labranza cero (0.06), lo que refleja una mayor eficiencia en el uso de recursos energéticos.

El diagrama de radar (Figura 2) sintetiza el comportamiento relativo de los principales indicadores energéticos evaluados entre sistemas de manejo. El sistema de labranza cero presentó el mayor desempeño en balance, eficiencia energética y energía producida, así como el menor consumo relativo de energía (representado de forma invertida), lo que refleja un uso más eficiente de los recursos. Esta tendencia ha sido documentada en distintos contextos por autores como Kumar *et al.* (2023), Dos Santos *et al.* (2020) y Moitzi *et al.* (2021), quienes coinciden en que la labranza cero incrementa la eficiencia energética del cultivo de maíz, incluso cuando el uso de insumos es equivalente al de sistemas convencionales. Los valores fueron normalizados (0 a 1) para permitir comparación en una misma escala.

La agricultura de conservación (AC) en México, de acuerdo con Valerio *et al.* (2016) y Ramírez-López *et al.* (2013), ha sido limitada en gran medida por los costos asociados con el proceso de transición, entre estos se incluyen la curva de aprendizaje, los riesgos económicos, la escasez de información técnica accesible, la falta de especialistas capacitados en el tema, así como restricciones estructurales como la disponibilidad de maquinaria adecuada.

Un estudio reciente (Lakhena *et al.*, 2025) señala que las parcelas labradas convencionalmente consumen mayor energía no renovable directa e indirecta que las prácticas de retención de residuos basadas en labranza de

Cuadro 5. Producción de biomasa y energía generada por tratamiento (MJ ha⁻¹) en los sistemas evaluados.

Tratamiento	Rendimiento biológico (t ha ⁻¹)	Rendimiento grano (t ha ⁻¹)	Biomasa de rastrojo (t ha ⁻¹)	Rastrojo maíz (MJ)	Grano maíz (MJ)	Total (MJ)
LCV	15.4	8.4	7.1	107663.7	152611.0	260274.7
LM	18.5	10.7	7.7	117539.0	196173.3	313712.3
LC	20.3	10.7	9.6	146713.2	194575.5	341288.7

LCV: labranza convencional, LM: labranza mínima, LC: labranza cero.

Cuadro 6. Indicadores energéticos de tres sistemas de manejo en el cultivo de maíz.

Sistema de manejo	Balance energético (MJ ha ⁻¹)	Índice de eficiencia energética	Índice de consumo energético
Convencional	239,652.19	12.62	0.08
Labranza mínima	293,291.27	15.36	0.07
Labranza cero	321,383.77	17.15	0.06

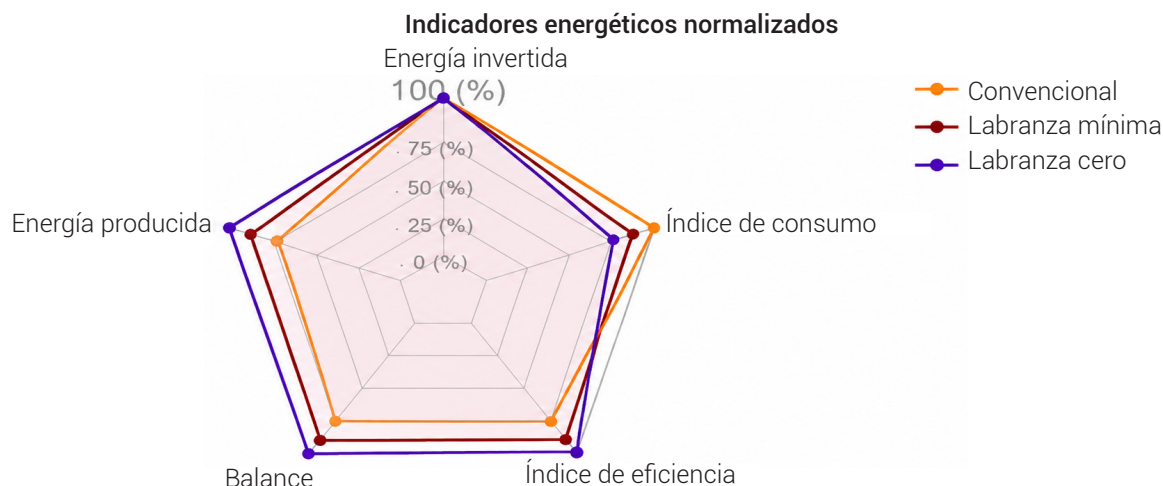


Figura 2. Comportamiento relativo de los principales indicadores energéticos evaluados entre sistemas de manejo.

conservación. Estos resultados evidencian la necesidad de fortalecer estrategias y políticas para generar acciones que permitan escalar el uso de esta práctica sostenible y lograr una mayor eficiencia energética en el uso de recursos y productividad de los sistemas agrícolas.

