



MEJOR RENDIMIENTO Y RENTABILIDAD DE MAÍZ EN EL TRÓPICO HÚMEDO MEDIANTE CAMAS PERMANENTES, RESIDUOS DE CULTIVOS Y ROTACIÓN CON FRIJOLES †

[IMPROVED MAIZE YIELD AND PROFITABILITY IN THE HUMID TROPICS THROUGH PERMANENT BEDS, CROP RESIDUES, AND BEAN ROTATION]

Ouorou Ganni Mariel Guera¹, Jonatan Villa-Alcántara², Omar Núñez-Peñaloza², Nele Verhulst¹ and Simon Fonteyne^{1,*}

¹Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), Carretera México-Veracruz Km. 45, El Batán, Texcoco, Estado de México, México. C.P. 56237. Email: s.fonteyne@cgiar.org*

²Unión de Productores Agrícolas y Pecuarios de Cotzocón, Calle Emiliano Zapata sn., Arroyo Encino, San Juan Cotzocón, Oaxaca, México. C.P. 70212.

*Corresponding author

SUMMARY

Background. Oaxaca is a Mexican state with diverse agroecological regions, necessitating local studies to evaluate sustainable agricultural practices. The region of Papaloapan, Oaxaca, is characterized by soil degradation, aggravated by steep slopes, high rainfall and the predominance of luvisolic soils, which are prone to erosion on the surface and compaction in the subsoil (plow sole). An alternative to reduce soil degradation could be conservation agriculture, but its successful implementation and mass adoption will require studies to adapt its components (minimum soil movement, permanent soil cover, and crop diversification) to local conditions. **Objective.** To evaluate the combined effects of conservation agriculture components on maize (*Zea mays* L.) yield and profitability. **Methodology.** From 2014 to 2019, a randomized complete block design (RCBD) was used to evaluate eight treatments resulting from the combination of tillage practices (conventional tillage, no-tillage, and permanent beds), crop residue management, crop rotation (*Mucuna pruriens* and *Phaseolus vulgaris* L.), different fertilization formulas, and soil amendments. **Results.** Maize rotated with beans in permanent beds with crop residue showed an average yield of 5.2 Mg ha⁻¹, a net profit of \$16,517.00 MXN ha⁻¹, and a benefit-cost ratio of 1.69, demonstrating better performance than the control treatment (conventional tillage without crop rotation, 5.1 Mg ha⁻¹, \$7,721.00 MXN ha⁻¹, and 1.53). Even without crop rotation, systems with permanent beds and crop residue showed maize yields superior to zero tillage and like conventional tillage. **Implications.** Maize in spring-summer rotated with beans in autumn-winter in permanent beds with residue retention yields similar to the conventional system and produces higher net profit. **Conclusion.** Conservation agriculture in its variant of permanent beds with crop residue and maize-bean rotation is a viable option for sustainable agricultural production in the humid tropics such as the Papaloapan.

Key words: Conservation agriculture; zero tillage; crop rotation; cover crops; integrated fertility; sustainability.

RESUMEN

Antecedentes: El estado de Oaxaca tiene diversas zonas agroecológicas que requieren estudios locales para evaluar prácticas agrícolas sustentables. La región del Papaloapan se caracteriza por tener suelos degradados, situación que es agravada por las pendientes pronunciadas, las altas precipitaciones y la predominancia de suelos luvisólicos, susceptibles a erosionarse en la superficie y compactarse en el subsuelo (piso de arado). Una alternativa para reducir la degradación podría ser la agricultura de conservación, pero su exitosa implementación y adopción masiva requiere de estudios que adapten sus componentes (mínimo movimiento del suelo, cobertura permanente del suelo y diversificación de cultivos) a las condiciones locales. **Objetivo.** Evaluar los efectos combinados de los componentes de la agricultura de conservación en el rendimiento y rentabilidad del maíz (*Zea mays* L.). **Metodología.** De 2014 a 2019, se empleó un diseño de bloques completos aleatorizados (DBCA) para evaluar ocho tratamientos resultantes de la combinación de prácticas de labranza (labranza convencional, cero labranza y camas permanentes), manejo de rastrojos, rotaciones de cultivos (*Mucuna pruriens* y *Phaseolus vulgaris* L.), diferentes fórmulas de fertilización y mejoradores de suelo. **Resultados.** El maíz rotado con frijol en camas permanentes con retención de rastrojo presentó

† Submitted July 24, 2024 – Accepted March 20, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5756>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = O.G.M. Guera: <http://orcid.org/0000-0002-6184-9425>

en promedio un rendimiento de 5.2 Mg ha⁻¹, una utilidad neta de \$16,517.00 MXN ha⁻¹ y una relación Beneficio/Costo (B/C) de 1.69, presentando así mejor desempeño que el tratamiento testigo (labranza convencional sin rotación de cultivos, el cual presentó un rendimiento promedio de 5.1 Mg ha⁻¹, \$7,721.00 MXN ha⁻¹ de utilidad neta y 1.53 de relación Beneficio/Costo). Incluso sin rotación de cultivos, los sistemas con camas permanentes con rastrojo mostraron rendimientos de maíz superiores a los de cero labranza y similares a los de labranza convencional. **Implicaciones.** El maíz sembrado en primavera-verano y rotado con frijol en otoño-invierno en camas permanentes con rastrojo presenta un rendimiento similar al del sistema convencional y una mayor utilidad neta. **Conclusión.** La agricultura de conservación, en su variante de camas permanentes, con retención de rastrojo y rotación maíz-frijol es una opción viable para la producción agrícola sustentable en el trópico húmedo como en el Papaloapan.

Palabras clave: Agricultura de conservación; cero labranza; rotación de cultivos; cultivos de cobertura; fertilidad integral; sustentabilidad.

INTRODUCCIÓN

Los suelos sanos son la base para la producción sostenible de alimentos (FAO, 2015) y proporcionan sistemas agrícolas más productivos, contribuyendo a la seguridad alimentaria y a la reducción de la pobreza (Heger *et al.*, 2018). El uso agrícola conlleva la transformación de las propiedades y funciones básicas de los suelos y puede conducir a su degradación (Emrah *et al.*, 2021). Actualmente, más del 30 % de los suelos del planeta están degradados y si esa situación no se revierte, los pequeños agricultores no podrán aprovechar el potencial de rendimiento proporcionado por el mejoramiento genético y otras innovaciones agrícolas (Stewart *et al.*, 2020). Esto dificultaría la producción sustentable de cultivos básicos (como maíz, arroz y trigo) y, por consiguiente, el desarrollo sostenible (Tanumihardjo *et al.*, 2020). En el contexto de la región del Papaloapan, la degradación de los suelos se acelera por las pendientes pronunciadas, la eliminación de la vegetación, la sequía, la labranza del suelo y la erosión eólica e hídrica (Ghabbour *et al.*, 2017).

Una alternativa a la labranza convencional para lograr la producción sostenible es la agricultura de conservación (AC) (Nichols *et al.*, 2015), la cual se basa principalmente en la mínima alteración del suelo, la cobertura permanente del mismo y la rotación de cultivos (Hobbs *et al.* 2008). Si bien la AC puede mejorar la calidad del suelo (Jayaraman *et al.*, 2021) y reducir los costos de producción sin reducir la productividad de los cultivos, tanto en condiciones de riego como de temporal (Panettieri *et al.*, 2013; Fonteyne *et al.*, 2021), la obtención de esos beneficios depende de las características del sitio y el clima regional (Sun *et al.*, 2020). En México, la AC ha sido estudiada principalmente en climas semiáridos, donde el factor limitante es la humedad del suelo y los resultados reportan un incremento en los rendimientos de los cultivos (Speratti *et al.*, 2015). Además, en esos climas se sabe que la AC mejora la calidad de suelos y aumenta su capacidad de retención de agua (Verhulst *et al.*, 2012; Fonteyne *et al.*, 2021), de la cual depende la sustentabilidad de esos agroecosistemas (Gliessman, 2014). Sin embargo, poco se sabe sobre el desempeño de la AC en los climas húmedos mexicanos.

La región del Papaloapan es una zona tropical húmeda que se encuentra en el sureste de México, abarcando territorialmente los estados de Oaxaca, Veracruz y Puebla (Miranda-Vidal *et al.*, 2016). El 51 % de su superficie, que corresponde a Oaxaca (Pérez y Ortiz, 2002), es caracterizada por su alta agrobiodiversidad y contribuye de forma destacada al sector agropecuario del estado, principalmente en la ganadería y la agricultura con cultivos como la caña de azúcar, piña, limón y maíz (López, 2017; Parada-Sánchez *et al.*, 2019; Sánchez-Hernández *et al.*, 2019). La producción de maíz es predominantemente de secano y se caracteriza por el uso de materiales híbridos, sembradoras convencionales y labranza de suelo con tractores de cuatro ruedas. La cosecha y el acondicionamiento de granos se realizan de forma manual y la producción está destinada al autoconsumo o venta local (Vásquez *et al.*, 2017).

El adecuado manejo de la fertilización es fundamental para lograr los objetivos de la AC (Thierfelder *et al.*, 2018). En la región, la fertilización del maíz se realiza con la fórmula general 80-60-00 NPK, con rendimientos y rentabilidades aceptables, pero mejorables con una fertilización más integral que incluya micronutrientes (Sahrawat *et al.*, 2008) y el uso de mejoradores de suelo (Enesi *et al.*, 2023). A pesar del uso de variedades híbridas de maíz, los rendimientos han sido generalmente bajos, con cifras que oscilaron entre 1.3 y 1.8 Mg ha⁻¹ durante el ciclo agrícola anterior al inicio de este estudio (PV2013) (SIAP, 2020). Esto confirma que la adopción de variedades más productivas debe ir acompañada de un manejo adecuado que les permita expresar su potencial. Además, el cambio climático ha puesto a prueba la resiliencia de los sistemas agrícolas de la región, reduciendo la productividad de los cultivos y disminuyendo su atractivo. En este contexto, la AC podría ser una alternativa viable para la región de Papaloapan.

