COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS SAN LUIS POTOSÍ

POSTGRADO EN
INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

SISTEMA AGRÍCOLA BAJO AGRICULTURA REGENERATIVA EN AGUASCALIENTES, MÉXICO

PERLA GARCÍA SAUCEDO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

SALINAS DE HGO, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

2025

La presente tesis titulada: **SISTEMA AGRÍCOLA BAJO AGRICULTURA REGENERATIVA EN AGUASCALIENTES, MÉXICO,** realizada por la estudiante: **Perla García Saucedo,** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO (A) _____
Dr. José Pimentel López

CO-DIRECTOR (A) _____
Dr. Esteban Salvador Osuna Ceja

ASESOR (A) _____
Dr. Miguel Angel Martínez Gamiño

ASESOR (A) _____
Dr. Víctor Manuel Ruiz Vera

ASESOR (A) _____
Dr. Ismael Hernández Ríos

Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México, 7 de octubre de 2025

SISTEMA AGRÍCOLA BAJO AGRICULTURA REGENERATIVA EN AGUASCALIENTES, MÉXICO

Perla García Saucedo, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2025

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la medición de diversos indicadores físicos y químicos del suelo en dos áreas experimentales, donde se compararon dos sistemas de manejo agrícola bajo riego por goteo: uno convencional y otro regenerativo. El objetivo fue comprender la dinámica de la degradación de la calidad del suelo y evaluar el impacto de la actividad antrópica. Se destaca la importancia de incorporar buenas prácticas regenerativas en los sistemas de producción agrícola, como una alternativa viable para restaurar los ecosistemas y aumentar la resiliencia de los sistemas agrícolas convencionales en zonas de riego. La investigación se realizó en terrenos del Campo Experimental Pabellón, ubicado en la zona del Distrito de Riego 01 de Pabellón de Arteaga, en el estado de Aguascalientes.

En relación con la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo (capítulo 1), específicamente el contenido de humedad y la resistencia a la penetración evaluadas al inicio del estudio en las dos unidades experimentales (una con manejo convencional y otra con prácticas regenerativas), los resultados indicaron que el Sistema de Agricultura Regenerativa (SAR) presentó valores más altos y una distribución más homogénea de ambas propiedades. El mayor contenido de humedad en el suelo se atribuyó a la presencia de residuos vegetales no incorporados, que permanecieron sobre la superficie actuando como un mantillo. Al no haber labranza, la estructura original del suelo se conserva, con sus características buenas o malas, y se mantiene la continuidad de los poros. Esta cobertura superficial reduce la radiación directa y la evaporación, entre otros efectos beneficiosos. El mantillo cubre el suelo disminuyendo la insolación y la evaporación, entre otros. Por su parte, el incremento observado en la resistencia a la penetración del suelo en el área con SAR podría estar relacionado con procesos naturales de consolidación.

Por otro lado, se realizó un análisis de evaluación de una serie de indicadores físicos y químicos del suelo (capítulo 2), como la densidad aparente, porosidad, conductividad hidráulica, materia orgánica y humedad aprovechable— al finalizar los ciclos de cultivo primavera-verano (PV) y otoño-invierno (OI) 2024 en sistemas agrícolas de riego. Durante el ciclo PV se evaluaron cultivos como girasol, maíz, sorgo forrajero y frijol grano, en rotación con cereales de invierno [triticales de corte, avena y trigo, asociados con trébol alejandrino (*Trifolium alexandrinum* L.)], bajo dos sistemas de manejo: el sistema de agricultura convencional (SAC) y el sistema de agricultura regenerativa (SAR).

En conjunto, ambos capítulos concluyen que el sistema de agricultura regenerativa no solo promueve la mejora de las propiedades físicas del suelo, sino que también generan mayores rendimientos agrícolas, consolidándose como una alternativa viable y sostenible frente a los métodos tradicionales de cultivo.

Finalmente, si bien los sistemas agrícolas intensivos y de altos insumos permiten aumentar los rendimientos, estos beneficios suelen lograrse a costa de la fertilidad del suelo a largo plazo. Para lograr un uso sostenible del suelo, es fundamental adoptar enfoques adaptados a cada condición, considerando tanto factores biofísicos como socioeconómicos. En este sentido, la agricultura regenerativa representa una alternativa viable que puede contribuir al abastecimiento alimentario a nivel regional, nacional y global. La implementación de buenas prácticas regenerativas (como la rotación de cultivos, el uso de abonos orgánicos, cultivos de cobertura y la labranza mínima) apoya significativamente a la restauración de tierras agrícolas degradadas.

Palabras clave: Agricultura regenerativa, sistema de labranza, suelo.

AGRICULTURAL SYSTEM UNDER REGENERATIVE AGRICULTURE IN AGUASCALIENTES, MEXICO

Perla García Saucedo, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2025

ABSTRACT

This work presents the results of measuring various physical and chemical indicators of the soil in two experimental areas, where two agricultural management systems under drip irrigation were compared: one conventional and the other regenerative. The objective was to understand the dynamics of soil quality degradation and to evaluate the impact of anthropogenic activity. The study highlights the importance of incorporating regenerative practices into agricultural production systems as a viable alternative to restore ecosystems and increase the resilience of conventional agricultural systems in irrigated areas. The research was carried out on land belonging to the Campo Experimental Pabellón, located in the Irrigation District 01 of Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México.