CONCLUSIÓN

Los sistemas de labranza cero y mínima usados en la producción de maíz bajo riego fueron los más eficientes en términos energéticos, registraron un mejor balance energético, el más alto índice de eficiencia y el menor índice de consumo, con respecto al sistema de labranza convencional, en un suelo Mollisol del Estado de México. El estudio evidenció que, si bien las entradas energéticas totales fueron similares entre sistemas, la simplificación mecánica y la mayor producción de biomasa y grano en labranza cero y mínima contribuyeron a una mayor eficiencia global. La electricidad para riego, fertilizantes y semillas concentran el 88.1 % de la energía invertida, lo que sugiere áreas prioritarias para mejorar la eficiencia energética.

BIBLIOGRAFÍA

- Aduteye E. K. and S. Tubene (2026) Farmers' perceptions of climate change, adaptation practices, and barriers in the Delmarva Peninsula, USA. *Climate* 14:70, <https://doi.org/10.3390/cli14030070>
- Astier M., Y. Merlin-Urbe, L. Villamil-Echeverri, A. Garciarreal, M. E. Gavito and O. R. Masera (2014) Energy balance and greenhouse gas emissions in organic and conventional avocado orchards in Mexico. *Ecological Indicators* 43:281-287, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.002>
- Benedek A., T. Rokicki and A. Szeberényi (2023) Bibliometric evaluation of energy efficiency in agriculture. *Energies* 16:5942, <https://doi.org/10.3390/en16165942>
- Chamorro A. M., S. I. Golik, R. Bezus y A. E. Pellegrini (2016) Análisis energético de cuatro secuencias de cultivo en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences* 31:20-31, <https://doi.org/10.4067/S0719-38902016000100003>
- Derpsch R., A. J. Franzluebbers, S. W. Duiker, D. C. Reicosky, K. Koeller, T. Friedrich, ... and K. Weiss (2014) Why do we need to standardize no-tillage research?. *Soil and Tillage Research* 137:16-22, <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.10.002>
- Dhanapala S., H. Nilmalgoda, M. B. Gunathilake, U. Rathnayake and E. M. Wimalasiri (2023) Energy balance assessment in agricultural systems; an approach to diversification. *AgriEngineering* 5:950-964, <https://doi.org/10.3390/agriengineering5020059>
- Dos Santos H. P., G. A. Dalmago, A. Santi and R. S. Fontaneli (2020) Energy performance of soil management systems and crop rotation. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 15:e6950, <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i2a6950>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015) Agricultura de conservación. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <http://www.fao.org/conservation-agriculture/es/> (Marzo 2025).
- García E. (1988) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana). 4ª edición. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 96 p.
- Gliessman S. R. (2015) Agroecology: the Ecology of Sustainable Food Systems. 3rd edition. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. 405 p, <https://doi.org/10.1201/b17881>
- Gombkötő N., T. Vinkóczy and J. P. Koltai (2026) Estimating agricultural sustainability: a multidimensional approach to a farm-level assessment tool. *Frontiers in Environmental Science* 13:1704344, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1704344>
- Gura I., P. N. S. Mkeni, C. C. Du Preez and J. H. Barnard (2022) Short-term effects of conservation agriculture strategies on the soil quality of a Haplic Plinthosol in Eastern Cape, South Africa. *Soil and Tillage Research* 220:105378, <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105378>
- Hercher-Pasteur J., E. Loiseau, C. Sinfort and A. Hélias (2020) Energetic assessment of the agricultural production system. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 40:29, <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00627-2>