La baja adopción de la AC en la región de Papaloapan ha sido favorecida por la escasez de estudios de cómo implementarla, además que en la región los residuos de cultivos suelen usarse como forraje o fuente adicional de ingresos en la ganadería. Así, el exitoso

escalamiento de la AC en la región demanda evidencias científicas de sus beneficios agronómicos, económicos, ambientales y sociales en esas condiciones agroecológicas. Por ello, este estudio evaluó los efectos combinados a mediano plazo de tres prácticas de labranza (labranza convencional, cero labranza y camas permanentes angostas), diferentes manejos de residuos (retirar o dejar rastrojo), rotación de cultivos (*Mucuna pruriens* y *Phaseolus vulgaris* L.), diferentes fórmulas de fertilización (la general y la basada en análisis de suelo) y aplicación de mejoradores de suelo en el rendimiento y rentabilidad de maíz en las condiciones agroecológicas de la región del Papaloapan, en Oaxaca, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

El estudio se realizó en un terreno de 2,764.8 m² del predio “La Sabana”, ubicado a 17°25′31.05″N, 95°23′52.76″O y una altitud de 123 msnm en el municipio de San Juan Cotzocón, Oaxaca. En el periodo de evaluación (2014-2019), el área presentó una temperatura media anual de 25°C y una precipitación anual de 1963 mm (datos de CONAGUA

2014-2017 y datos tomados del área 2018-2019, Figura 1). La pendiente del área es menor al 3 % y su suelo es de tipo Luvisol, con un pH de 5.1.

Experimento y diseño experimental

El experimento se desarrolló en una plataforma de investigación de uno de los hubs, o nodos de innovación, impulsados por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y sus colaboradores, donde el diseño de los tratamientos buscó evaluar sistemas mejorados y compararlos con un tratamiento testigo que representa el sistema de producción local. Se evaluaron ocho tratamientos de 2014 a 2019 (Tabla 1), siguiendo un diseño de bloques completos aleatorizados con dos repeticiones (bloques), totalizando 18 unidades experimentales. Cada unidad experimental tuvo una superficie de 153.6 m² (6.4 m × 24 m) conformada por 8 surcos de 0.8 m de ancho y 24 m de longitud (Figura 2).

Los tratamientos se obtuvieron combinando varios componentes (Tabla 1). El primero fue la rotación de cultivos, estableciendo maíz (Pioneer 4082W en 2014, 2016, 2017 y 2018; el H-516 en 2015 y el Pioneer 30F96 en

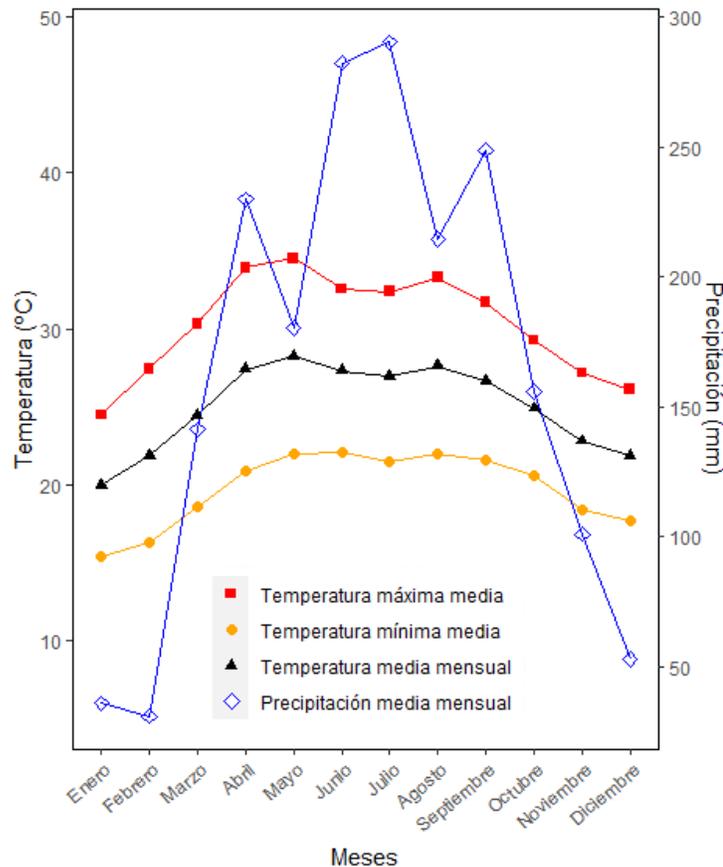


Figura 1. Temperaturas y precipitaciones mensuales promedio de San Juan Cotzocón, Oaxaca, México, para el periodo 2014 - 2019.

2019) en primavera-verano (10 al 20 de junio) y frijol variedad “Michigan” (Tratamiento 6) y mucuna (Tratamientos 5, 7 y 8) como cultivos de rotación en otoño-invierno (OI). El segundo componente fue el tipo de labranza. Aquí se consideró: la labranza convencional (LC) de la región, la cual consiste en realizar dos pasos de rastra a una profundidad de 20 centímetros (Tratamiento 1); la cero labranza (CL), en la cual se realizaron directamente las siembras sin ningún tipo de labranza (Tratamientos 2 y 3); y las camas permanentes angostas de 20 cm de altura, reformadas en cada ciclo después de la cosecha y antes de la siembra (Tratamientos 4 al 8). El tercer componente fue el manejo de rastrojos con las opciones de dejarlos como cobertura en la parcela (Tratamientos 3 al 8) o retirarlos (Tratamientos 1 y 2). También se evaluó la fertilización por su importancia para obtener sistemas agrícolas productivos y rentables.

La preparación de suelo (rastreo o reformatión de camas) de los tratamientos que lo requerían se realizó días antes de la siembra. Se utilizaron materiales híbridos blancos de maíz, tratados contra plagas del suelo con el insecticida Semevin (Thiodicarb, 300 ml/20 kg de semillas). Las siembras de maíz fueron realizadas del 10 al 20 de junio de cada año del periodo de evaluación, con una sembradora de 4 cuerpos neumática Modelo LC-2010-U (Sembradores del

Bajío, Manuel Doblado, México) a una densidad de 62,500 semillas ha⁻¹. El frijol y la mucuna fueron sembrados manualmente en el ciclo OI del 01 de noviembre al 01 de diciembre de cada año, con densidades de 62,500 semillas ha⁻¹ y 25,000 semillas ha⁻¹, respectivamente. Las parcelas sin rotación de cultivos estuvieron en descanso en el ciclo OI.

En cuanto a la fertilización, las cantidades utilizadas para obtener la fórmula F1, aplicada a los seis primeros tratamientos, fueron 122.87 kg ha⁻¹ de Urea y 130.43 kg ha⁻¹ de Fosfato Diamónico. La fórmula F2, basada en análisis de suelo y aplicada a los tratamientos 7 y 8, fue 146-70-80-10Zn-3.3S-4Mg-1.4B. Las fuentes fueron: NitroMag (27-00-00+4Mg+6Ca), Urea (46-00-00), Fosfato Diamónico (18-46-00), Cloruro de Potasio (00-00-60), Boronat (30 %) y FertiZinc (36Zn + 12S). Las cantidades utilizadas para completar la dosis fueron: 100.26 kg ha⁻¹ de NMg, 152.17 kg ha⁻¹ de Fosfato Diamónico, 133.33 kg ha⁻¹ de Cloruro de Potasio, 3.255 kg ha⁻¹ de Boronat, 28.190 kg ha⁻¹ de FertiZinc y 200 kg ha⁻¹ de Urea. La fertilización fue manual y distribuida en tres aplicaciones. En el momento de la siembra se aplicó todo el fósforo y potasio a todos los tratamientos y el zinc y boro a los tratamientos 7 y 8. Las segundas y terceras aplicaciones fueron de nitrógeno. La segunda se realizó entre los 25 y 30 días después de la emergencia (DDE), enterrando el fertilizante a una profundidad de

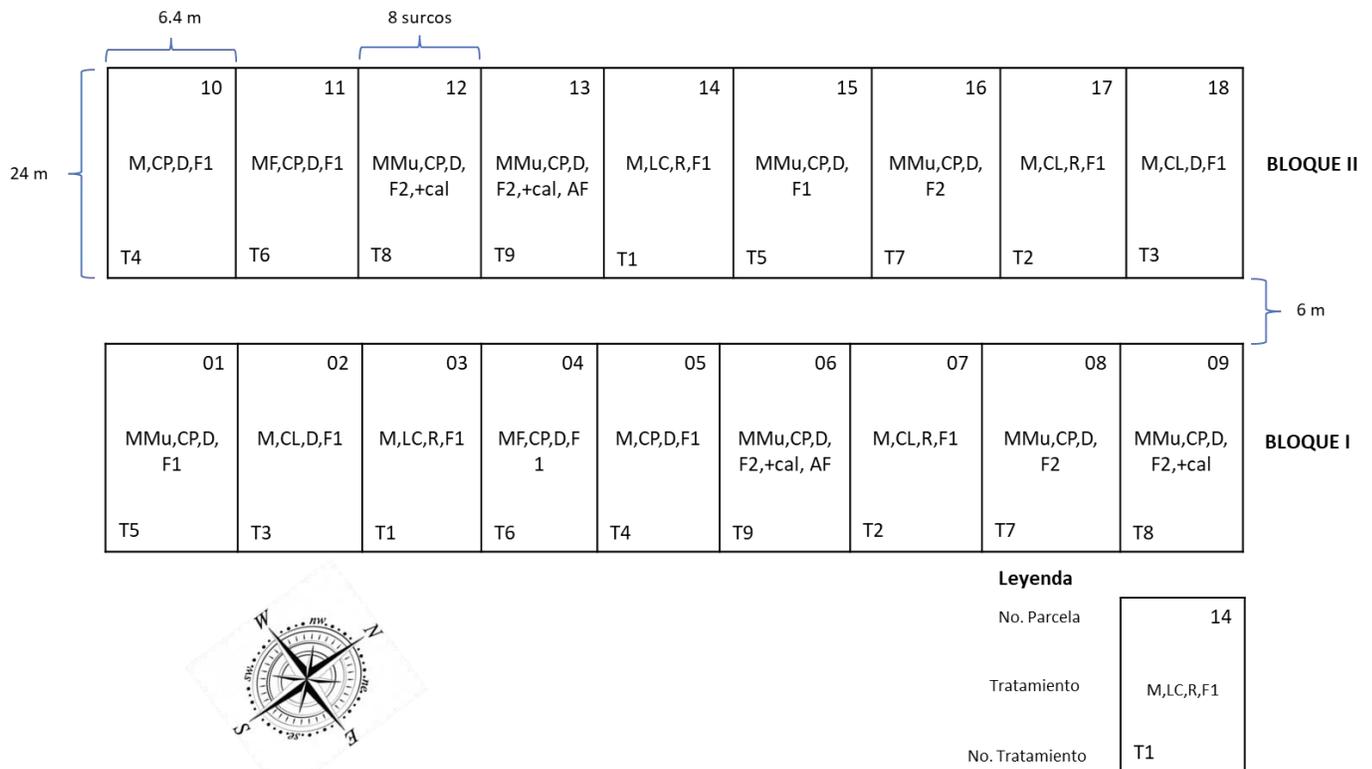


Figura 2. Croquis del ensayo en San Juan Cotzocón, Oaxaca. El tratamiento T9 (MMu, CP, D, F2, +cal, AF), al ser un tratamiento flexible similar a T8 (MMu, CP, D, F2, +cal), no fue considerado en el análisis.

10 cm y la tercera a los 47 DDE. Al inicio del experimento (ciclo PV 2014), en el tratamiento 8 se realizó una aplicación de cal dolomita (2 Mg ha^{-1}) que se incorporó con un paso de rastra a una profundidad de 20 cm. El frijol solo fue fertilizado al momento de la siembra con 41-46-00 NPK que se logró con 50 kg de Urea (46-00-00) y 100 kg de Fosfato Diamónico (18-46-00).

En la región del Papaloapan, después de la cosecha, se suele dejar crecer la maleza y pastorear con ganado bovino en mayo antes de las siembras. Si la densidad de la maleza es alta, se realizan de dos a tres pasos de rastra o se usa el control químico, seguido de dos pasos de rastra. En este estudio, el control de malezas fue químico y manual. A los 10 días antes de la siembra se aplicó glifosato (3 L ha^{-1}) + 2,4-D Amina (1 L ha^{-1}) y después de la emergencia, glufosinato de amonio (2 L ha^{-1}). En todas las aplicaciones se incluyó el adherente Inex (0.3 L ha^{-1}) para un mejor control de las arvenses. Para los cultivos en rotación, frijol y mucuna, el control de arvenses se realizó manualmente. En las parcelas sin rotación de cultivos no hubo control de arvenses en el OI.

El monitoreo y control de adultos del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) se realizó mediante una trampa de feromona colocada en el pasillo entre los dos bloques, a los pocos días después de la siembra. En caso de que los daños superaran el 15 %, se efectuaron una o dos aplicaciones de Palgus (Spinetoram, 75 mL ha^{-1}), aproximadamente a los 15 y 30 días después de la siembra.

En la cosecha de los cultivos, las actividades de pizca (manual - jornal), desgrane (manual - jornal) y acarreo se llevaron a cabo del 15 al 27 de diciembre para el cultivo de maíz. Para el frijol, las actividades de arranque, vareado y acarreo se realizaron entre el 10 de febrero y el 6 de marzo. Respecto a la mucuna, se realizaron chapeos mecánicos entre el 20 de febrero y el 10 de marzo, dejando la biomasa en la superficie del suelo.

Variables de evaluación y análisis estadístico

Durante los seis años de evaluación, se determinaron los rendimientos de grano de maíz y frijol (Mg ha^{-1}) y las utilidades netas ($\text{\$MXN ha}^{-1}$) de los tratamientos. Para los rendimientos de maíz ajustados al 14 % de humedad, se muestreó un área de 32 m^2 ($3.2 \text{ m} \times 10 \text{ m}$) en cada unidad experimental, correspondiente a los cuatro surcos centrales de los ocho que conforman la unidad experimental. Los costos totales de producción se calcularon a partir de los costos por hectárea de todas las operaciones registradas, considerando los costos de insumos y maquila de la región. Los ingresos brutos se obtuvieron multiplicando los rendimientos (Mg ha^{-1}) por el precio de venta del grano ($\text{\$MXN/t}$). El análisis de rentabilidad de los sistemas de producción se basó en la utilidad neta y la relación Beneficio/Costo (B/C). La utilidad neta se calculó como la diferencia entre los ingresos brutos y los costos de producción de cada tratamiento, mientras que la relación B/C se obtuvo dividiendo los ingresos brutos entre los costos de producción.

Tabla 1. Tratamientos evaluados en la plataforma de investigación San Juan Cotzocón, Oaxaca. (Periodo de evaluación 2014-2019).

Trat.	Abreviaciones	Rotación	Práctica de Labranza	Fertilización maíz	Manejo de rastrojo	Mejorador de suelo
1	M, LC, R, F1	Maíz	Labranza convencional	80-60-00	Remove	-----
2	M, CL, R, F1	Maíz	Cero labranza	80-60-00	Remove	-----
3	M, CL, D, F1	Maíz	Cero labranza	80-60-00	Dejar	-----
4	M, CP, D, F1	Maíz	Camas permanentes angostas	80-60-00	Dejar	-----
5	MMu, CP, D, F1	Maíz-Mucuna	Camas permanentes angostas	80-60-00	Dejar	-----
6*	MF, CP, D, F1	Maíz-Frijol	Camas permanentes angostas	80-60-00	Dejar	-----
7	MMu, CP, D, F2	Maíz-Mucuna	Camas permanentes angostas	146-70-80-10Zn-3.3S-4Mg-1.4B	Dejar	-----
8	MMu, CP, D, F2, + cal	Maíz-Mucuna	Camas permanentes angostas	146-70-80-10Zn-3.3S-4Mg-1B	Dejar	Cal dolomita (PV 2014)

*La fertilización del frijol tiene una dosis de 41-46-00; Abreviaciones: Trat. =Tratamientos, LC= Labranza Convencional, CL= Cero labranza, CP= Camas Permanentes Angostas, F1= 80-60-00, F2= 146-70-80-10Zn-3.3S-4Mg-1B, D= Dejar el rastrojo, R=Remove el rastrojo, M= Maíz (*Zea mays*), F= Frijol (Michigan) y Mu= Mucuna (*Mucuna pruriens*).

Los análisis estadísticos se realizaron en R versión 4.0.2 (R Core Team, 2020). Los efectos de los tratamientos sobre el rendimiento de maíz, la utilidad neta y la relación beneficio/costo fueron analizados mediante Modelos Lineales Mixtos (LMM), técnica comúnmente utilizada para datos longitudinales obtenidos de mediciones repetidas a lo largo del tiempo (Fitzmaurice *et al.*, 2004). Estos modelos fueron implementados con la función *lmer* del paquete *lme4* (Bates *et al.*, 2015). Los efectos fijos considerados fueron "Bloque", "Tratamiento" y "Tiempo", y se centró la media del tiempo (en años) para facilitar la interpretación del intercepto y los efectos de los factores. Se incluyó como efecto aleatorio el "intercepto aleatorio" de las "variedades de maíz" (Pioneer 4082W, H-516 y Pioneer 30F96), que representan una muestra de los materiales genéticos disponibles en la región. El factor genético influye en el rendimiento de grano, y la variedad utilizada cada año puede variar según la disponibilidad, lo que justifica su inclusión como efecto aleatorio. Además, se incorporó el "intercepto aleatorio" de cada unidad experimental (parcela) como efecto aleatorio para capturar la variabilidad entre parcelas, considerando tanto las diferencias no observadas entre ellas como las correlaciones entre las mediciones repetidas dentro de cada parcela.

La selección del modelo se realizó mediante el método de eliminación hacia atrás (*backward elimination*), comenzando con un modelo completo que incluía todos los términos posibles. La retención de los términos se basó en la prueba de razón de verosimilitud y en el Criterio de Información de Akaike (AIC). Primero, se eliminaron de manera secuencial los términos no significativos de efectos aleatorios. Una vez definidos los efectos aleatorios, se eliminaron los términos no significativos de efectos fijos. Las comparaciones de modelos con los mismos efectos fijos, pero diferentes efectos aleatorios se realizaron utilizando el método de Máxima Verosimilitud Restringida (REML), debido a su ventaja en proporcionar estimaciones insesgadas de los componentes de la varianza. Por otro lado, la comparación de modelos con los mismos efectos aleatorios, pero diferentes efectos fijos, se realizó mediante el método de Máxima Verosimilitud (ML) (Bates *et al.*, 2015). Este proceso de selección implicó evaluar cuatro modelos (Tabla S1) cuya clasificación final se realizó con la función *compare_performance* del paquete *performance* (Lüdtke *et al.*, 2021) basándose principalmente en el Criterio de Información de Akaike corregido (AICc) y los pesos de Akaike. La evaluación de la bondad de ajuste de los modelos consideró también el coeficiente de determinación condicional (R^2 cond), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación intraclase (CCI).

Los supuestos estadísticos de normalidad, homocedasticidad e independencia de residuos se verificaron mediante el análisis visual de los gráficos de residuos. Además, se aplicaron las pruebas de Shapiro-Wilk (1965) para normalidad y Levene (1960) para homocedasticidad. La inspección visual de los gráficos y los resultados de las pruebas indicaron el cumplimiento de los supuestos de homocedasticidad e independencia. Aunque no se cumplió el supuesto de normalidad, los LMM son robustos a ligeros desvíos de este supuesto, lo que permite obtener estimaciones no sesgadas (Schielzeth *et al.*, 2020). Por esta razón, se estimaron intervalos de confianza para los parámetros mediante el método de Bootstrap paramétrico ($B = 1000$ réplicas) usando la función *bootstrap* del paquete *lmeresampler* (Loy *et al.*, 2023). Estos intervalos también permiten estimar con precisión la variabilidad de los parámetros, lo que contribuye a controlar el error tipo II (falsos negativos) y aumentar el poder estadístico que puede verse afectado por el reducido número de bloques en el diseño experimental. Las comparaciones de medias entre pares se realizaron con la función *diffsmeans* del paquete *lmerTest* (Kuznetsova *et al.*, 2017). Finalmente, se generaron gráficos de radar para visualizar el desempeño de cada sistema propuesto (T2 a T8) en comparación con el sistema convencional (T1), utilizando la función *radarchart* del paquete *fmsb* (Nakazawa, 2023).

RESULTADOS

Rendimiento de granos de maíz

Los sistemas de producción basados en la agricultura de conservación mantuvieron los rendimientos de maíz a mediano plazo, con rendimientos similares al del sistema convencional ($P > 0.05$; Figura 4). En 2014, año de establecimiento del experimento, los tratamientos con labranza de conservación presentaron rendimientos similares a los de la labranza convencional (M, LC, R, F1) (Figura 3). En el segundo año (2015), se observó una reducción de rendimiento en todos los tratamientos, a excepción del que tuvo la fertilización F2 y aplicación de cal dolomita (MMu, CP, D, F2, +cal) que presentó una mejora de rendimiento. Esto podría atribuirse a que la dosis de cal dolomita (2 Mg ha^{-1}), aplicada en el primer año, logró corregir la acidez del suelo ($\text{pH} = 5.13$), permitiendo que los nutrientes estuvieran disponibles para las plantas. De 2016 a 2019 se observó una oscilación de los rendimientos con un mejor desempeño de los tratamientos con camas permanentes angostas con retención de rastrojo.