- Jiménez G. C. A., L. Maciel P., A. Peña R. y A. Castillo R. (2004) Principios y fundamentos de labranza de conservación: guía para su implementación. Folleto Técnico Núm. 24. Campo Experimental Pabellón, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México.
- Kassam A., T. Friedrich and R. Derpsch (2019) Global spread of conservation agriculture. *International Journal of Environmental Studies* 76:29-51, <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>
- Krebs C. J. (2008) The Ecological World View. University of California Press. Berkeley, California, USA. 574 p.
- Khoshroo A., A. Emrouznejad, A. Ghaffarizadeh, M. Kasraei and M. Omid (2018) Sensitivity analysis of energy inputs in crop production using artificial neural networks. *Journal of Cleaner Production* 197 Part 1:992-998, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.249>
- Kumar A., U. K. Behera, S. Dhar, L. Shukla, R. Singh, S. Babu, ... and A. Kumar (2023) Conservation tillage and microbially mediated integrated phosphorus management enhance productivity, profitability and energy use efficiency of maize. *The Journal of Agricultural Science* 161:373-386, <https://doi.org/10.1017/S0021859623000266>
- Lakhena K. K., V. Pooniya, N. Biswakarma, R. R. Zhiipao, A. Singh, D. Kumar, ... and R. Jat (2025) Impact of nine years of conservation tillage and precise nutrient management on equivalent yields, soil microbial dynamics, and water-energy footprints of the maize-mustard rotation. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 9:1359281, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1359281>
- Martínez F. B., F. Guevara, C. E. Aguilar, R. Pinto, M. A. La O, L. A. Rodríguez and D. R. Aryal (2020) Energy and economic efficiency of maize agroecosystem under three management strategies in the Frailesca, Chiapas (México). *Agriculture* 10:81, <https://doi.org/10.3390/agriculture10030081>
- Moitzi G., R. W. Neugschwandtner, H. P. Kaul and H. Wagentristl (2021) Comparison of energy inputs and energy efficiency for maize in a long-term tillage experiment under Pannonian climate conditions. *Plant, Soil and Environment* 67:299-306, <https://doi.org/10.17221/67/2021-PSE>
- Nakazawa M. (2023) fmsb: functions for medical statistics book with some demographic data. R package version 0.7.5. The R-universe Platform. Switzerland, <https://minatonakazawa.r-universe.dev/fmsb> (July 2026).
- Odum E. P. y G. W. Barrett (2008) Fundamentos de Ecología. 5ª edición. Cengage Learning. Boston, Massachusetts, USA. 613 p.
- Pimentel D., L. E. Hurd, A. C. Bellotti, M. J. Forster, I. N. Oka, O. D. Sholes and R. J. Whitman (1973) Food production and the energy crisis. *Science* 182:443-449, <https://doi.org/10.1126/science.182.4111.443>
- Pretty J. and Z. P. Bharucha (2014) Sustainable intensification in agricultural systems. *Annals of Botany* 114:1571-1596, <https://doi.org/10.1093/aob/mcu205>
- R Core Team (2023) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf> (July 2026).
- Ramírez-López A., T. D. Beuchelt y M. Velasco-Misael (2013) Factores de adopción y abandono del sistema de agricultura de conservación en los valles altos de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 10:195-214.
- Rasul K., M. Bruckner, F. Mempel, S. Trsek and E. G. Hertwich (2024) Energy input and food output: the energy imbalance across regional agrifood systems. *PNAS Nexus* 3:pgae524, <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae524>
- Simon R. O. and K. J. Hülsbergen (2021) Energy balance and energy use efficiency of annual bioenergy crops in field experiments in southern Germany. *Agronomy* 11:1835, <https://doi.org/10.3390/agronomy11091835>
- Soil Survey Staff (2022) Keys to Soil Taxonomy. 13th edition. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. Washington, D. C. 401 p.
- Taner A., Y. Kaya, R. Z. Arisoy, İ. Gültekin and F. Partigöç (2016) Effect of tillage systems on energy use efficiency in wheat based cropping sequence. *International Journal of Agriculture and Biology* 18:353-361, <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0095>
- Valerio R. M., R. Rendón M., J. U. Toledo y J. Díaz J. (2016) Adopción de prácticas de agricultura de conservación en Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7:3103-3113, <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i15.429>
- Wang X. (2022) Managing land carrying capacity: key to achieving sustainable production systems for food security. *Land* 11:484, <https://doi.org/10.3390/land11040484>