El modelo lineal mixto más parsimonioso (M4; Tabla S1), constituido por los factores de efectos fijos *tratamiento*, *bloque* y *tiempo* (sin términos interacción), y un intercepto aleatorio para el factor *variedad de maíz*, fue el seleccionado debido a que

presentó los valores más bajos de AICc tanto para el rendimiento de maíz, como para la utilidad neta y la relación B/C (Tabla S1). Ese modelo indica que los sistemas de producción basados en AC no tuvieron un efecto significativo en el rendimiento del maíz (p -valor > 0.05) en comparación con el sistema convencional (T1, en el intercepto). Los coeficientes positivos asociados con los sistemas T4 (M, CP, D, F1), T5 (MMu, CP, D, F1), T6 (MF, CP, D, F1) y T8 (MMu,

CP, D, F2, + cal) sugieren que estos podrían tener un impacto positivo en el rendimiento del maíz. En contraste, los sistemas de cero labranza T2 (M, CL, R, F1) y T3 (M, CL, D, F1) y el sistema T7 (MMu, CP, D, F2) tienden a ser menos productivos que el sistema convencional. Además, se observó que el 71% de la variación en el rendimiento del maíz se atribuye a las diferencias entre las variedades cultivadas.

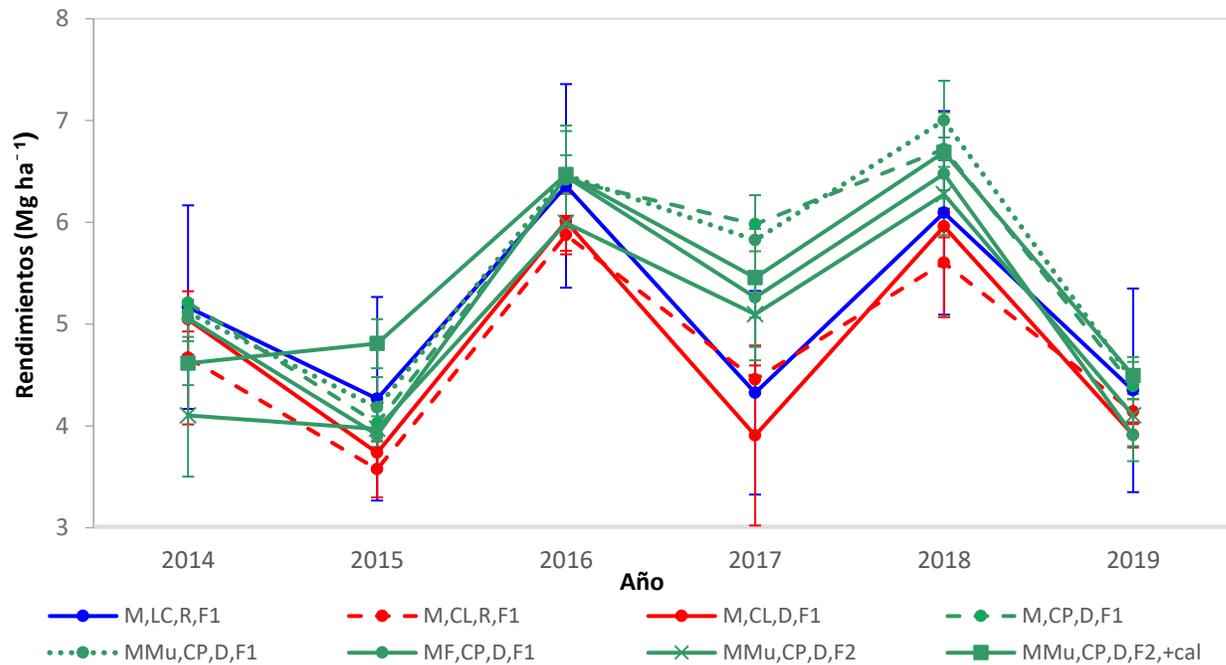


Figura 3. Rendimiento de grano de maíz (Media \pm Error estándar de la media) por tratamiento de 2014 a 2019.

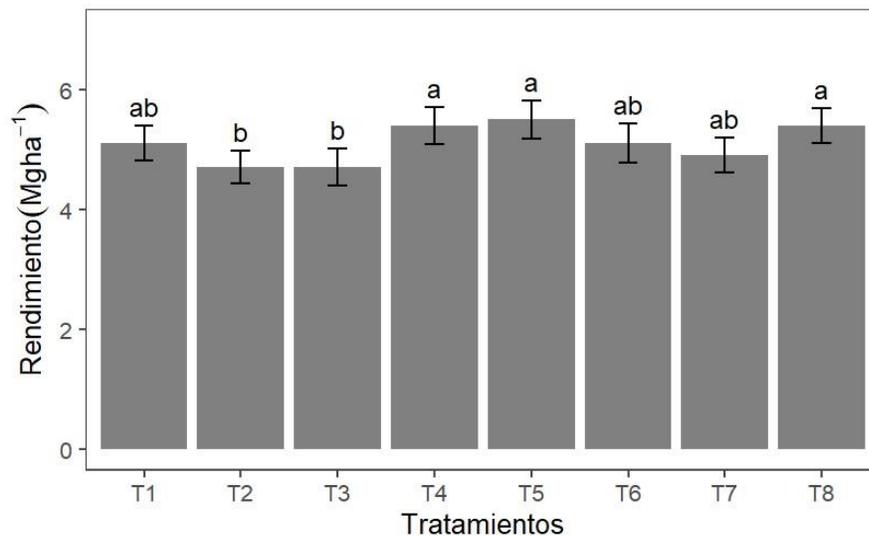


Figura 4. Rendimientos promedio de granos de maíz (Media \pm Error estándar de la media) de 2014 a 2019. Letras diferentes indican diferencia significativa basada en diferencias de medias de mínimos cuadrados ($P < 0.05$). T1 = M, LC, R, F1; T2 = M, CL, R, F1; T3 = M, CL, D, F1; T4 = M, CP, D, F1; T5 = MMu, CP, D, F1; T6 = MF, CP, D, F1; T7 = MMu, CP, D, F2 y T8 = MMu, CP, D, F2, + cal.

Tabla 2. Estimaciones de parámetros del modelo lineal de efecto mixto ajustado para rendimiento de maíz.

Rendimiento ~ Tratamiento + Bloque + Tiempo + (1 Variedad)								
Variable	Coef.	EE	t	P-valor	LI	LS	VAR.	DE
Efectos fijos								
Intercepto	4.5	0.65	6.91	0.01 *	3.19	5.79		
T2 (M, CL, R, F1)	-0.37	0.28	-1.34	0.18	-0.92	0.17		
T3 (M, CL, D, F1)	-0.33	0.28	-1.18	0.24	-0.89	0.24		
T4 (M, CP, D, F1)	0.36	0.28	1.30	0.19	-0.19	0.92		
T5 (MMu, CP, D, F1)	0.41	0.28	1.47	0.14	-0.16	0.96		
T6 (MF, CP, D, F1)	0.08	0.28	0.29	0.76	-0.50	0.62		
T7 (MMu, CP, D, F2)	-0.17	0.28	-0.61	0.55	-0.71	0.38		
T8 (MMu, CP, D, F2, + cal)	0.33	0.28	1.17	0.24	-0.23	0.88		
Bloque 2	-0.03	0.14	-0.19	0.85	-0.31	0.25		
Tiempo	0.26	0.06	4.59	1.48e-05 ***	0.15	0.38		
Efectos aleatorios								
Variedad							1.15	1.07
Residuos							0.47	0.68
Bondad de ajuste								
AICc				229.6				
R ² cond (%)				75.4				
RMSE (%)				12.56				
CCI				0.71				

*** p<0.001; ** p<0.01; * p<0.05; Coef. = coeficiente; EE = Error estándar; LI & LS = Límites inferiores y superiores del intervalo de confianza obtenido por Bootstrap; VAR. = Varianza; DE = Desviación estándar.

Los rendimientos promedios de maíz en el periodo de evaluación fueron 5.1 Mg ha⁻¹ para el sistema convencional (M, LC, R, F1), 4.7 Mg ha⁻¹ para M, CL, R, F1 y M, CL, D, F1, 5.4 Mg ha⁻¹ para M, CP, D, F1 y MMu, CP, D, F2, + cal, 5.5 Mg ha⁻¹ para MMu, CP, D, F1, 5.2 Mg ha⁻¹ para MF, CP, D, F1 y 4.9 Mg ha⁻¹ para MMu, CP, D, F2. Las comparaciones múltiples indican que los sistemas M, CP, D, F1, MMu, CP, D, F1 y MMu, CP, D, F2, +cal son más productivos que los sistemas con cero labranza (M, CL, R, F1 y M, CL, D, F1) y todos los sistemas exhibieron rendimientos similares al del sistema convencional (Figura 4).

Rentabilidad

El modelo lineal mixto seleccionado (M4; Tabla S1) indica que los sistemas evaluados tuvieron diferencias significativas en términos de utilidad neta ($P=1.9e-07$; Tablas 3 y 5, Figura S2-A) y relaciones B/C ($P=7.3e-06$; Tablas 4 y 5, Figura S2-B). El sistema convencional (M, LC, R, F1) requirió una inversión promedio de \$14,478.00 MXN ha⁻¹ para su implementación y generó una utilidad neta promedio de \$7,721.00 MXN ha⁻¹. El tratamiento T6 (MF, CP, D, F1) presentó una utilidad neta promedio de \$8,795.00 MXN ha⁻¹ mayor que la del sistema convencional (Tabla 3), diferencia que puede oscilar entre \$4,545.00 y \$13,020.00 MXN ha⁻¹, manteniendo una relación B/C similar al del sistema convencional (Tabla 4). Esto sugiere que el sistema T6 es tan

eficiente que el sistema convencional, pero más rentable.

El tratamiento T7 (MMu, CP, D, F2) presentó una utilidad neta \$5,783.00 MXN ha⁻¹ menor que la del sistema convencional y esta reducción puede variar entre \$1,651.00 y \$9,918.00 MXN ha⁻¹. La relación B/C de este tratamiento fue también inferior a la de la labranza convencional en 50 centavos, pudiendo esa diferencia variar entre 20 y 76 centavos. Esto indica que el tratamiento T7 es menos eficiente y rentable que el sistema convencional. El tratamiento T8 (MMu, CP, D, F2, + cal) que solo difiere de T7 por la aplicación de la cal, tuvo un desempeño similar. Los demás tratamientos (T2, T3, T4, T5) presentaron utilidades netas y relaciones B/C similares entre sí (Tabla 5) y comparables a las del sistema convencional (T1), lo que indica que fueron tan rentables y eficientes como este.

La sustitución de la labranza convencional por labranza cero en el sistema convencional, ya sea con o sin rastrojo (M, CL, R, F1; M, CL, D, F1), resultó en una reducción del 9 % en los costos de producción (Tabla 5); sin embargo, esta reducción también implicó una ligera disminución en los rendimientos de maíz, resultando en utilidades netas y relaciones B/C similares a las del sistema convencional.

La rotación con frijol demostró ser crucial para la rentabilidad de estos sistemas. La rotación maíz-frijol (MF, CP, D, F1) incrementó los costos de producción en un 64 % con respecto al sistema convencional y un 72 % frente a su equivalente sin rotación (M, CP, D, F1); sin embargo, este aumento se compensó con un significativo incremento en los ingresos, gracias a la producción promedio de 1.3 Mg ha⁻¹ de frijol, resultando en un aumento de 114 % en las utilidades netas comparado con el sistema convencional y del 68 % con respecto a M, CP, D, F1. La ganancia fue de 70 centavos por peso invertido, similar a la del sistema convencional (Tablas 4 y 5). En cambio, la rotación con mucuna (MMu, CP, D, F1) incrementó los costos de producción en un 15 % con respecto al sistema convencional, manteniendo un rendimiento de maíz similar y resultando en una utilidad neta y relación B/C comparables al sistema convencional (Tablas 3, 4 y 5), con una utilidad neta de \$7,306.00 MXN ha⁻¹ y una ganancia de 44 centavos por peso invertido. El nitrógeno, la materia orgánica y la mejora de la estructura del suelo aportados por la mucuna no se reflejaron en el rendimiento del maíz durante esta evaluación a mediano plazo. Sin embargo, es posible que estos beneficios, así como su impacto en el rendimiento del maíz, se manifiesten a largo plazo. La inclusión de la mucuna como forraje podría mejorar la rentabilidad de los sistemas que integran este cultivo. Lo anterior sugiere entonces que, para mejorar la rentabilidad en el corto y mediano plazo en la región, resulta más efectivo adoptar la rotación con frijol.

La fertilización F2 no incrementó el rendimiento de maíz (Tabla 2 y Figura 4), y, por ende, no mejoró la rentabilidad de los sistemas. El tratamiento 7 (MMu, CP, D, F2) mostró un incremento del 18 % en los costos de producción, comparado con su equivalente con fertilización F1 (Tabla 5), sin un aumento en el rendimiento de maíz (Figura 4). Esto resultó en utilidades netas y relaciones B/C significativamente menores que las del sistema convencional (Tablas 3, 4 y 5), especialmente en 2014, cuando la relación B/C fue inferior a uno (Figura 5). El uso de cal (T8: MMu, CP, D, F2, + cal) mejoró ligeramente el rendimiento del sistema, pero no compensó el incremento de costos. Este sistema presentó una relación beneficio/costo (B/C) 37 centavos/peso invertido inferior a la del sistema convencional, y dicha reducción podría llegar hasta 64 centavos/peso invertido (Tabla 4).

Los valores del CCI indican que solo el 20 % de la variabilidad en las utilidades netas y la relación B/C se atribuye a las diferencias entre las variedades de maíz utilizadas (Tablas 3 y 4, Figuras S2-C y S2-D). Esto sugiere que, aunque una parte significativa de la variabilidad en el rendimiento del maíz se debe a las diferencias entre las variedades (Tabla 2, CCI = 71%), estas no tienen el mismo impacto en la rentabilidad de los sistemas de producción, la cual también depende de los costos de producción y del precio de venta del maíz.

Tabla 3. Estimaciones de parámetros del modelo lineal de efecto mixto ajustado para utilidad neta.

Utilidad neta ~ Tratamiento + Bloque + Tiempo + (1 Variedad)								
Variable	Coef.	EE	t	P-valor	LI	LS	VAR.	DE
Efectos fijos								
Intercepto	6869	2166	3.17	0.02 *	2389	11334		
T2 (M, CL, R, F1)	-327	2082	-0.16	0.88	-4461	3883		
T3 (M, CL, D, F1)	-215	2082	-0.10	0.92	-4390	3949		
T4 (M, CP, D, F1)	2128	2082	1.02	0.31	-1897	6107		
T5 (MMu, CP, D, F1)	-415	2082	-0.19	0.84	-4713	3778		
T6 (MF, CP, D, F1)	8795	2082	4.22		4545	13020		
				0.000***				
T7 (MMu, CP, D, F2)	-5783	2082	-2.78	0.01**	-9918	-1651		
T8 (MMu, CP, D, F2, + cal)	-3765	2082	-1.81	0.07	-7798	310		
Bloque 2	-852	1041	-0.82	0.42	-2910	1253		
Tiempo	332	394	0.84	0.40	-471	1163		
Efectos aleatorios								
Variedad							6371467	2524
Residuos							26019308	5101
Bondad de ajuste								
AICc								1934.8
R ² cond (%)								47.2
RMSE (%)								61.5
CCI								0.20

*** p<0.001; ** p<0.01; * p<0.05; Coef. = coeficiente; EE = Error estándar; LI & LS = Límites inferiores y superiores del intervalo de confianza obtenido por Bootstrap; VAR. = Varianza; DE = Desviación estándar.

Tabla 4. Estimaciones de parámetros del modelo lineal de efecto mixto ajustado para relación Beneficio/Costo.

B/C ~ Tratamiento + Bloque + Tiempo + (1 Variedad)								
Variable	Coef.	EE	t	P-valor	LI	LS	VAR.	DE
Efectos fijos								
Intercepto	1.49	0.15	10.01	2.58e-05 ***	1.20	1.78		
T2 (M, CL, R, F1)	-0.01	0.14	-0.06	0.95	-0.28	0.28		
T3 (M, CL, D, F1)	0.01	0.14	0.04	0.97	-0.27	0.30		
T4 (M, CP, D, F1)	0.14	0.14	0.99	0.32	-0.12	0.42		
T5 (MMu, CP, D, F1)	-0.14	0.14	-0.99	0.32	-0.40	0.14		
T6 (MF, CP, D, F1)	0.12	0.14	0.83	0.41	-0.16	0.42		
T7 (MMu, CP, D, F2)	-0.49	0.14	-3.44	9.11e-04 ***	-0.76	-0.20		
T8 (MMu, CP, D, F2, + cal)	-0.37	0.14	-2.64	9.97e-03 **	-0.64	-0.09		
Bloque 2	0.01	0.07	0.07	0.94	-0.13	0.15		
Tiempo	-0.02	0.03	-0.88	0.39	-0.08	0.03		
Efectos aleatorios								
Variedad							0.03	0.18
Residuos							0.12	0.35
Bondad de ajuste								
AICc				92.1				
R ² cond (%)				39.5				
RMSE (%)				21.8				
CCI				0.21				

*** p<0.001; ** p<0.01; * p<0.05; Coef.: coeficiente; EE = Error estándar; LI & LS = Límites inferiores y superiores del intervalo de confianza obtenido por Bootstrap; VAR. = Varianza; DE = Desviación estándar.

Tabla 5. Costos de producción, ingresos totales, utilidades netas y relación Beneficio/Costo promedios por tratamiento de 2014 a 2019.

Tratamientos	Costo total (\$MXN ha ⁻¹)	Ingreso total (\$MXN ha ⁻¹)	Utilidad neta (\$MXN ha ⁻¹)	B/C
M, LC, R, F1	\$14,478	\$22,199	\$7,721 ^{bc}	1.58 ^a
M, CL, R, F1	\$13,212	\$20,606	\$7,394 ^{bc}	1.58 ^a
M, CL, D, F1	\$13,212	\$20,718	\$7,507 ^{bc}	1.59 ^a
M, CP, D, F1	\$13,837	\$23,685	\$9,849 ^b	1.72 ^a
MMu, CP, D, F1	\$16,587	\$23,893	\$7,306 ^{bc}	1.44 ^{ab}
MF, CP, D, F1	\$23,787	\$40,303	\$16,517 ^a	1.70 ^a
MMu, CP, D, F2	\$19,502	\$21,440	\$1,938 ^d	1.10 ^c
MMu, CP, D, F2, + cal	\$19,615	\$23,572	\$3,956 ^{cd}	1.21 ^{bc}

Letras diferentes indican diferencia significativa basada en diferencias de medias de mínimos cuadrados ($P < 0.05$).

Los gráficos de radar (Figura 6) proporcionan una visualización comparativa del desempeño de los sistemas evaluados, utilizando el sistema convencional (M, LC, R, F1, área gris) como referencia. Los sistemas MMu, CP, D, F1, MF, CP, D, F1, MMu, CP, D, F2 y MMu, CP, D, F2, + cal presentan un costo de producción más alto, debido a la rotación de cultivos y la fertilización F2. En cambio, el sistema M, CP, D, F1 tiene un costo de producción comparable al del sistema convencional y los sistemas M, CL, R, F1 y M, CL, D, F1 muestran un costo de producción menor, gracias a la eliminación de la labranza.

En términos de rendimiento de maíz, aunque no hubo diferencia significativa, los sistemas M, CP, D, F1,

MMu, CP, D, F1 y MMu, CP, D, F2, + cal tienden a ser más productivos que el sistema convencional y los sistemas M, CL, R, F1, M, CL, D, F1 y MMu, CP, D, F2 a ser menos productivos. Esto se traduce en mayores ingresos totales para los tratamientos M, CP, D, F1, MMu, CP, D, F1 y MMu, CP, D, F2, + cal. Por otra parte, el tratamiento MF, CP, D, F1 tuvo ingresos significativamente mayores por el ingreso adicional promedio de \$17,857.00 MXN ha⁻¹ por la venta de frijol producido en el ciclo OI. Este sistema supera al convencional, ya que presentó una relación B/C similar, lo que indica una eficiencia comparable, y fue más rentable debido a su mayor utilidad neta. También se destaca el sistema M, CP, D, F1 que, con un costo de producción similar al del sistema convencional,

tiende a ser más productivo y rentable. Aunque el sistema MMu, CP, D, F1 mostró mayores ingresos totales por maíz, no mejoró su rentabilidad en comparación con el sistema convencional debido a los costos adicionales de establecimiento de mucuna. Los tratamientos con fertilización F2 (MMu, CP, D, F2 y MMu, CP, D, F2, + cal) aumentaron los costos de producción sin lograr un incremento proporcional en

los rendimientos de maíz, lo que resultó en una reducción significativa de su rentabilidad. En resumen, a mediano plazo, el sistema MF, CP, D, F1 representa la opción más favorable para los agricultores que pueden cultivar en ambos ciclos (primavera-verano y otoño-invierno), mientras que el sistema M, CP, D, F1 resulta adecuado para aquellos que solo cultivan durante el ciclo primavera-verano.

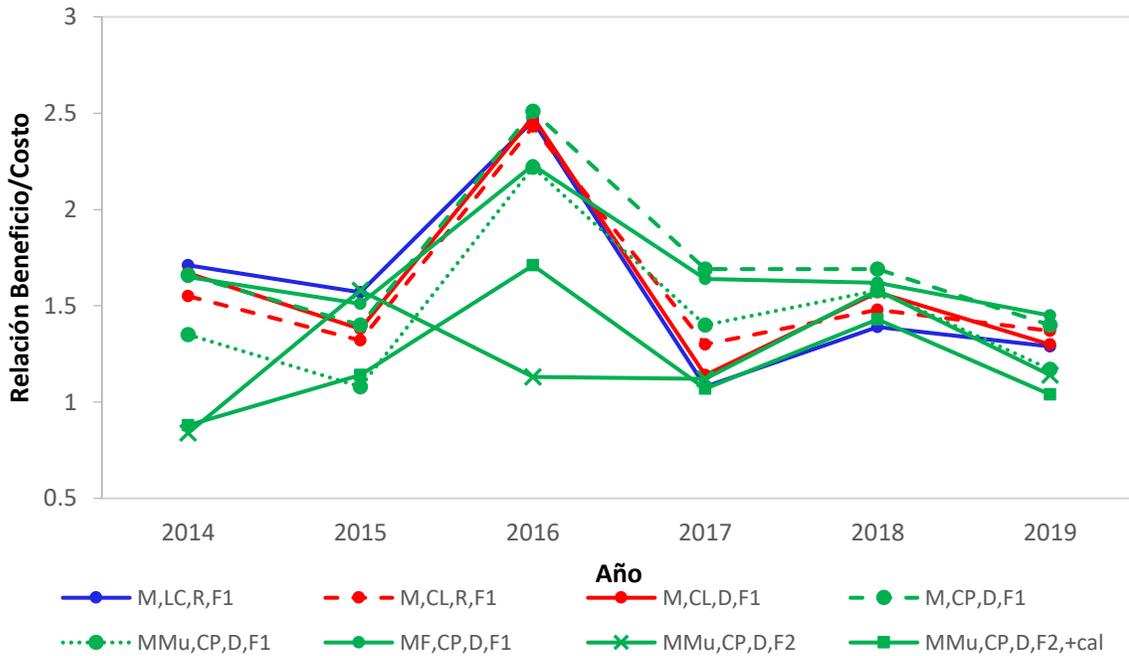


Figura 5. Evolución de la relación Beneficio/Costo por tratamiento de 2014 a 2019.

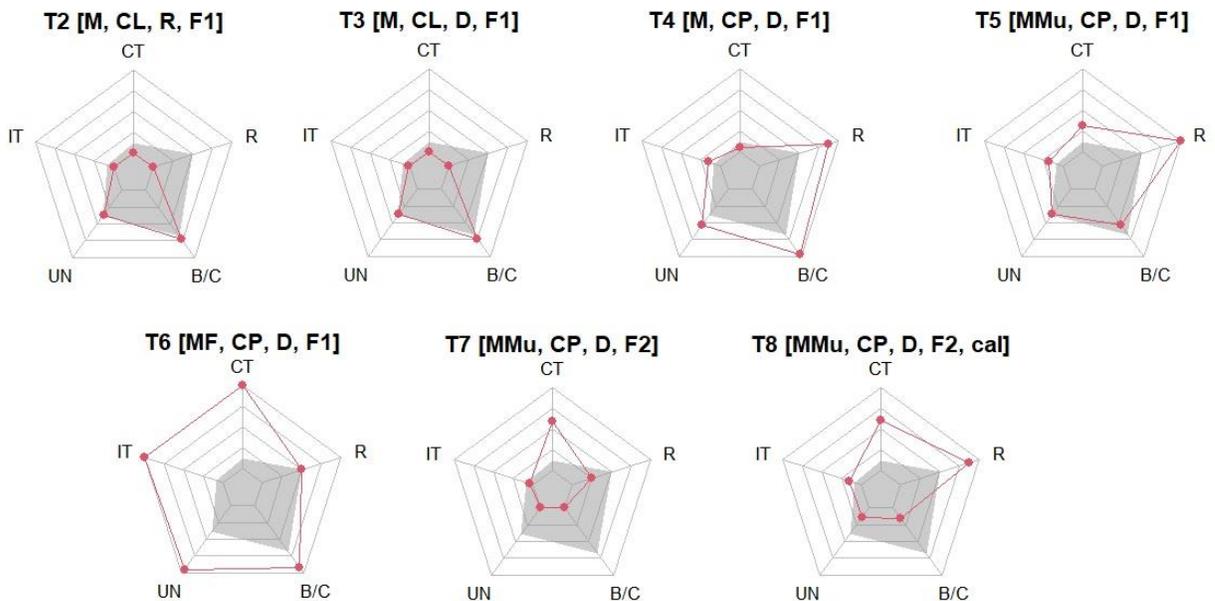


Figura 6. Gráfico de radar que indica los valores promedio de las variables para cada tratamiento. Los límites del área sombreada en gris representan los valores promedio del sistema convencional (M, LC, R, F1) de 2014-2019. CT: costo de producción total promedio, IT: ingreso total promedio, UN: utilidades netas promedio, R: rendimiento promedio de maíz, B/C: relación Beneficio/Costo.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio han identificado la variante de agricultura de conservación (AC) más viable para una producción agrícola sustentable en el trópico húmedo del Papaloapan. A diferencia de lo observado en climas semiáridos mexicanos, donde los rendimientos de cero labranza en plano suelen ser superiores a los de la labranza convencional (Govaerts *et al.*, 2005), en este estudio los rendimientos con cero labranza fueron similares a los de la labranza convencional. Este resultado coincide con los de Sun *et al.* (2020), quienes también encontraron que la cero labranza no mejora los rendimientos en climas húmedos con índices de humedad de Lang (IH) entre 40 y 100 (IH en condiciones locales ~ 78.56). No obstante, la evidencia acerca del efecto de la cero labranza en los rendimientos no está clara (Toliver *et al.*, 2012).

Investigaciones recientes sugieren que el tipo de suelo y el clima son determinantes cruciales para el éxito de la cero labranza (Soane *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2020). Esta práctica puede ser menos efectiva y afectar el rendimiento en condiciones climáticas más húmedas (Ogle *et al.*, 2012). Estudios de Chen *et al.* (2011) y Fonteyne *et al.* (2022) confirman que la cero labranza ofrece rendimientos inferiores a la labranza convencional en climas tropicales húmedos. Pittelkow *et al.* (2015) atribuyen esto a la inundación o compactación de los suelos, que pueden afectar el crecimiento de las raíces y alterar la fertilidad del suelo, provocando deficiencias nutricionales en los cultivos. Hunt *et al.* (2020) también indican que el impacto de la cero labranza puede ser negativo en las regiones húmedas. Las pérdidas de rendimiento de este tipo de labranza pueden ser tolerables si son mínimas y los costos de producción suficientemente menores que los de la labranza convencional (Soane *et al.*, 2012).

En climas semiáridos, los rendimientos en la cero labranza se ven mejorados por la retención de residuos (Govaerts *et al.*, 2005), como resultado de la reducción de la evaporación, la mejora de la estructura del suelo, reducción de la erosión por el aumento de la formación de agregados y protección contra el impacto de las gotas de lluvia (Verhulst *et al.*, 2012). En climas húmedos, también es recomendado retener residuos en cero labranza para no afectar el rendimiento de maíz (Pittelkow *et al.*, 2015). Sin embargo, nuestros resultados al término de 6 años de experimentación indicaron que no hay diferencia entre los rendimientos de maíz de los tratamientos de cero labranza con o sin retención de residuos, sugiriendo que retener residuos no mejora el rendimiento de maíz en el trópico húmedo a mediano plazo. Además, retener residuos en cero labranza en regiones húmedas puede ser contraproducente por problema de exceso de humedad,

que puede reducir la germinación y el rendimiento de los cultivos (Drury *et al.* (2017). La práctica de cero labranza también parece ser más propensa a la proliferación de malezas. La presión de estas y la consiguiente reducción potencial de rendimiento, tienden a ser más altas con la cero labranza en comparación con la labranza mínima o convencional (Fonteyne *et al.*, 2022). La combinación de cero labranza con rotación de cultivos y retención de residuos podría mejorar el control de malezas (Nichols *et al.*, 2015; Fonteyne *et al.*, 2020). En el trópico húmedo, combinar la cero labranza con la rotación de cultivos ha demostrado mejorar significativamente la productividad de los sistemas de producción (Van den Putte *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2020). Es necesario evaluar estos efectos en la región del Papaloapan.

Los mejores rendimientos de maíz se lograron con camas permanentes angostas y retención de residuos (rastrojo), con un incremento de hasta un 17 % en comparación con la cero labranza. Esto se debe a que las camas permanentes reducen la erosión, actuando como barrera protectora contra la pérdida de suelo por el impacto de la lluvia y la escorrentía, además de facilitar el drenaje del exceso de agua, lo cual es crucial en regiones con alta precipitación (Araya *et al.*, 2011). Las camas permanentes también mejoran la estructura del suelo al limitar su compactación a fondos de surcos (Govaerts *et al.*, 2007), mejorando la aireación del suelo y penetración de raíces. Constituyen una opción viable para condiciones cálidas y húmedas, adecuadas para la producción de maíz (Rojas y Mota, 2002) que están presentes en el 7 % de la superficie total de México (SEMARNAT, 2023). Independientemente de su ancho (Saldivia-Tejeda *et al.*, 2021) y nivel de retención de residuos (Govaerts *et al.*, 2007), también son factibles en las zonas secas de México en las cuales contribuyen a mejorar el rendimiento de los cultivos (Govaerts *et al.*, 2005; Naresh *et al.*, 2012; Fonteyne *et al.*, 2019).

La rentabilidad de los sistemas agrícolas depende de los rendimientos de los cultivos, que a su vez determinan los ingresos y costos totales de producción. Los costos suelen ser menores en los sistemas de AC, debido a la reducción de los costos de mano de obra y combustible asociados con el uso de maquinaria (Speratti *et al.*, 2015). Es el caso de los tratamientos M, CL, R, F1, M, CL, D, F1 y M, CP, D, F1 que tuvieron menores costos de producción, con respecto al sistema convencional, coincidiendo con los hallazgos de Sayre y Govaerts (2012) y Romero *et al.* (2014) en otras regiones de México. Sin embargo, al incluir la rotación con mucuna en el ciclo OI (MMu, CP, D, F1), se incrementaron los costos de producción en un 20 %, sin mejorar los ingresos, afectando negativamente la rentabilidad del sistema.

La rotación de maíz con frijol en camas permanentes (MF, CP, D, F1) resultó ser el sistema más rentable debido a una mayor utilidad neta, coincidiendo con los resultados de Canalli *et al.* (2020), quienes también tuvieron la mayor rentabilidad con la rotación maíz-frijol. A pesar de la mayor utilidad neta del sistema T6 (MF, CP, D, F1), su eficiencia (relación B/C) fue similar a la del sistema convencional, lo que se explica por el mayor costo de producción asociado a este sistema. Aunque la adopción de este sistema implique una mayor inversión, es importante destacar que no todos los costos se generan durante el periodo de producción de maíz (primavera-verano). Los costos de producción del frijol, estimados en \$9,950.00 MXN/ha, representan el 42% del costo de producción del sistema. Estos costos deben ser cubiertos al inicio del ciclo otoño-invierno y pueden ser solventados con la venta de la cosecha de maíz. El rendimiento y la rentabilidad del sistema M, CP, D, F1 son comparables a los del sistema convencional (Figura 4 y Tabla 5). Los coeficientes positivos asociados a este sistema (Tablas 2, 3 y 4) sugieren una tendencia a mejorar el rendimiento del maíz, la utilidad neta y la eficiencia financiera en comparación con el sistema convencional. Además, dado que los efectos de las prácticas de labranza de conservación, como las camas permanentes con residuos, son acumulativos, este sistema se presenta como una opción viable para lograr una producción sostenible a largo plazo.

El incremento de ingresos generado por el tratamiento MMu, CP, D, F2, + cal no fue suficiente para compensar el alto costo de producción asociado con la fertilización F2 y la cal dolomita. La fertilización F2 no mostró mejoras significativas en comparación con F1, a pesar de basarse en un análisis de suelo. La alta variabilidad en las características del suelo y la absorción de nutrientes por los cultivos, junto con la variabilidad en el muestreo y análisis de laboratorio, pueden afectar la precisión de las recomendaciones de fertilización basadas en una única muestra compuesta de suelo (Schut & Giller, 2020). A pesar de estas limitaciones, las estrategias de fertilización basadas en análisis de suelo y los principios de las "4R" (Johnston y Bruulsema, 2014) han demostrado buenos resultados y deben evaluarse para determinar la forma óptima de fertilizar el maíz y mejorar el rendimiento y la rentabilidad de los sistemas productivos de la región del Papaloapan.

A largo plazo, este análisis de rentabilidad puede ser sensible a las variaciones en los costos de los insumos y las actividades agrícolas, así como a los precios de la producción. En este caso, un incremento en los costos de producción sin el ajuste proporcional en los precios de la producción podría tener un impacto negativo en la rentabilidad. Además, factores externos tales como la volatilidad de los precios y el cambio climático generan incertidumbre, lo que resalta la importancia de

contar con sistemas agrícolas resilientes. La agricultura de conservación ha demostrado ser eficaz en proporcionar esta resiliencia a los sistemas de producción (Choudhary *et al.*, 2016; Ngoma *et al.*, 2021). En el contexto mexicano, la salud del suelo, la diversificación de cultivos, las oportunidades de mercado y la variabilidad de las precipitaciones y las temperaturas son factores determinantes en la estabilidad de la rentabilidad de los cultivos (Van Dusen y Taylor, 2005; LaFevor, 2022). Los hallazgos de este estudio sugieren que, a mediano plazo, en la región del Papaloapan, el sistema de producción de maíz en rotación con frijol (fijación de nitrógeno y menor riesgo por diversificación de la producción), cultivados en camas permanentes con rastrojo y fertilización moderada (mejora de la salud del suelo), es tan productivo, eficiente y más rentable que el sistema convencional y tiene el potencial de mantener esa rentabilidad a largo plazo.

CONCLUSIONES

La agricultura de conservación en su variante de maíz en camas permanentes angostas con retención de residuos, fertilización moderada y rotación con frijol es una opción viable para la producción agrícola sustentable en la región del Papaloapan. Este sistema alcanzó rendimientos de 5.2 Mg ha⁻¹ de maíz en primavera-verano, similar al sistema convencional, 1.3 Mg ha⁻¹ de frijol en otoño-invierno y generó una utilidad neta de \$16,517.00 MXN ha⁻¹, con una ganancia de 70 centavos por peso invertido.

El sistema de maíz en camas permanentes angostas con retención de residuos y fertilización moderada (M, CP, D, F1), que tuvo un rendimiento de maíz de 5.4 Mg ha⁻¹, una utilidad neta de \$9,849 MXN ha⁻¹ y una ganancia de 72 centavos por peso invertido, es buena alternativa para los agricultores que solo cultivan en primavera-verano.

Los sistemas de maíz en cero labranza, con o sin retención de residuos y fertilización moderada (M, CL, R, F1; M, CL, D, F1), lograron un rendimiento de maíz de 4.7 Mg ha⁻¹, una utilidad neta de \$7,450.00 MXN ha⁻¹ y una ganancia de 59 centavos por peso invertido, resultados que son similares a los del sistema convencional de la región del Papaloapan.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a los investigadores, asesores agrícolas, agricultores y otros colaboradores que participaron en este estudio.

Funding. The experiment was conducted as part of the "MasAgro Productor" project, made possible with support from SAGARPA/SADER, Mexico. Data analysis and writing were supported by AgriLAC Resiliente, a CGIAR initiative. The authors would like

to thank all donors who supported this research through their contributions to the CGIAR Trust Fund. The authors' opinions, findings, conclusions and recommendations are their own. They do not necessarily reflect the views of the donors.

Conflict of interest. The authors declare that the research was conducted without any commercial or financial relationship that could be perceived as a potential conflict of interest.

Compliance with ethical standards. The authors declare that the experiments were conducted in accordance with the laws of the country.

Data availability: Data are freely available at: <https://hdl.handle.net/11529/10548976>.

Author contribution statement (CRediT). **J. Villa-Alcántara and O. Núñez-Peñaloza** – Conceptualization, investigation, data curation, **O.G.M. Guera** – Formal analysis, writing – original draft, **S. Fonteyne and N. Verhulst** – Project administration, funding acquisition, methodology, supervision, writing – review & editing.

REFERENCES

- Araya, T., Cornelis, W.M., Nyssen, J., Govaerts, B., Bauer, H., Gebregziabher, T., Oicha, T., Raes, D., Sayre, K.D., Haile, M. and Deckers, J., 2011. Effects of conservation agriculture on runoff, soil loss and crop yield under rain fed conditions in Tigray, Northern Ethiopia. *Soil Use and Management*, 27, pp. 404-414. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00347.x>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. and Walker, S., 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, pp. 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Canalli, L.B.S., Costa, G. V., Volsi, B., Leocádio, A.L.M., Neves, C.S.V.J. and Telles, T.S., 2020. Production and profitability of crop rotation systems in southern Brazil. *Ciências Agrárias*, 41, pp. 2541-2554. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2020v41n6p2541>
- Chen, Y., Liu, S., Li, H., Li, X.F., Song, C.Y., Cruse, R.M. and Zhang, X.Y., 2011. Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 115–116, pp. 56–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2011.06.007>
- Choudhary, M., Ghasal, P.C., Kumar, S., Yadav, R.P., Singh, S., Meena, V.S. and Kumar, B.J., 2016. Conservation Agriculture and Climate Change: An Overview. In: Bisht, J., Meena, V., Mishra, P., Pattanayak, A. (eds) *Conservation Agriculture*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2558-7_1
- Drury, C., Liebig, M., Angers, D., Cavigelli, M., Dechow, R. et al., 2017. How conservation agriculture can mitigate greenhouse gas emissions and enhance soil carbon storage in croplands. Global Research Alliance. <https://globalresearchalliance.org/wp-content/uploads/2018/02/Conservation-Agriculture-Network-Brochure-Aug-2017.pdf>. Acceso 20 jul. 2023.
- Emrah, E.H., Havlicek, E., Dazzi, C., Montanarella, L., Van, L.M., Vrščaj, B., Krasilnikov, P., Khasankhanova, G. and Vargas, R., 2021. Soil conservation and sustainable development goals (SDGs) achievement in Europe and central Asia: Which role for the European soil partnership? *International Soil and Water Conservation Research*, 9, pp. 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.02.003>
- Enesi, R.O., Dyck, M., Chang, S., Thilakarathna, M.S., Fan, X., Strelkov, S. and Gorim, L.Y., 2023. Liming remediates soil acidity and improves crop yield and profitability - a meta-analysis. *Frontiers in Agronomy*, 5, pp. 1-13. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1194896>
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations., 2015. Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. <http://www.fao.org/soils-2015/news/news?detail/es/c/277721/>. Acceso 20 sep. 2023.
- Fitzmaurice, G.M., Laird, N.M. and Ware, J.H. *Applied longitudinal analysis*. John Wiley & Sons: New York, 2004.
- Fonteyne, S., Burgueño, J., Albarrán, C.B.A., Andrio, E.E., Castillo, V.L., Enyanche, V.F. et al., 2021. Effects of conservation agriculture on physicochemical soil health in 20 maize-based trials in different agro-ecological regions across Mexico. *Land Degradation & Development*, 32, pp. 2242-2256. <https://doi.org/10.1002/ldr.3894>

- Fonteyne, S., Leal González A.J., Osorio Alcalá L., Villa Alcántara J., Santos Rodriguez C., Núñez Penaloza O. et al., 2022. Weed management and tillage effect on rainfed maize production in three agro-ecologies in Mexico. *Weed Research*, 62, pp. 224–239. <https://doi.org/10.1111/wre.12530>
- Fonteyne, S., Martinez, G.M.A., Saldivia, T.A. and Verhulst, N., 2019. Conservation Agriculture Improves Long-term Yield and Soil Quality in Irrigated Maize-oats Rotation. *Agronomy*, 9, pp. 1-13. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120845>
- Fonteyne, S., Singh, R.G., Govaerts, B. and Verhulst, N., 2020. Rotation, Mulch and Zero Tillage Reduce Weeds in a Long-Term Conservation Agriculture Trial. *Agronomy*, 10, pp. 1-16. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070962>
- Ghabbour, E.A., Davies, G., Misiewicz, T., Alami, R.A., Askounis, E.M., Cuzzo, N.P. et al., 2017. Chapter One - National Comparison of the Total and Sequestered Organic Matter Contents of Conventional and Organic Farm Soils. *Advances in Agronomy*, 146, pp. 1–35. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.07.003>
- Gliessman, S.R. (2014). *Field and Laboratory Investigations in Agroecology*. 3rd ed., Florida: CRC Press.
- Govaerts, B., Sayre, K.D. and Deckers, J., 2005. Stable high yields with zero tillage and permanent bed planting? *Field Crops Research*, 94, pp. 33-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2004.11.003>
- Govaerts, B., Sayre, K.D., Lichter, K., Dendooven, L. and Deckers, J., 2007. Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems. *Plant and Soil*, 291, pp. 39-54. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-006-9172-6>
- Heger, M., Zens, G. and Bangalore, M., 2018. Does the Environment Matter for Poverty Reduction? The Role of Soil Fertility and Vegetation Vigor in Poverty Reduction. *Policy Research Working Papers*, 8537, pp. 39. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-8537>
- Hobbs, P.R., Sayre, K. and Gupta, R., 2008. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363, pp. 543–555. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
- Hunt, J.R., Celestina, C. and Kirkegaard, J.A., 2020. The realities of climate change, conservation agriculture and soil carbon sequestration. *Global Change Biology*, 26, pp. 3188-3189. <https://doi.org/10.1111/gcb.15082>
- Jayaraman, S., Dang, Y.P., Naorem, A., Page, K.L. and Dalal, R.C., 2021. Conservation Agriculture as a System to Enhance Ecosystem Services. *Agriculture*, 11, pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/agriculture11080718>
- Johnston, A.M. and Bruulsema, T.W., 2014. 4R Nutrient Stewardship for Improved Nutrient Use Efficiency. *Procedia Engineering*, 83, pp. 365-370. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.029>
- Kuznetsova A., Brockhoff, P.B. and Christensen, R.H.B., 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82, pp. 1-26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- LaFevor, M.C. 2022. Crop Species Production Diversity Enhances Revenue Stability in Low-Income Farm Regions of Mexico. *Agriculture*, 12, 1835. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111835>
- Levene, H., 1960. Robust tests for equality of variances. In *Contributions to Probability and Statistics*; Stanford University Press: California, pp. 278–292.
- López, H.W.A., 2017. La competitividad del limón persa (*Citrus latifolia* Tanaka) en la región de la cuenca del Papaloapan, del estado de Oaxaca. Tesis presentada para obtener el grado de maestro en ciencias. Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas, Colegio de Postgraduados, México.
- Loy, A., Steele, S. and Korobova, J., 2023. lmeresampler: Bootstrap Methods for Nested Linear Mixed-Effects Models. R package version 0.2.4. <https://CRAN.R-project.org/package=lmeresampler>
- Lüdecke, D., Ben-Shachar, M.S., Patil, I., Waggoner, P. and Makowski, D., 2021. performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models. *Journal of Open Source Software*, 6, pp. 1-7. <https://doi.org/10.21105/joss.03139>

- Miranda-Vidal, J.F., Barba-Macías, E., Trinidad-Ocaña, C. and Juárez-Flores, J., 2016. Diversidad de crustáceos en la cuenca baja del río Papaloapan, Veracruz, México. *Hidrobiológica*, 26, pp. 475-482. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2016v26n3/Barba>
- Nakazawa, M., 2023. fmsb: Functions for Medical Statistics Book with some Demographic Data. R package version 0.7.5. <https://CRAN.R-project.org/package=fmsb>
- Naresh, R.K., Singh, S.P. and Chauhan, P., 2012. Influence of conservation agriculture, permanent raised bed planting and residue management on soil quality and productivity in maize-wheat system in western Uttar Pradesh. *International Journal of Life Science Biotechnology and Pharma Research*, 1, pp. 27–34.
- Ngoma, H., Angelsen, A., Jayne, T.S. and Chapoto, A., 2021. Understanding Adoption and Impacts of Conservation Agriculture in Eastern and Southern Africa: A Review. *Frontiers in Agronomy*, 3, pp. 1-13. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.671690>
- Nichols, V., Verhulst, N., Cox, R. and Govaerts, B., 2015. Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review. *Field Crops Research*, 183, pp. 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.012>
- Ogle, S.M., Swan, A. and Paustian, K., 2012. No-till management impacts on crop productivity, carbon input and soil carbon sequestration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 149, pp. 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.010>
- Panettieri, M., Carmona B.I., Melero, S., Madejón, E. and Gómez-Macpherson, H., 2013. Effect of permanent bed planting combined with controlled traffic on soil chemical and biochemical properties in irrigated semi-arid Mediterranean conditions. *Catena*, 107, pp. 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.02.008>
- Parada-Sánchez, L.M., Villegas-Aparicio, Y., Vásquez-Dávila, M.A. and Manzanero-Medina, G.I., 2019. Mercados tradicionales de ganado en los valles centrales de Oaxaca, México. *AICA*, 14, pp. 47-52.
- Pérez, V.A. and Ortiz, P.M.A., 2002. Cambio de la cubierta vegetal y vulnerabilidad a la inundación en el curso bajo del río Papaloapan, Veracruz. *Investigaciones Geográficas*, 48, pp. 90-105.
- Pittelkow, C., Linquist, B., Lundy, M., Liang, X., Groenigen, K., Lee, J., Gestel, N., Six, J., Venterea, R. and Kessel, C., 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 183, pp. 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>
- R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Core Team: Vienna, Austria, 2020.
- Rojas, J.C.G. and Mota, M.E., 2002. Agroclimatología del maíz de México. *Revista Geográfica*, 132, pp. 123–140.
- Romero, P.R., Verhulst, N., de La Rosa, D., Hernández, V., Maertens, M., Deckers, J. and Govaerts, B., 2014. Effects of tillage and crop residue management on maize yields and net returns in the Central Mexican highlands under drought conditions. *Pedosphere*, 24, pp. 476-486. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60034-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60034-5)
- Sahrawat, K.L., Rego, T.J., Wani, S.P. and Pardhasaradhi, G., 2008. Sulfur, boron, and zinc fertilization effects on grain and straw quality of maize and sorghum grown in semi-arid tropical region of India. *Journal of Plant Nutrition*, 31, pp. 1578–1584. <https://doi.org/10.1080/01904160802244712>
- Saldivia-Tejeda, A., Fonteyne, S., Guan, T. and Verhulst, N., 2021. Permanent Bed Width Has Little Effect on Crop Yield under Rainfed and Irrigated Conditions across Central Mexico. *Agriculture*, 11, pp. 1-12. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100930>
- Sánchez-Hernández, M.A., Jiménez-Maya, J.B., Morales-Terán, G., Acevedo-Gómez, R., Antonio-Estrada, C. and Villanueva-Verduzco, C., 2019. Rendimiento de grano en maíces adaptados a condiciones de la baja cuenca del Papaloapan. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22, pp. 519-529. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.2608>
- Sayre, K. and Govaerts, B., 2012. The principles of conservation agriculture. In: Reynolds, M.P., Pask, A.J.D., Mullan, D.M. (eds) *Physiological breeding I: interdisciplinary approaches to improve crop adaption*. CIMMYT, Texcoco, pp. 164-174.

- Schielzeth, H., Dingemanse, N.J., Nakagawa, S., Westneat, D.F., Allogue, H. *et al.*, 2020. Robustness of linear mixed-effects models to violations of distributional assumptions. *Methods in Ecology and Evolution*, 11, pp. 1141-1152. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13434>
- Schut, A.G.T. and Giller, K.E., 2020. Soil-based, field-specific fertilizer recommendations are a pipe-dream. *Geoderma*, 380, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114680>
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2023. Climas. http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html
- Shapiro, S.S. and Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52, pp. 591-611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- SIAP, 2020. Estadística de Producción Agrícola. Acceso 22 Sep. 2020 Disponible en: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F. and Roger-Estrade, J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, pp. 66-87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>
- Speratti, A., Turmel, M. S., Calegari, A., Araujo-junior, C. F., Violic, A., Wall, P. and Govaerts, B., 2015. Conservation Agriculture in Latin America. In *Conservation Agriculture*. Springer International Publishing, pp. 391-415. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-11620-4_16
- Stewart, Z.P., Pierzynski, G.M., Middendorf, B.J. and Vara Prasad, P.V., 2020. Approaches to improve soil fertility in sub-Saharan Africa. *Journal of Experimental Botany*, 71, pp. 632-641. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erz446>
- Sun, W., Canadell, J.G., Yu, L., Yu, L., Zhang, W., Smith, P., Fischer, T. and Huang, Y., 2020. Climate drives global soil carbon sequestration and crop yield changes under conservation agriculture. *Global Change Biology*, 26, pp. 3325-3335. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.15001>
- Tanumihardjo, S.A., McCulley, L., Roh, R., Lopez-Ridaura, S., Palacios-Rojas, N. and Gunaratna, N.S., 2020. Maize agro-food systems to ensure food and nutrition security in reference to the Sustainable Development Goals. *Global Food Security*, 25, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100327>
- Thierfelder, C., Baudron, F., Setimela, P., Nyagumbo, I., Mupangwa, W. *et al.*, 2018. Complementary practices supporting conservation agriculture in southern Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, pp. 1-22. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0492-8>
- Toliver, D.K., Larson, J.A., Roberts, R.K., English, B.C., De La Torre Ugarte, D.G. and West, T.O., 2012. Effects of no-till on yields as influenced by crop and environmental factors. *Agronomy Journal*, 104, pp. 530-541. <https://www.doi.org/10.2134/agronj2011.0291>
- Van den Putte, A., Govers, G., Diels, J., Gillijns, K. and Demuzere, M., 2010. Assessing the effect of soil tillage on crop growth. A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. *European Journal of Agronomy*, 33, pp. 231-241. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.05.008>
- Van Dusen, M.E. and Taylor, J.E., 2005. Missing markets and crop diversity: evidence from Mexico. *Environment and Development Economics*, Cambridge University Press, 10, pp. 513-531.
- Vásquez, C.M.A., Castañeda, H.E., Lozano, T.S., Pérez, L.M.I., Santiago, M.G.M. and Robles, P.C., 2017. Caracterización de sistemas de cultivo de maíz en regiones del estado de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4, pp. 24-37.
- Verhulst, N., Francois, I. and Govaerts, B., 2012. Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems? El Batán, México; CIMMYT.