Regarding the spatial variability of the soil's physical properties (Chapter 1) —specifically, the moisture content and penetration resistance evaluated at the beginning of the study— in the two experimental units (one with conventional management and the other with regenerative practices) —the results indicated that the Regenerative Agriculture System (SAR) showed higher values and a more homogeneous distribution of both properties. The higher soil moisture content was attributed to the presence of unincorporated plant residues that remained on the surface, acting as mulch. In the absence of tillage, the original soil structure is preserved, with its good or poor characteristics, and pore continuity is maintained. This surface cover reduces direct radiation and evaporation, among other beneficial effects. The mulch layer covers the soil, reducing solar radiation and evaporation, among others. Meanwhile, the observed increase in soil penetration resistance in the area managed under SAR could be related to natural consolidation processes.

On the other hand, an evaluation analysis was conducted for a series of physical and chemical soil indicators (Chapter 2), —such as bulk density, porosity, hydraulic conductivity, organic matter, and available moisture —at the end of the 2024 spring-summer (PV) and autumn-winter (OI)

cropping cycles in irrigated agricultural systems. During the PV cycle, crops such as sunflower, maize, forage sorghum, and grain bean were evaluated, in rotation with winter cereals [triticale for forage, oats, and wheat, associated with berseem clover (*Trifolium alexandrinum* L.)], under two management systems: the Conventional Agriculture System (SAC) and the Regenerative Agriculture System (SAR).

Overall, both chapters conclude that the regenerative agriculture system not only promotes the improvement of soil physical properties but also generates higher crop yields, establishing itself as a viable and sustainable alternative to traditional cultivation methods.

Finally, although intensive and high-input agricultural systems allow for increased yields, these benefits are often achieved at the expense of long-term soil fertility. To achieve sustainable soil use, it is essential to adopt approaches adapted to each condition, considering both biophysical and socioeconomic factors. In this regard, regenerative agriculture represents a viable alternative that can contribute to food supply at regional, national, and global levels. The implementation of regenerative practices— such as crop rotation, the use of organic fertilizers, cover crops, and minimal tillage— significantly supports the restoration of degraded agricultural lands.

Keywords: Regenerative agriculture, tillage system, soil.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para mis estudios de maestría (No. CVU: 1336964).

Al Colegio de Postgraduados, especialmente al Campus San Luis Potosí, a través del posgrado de Innovación en Manejo de Recursos Naturales y al Campus Montecillo, por la oportunidad de continuar con mis estudios de posgrado y contribuir a mi formación profesional.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Pabellón de Arteaga, por poner a disposición los terrenos experimentales y otorgarme el apoyo necesario para el desarrollo de esta investigación.

A mi profesor consejero Dr. José Pimentel López, por su apoyo en el desarrollo de la investigación, su paciencia, su guía y por motivarme siempre a ir en busca de mejorar mis habilidades.

A mi codirector, el Dr. Esteban Salvador Osuna Ceja, por su apoyo incondicional para la culminación y el éxito de esta investigación. Gracias por compartir conmigo su sabiduría, experiencia y pasión por la ciencia, por confiar en mis capacidades y guiarme en cada etapa del proceso. Agradezco profundamente su acompañamiento siempre humano, su apoyo emocional y las enseñanzas que enriquecieron mi aprendizaje práctico, fortaleciendo mi aprecio por la experiencia directa como parte esencial del descubrimiento científico, así como la inspiración para disfrutar y valorar el maravilloso mundo de la investigación.

Al Dr. Ismael Hernández Ríos por su optimismo, apoyo, motivación y buena disposición para contribuir a la conclusión de la investigación.

Al Dr. Miguel Ángel Martínez Gamiño por su colaboración y buena actitud para para aportar al proyecto.

Al Dr. Víctor Manuel Ruiz Vera por su disposición y apoyo para la mejora del trabajo.

Agradezco sinceramente el apoyo de los trabajadores de campo, profesores, personal administrativo y compañeros por sus valiosas contribuciones al desarrollo de este proyecto. Asimismo, expreso mi gratitud por su influencia en mi crecimiento personal y profesional durante este proceso

DEDICATORIA

A mi madre Gregoria Saucedo Esparza,

por ser mi pilar inquebrantable, por su apoyo constante, su comprensión infinita y su amor que me sostuvo en cada etapa de este camino. Gracias por creer en mí incluso en mis momentos de duda, por motivarme con tus palabras y tu ejemplo, y por enseñarme que la fuerza más grande nace del corazón.

A mi hermano Margarito,

por estar siempre presente, por tu aliento, tu cercanía y por impulsarme a seguir, aun cuando parecía imposible. Tu compañía ha sido una fuente de ánimo y confianza en este proceso.

A mi hermano Gerardo,

quien ya no está con nosotros, pero vive en mi memoria y mi corazón.

A mis demás hermanos,

gracias por ser parte de esta historia, por su cariño, apoyo silencioso y constante presencia.

Cada logro que se cosecha hoy lleva en sus raíces el amor, el esfuerzo y la memoria de quienes sembraron antes que nosotros. Volver a los orígenes no es retroceder, sino reconocer que en la sabiduría de la tierra y en el respeto por ella se encuentra el camino hacia un suelo más vivo, un campo más justo y un futuro más fértil.

CONTENIDO

RESUMEN iii
ABSTRACT v
AGRADECIMIENTOS vii
DEDICATORIA viii
LISTAS DE CUADROS xii
LISTA DE FIGURAS xiii
INTRODUCCIÓN GENERAL 1
CAPÍTULO I. VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO BAJO DOS SISTEMAS DE MANEJO EN AGUASCALIENTES 3
1.1 RESUMEN 3
1.2 ABSTRACT 4
1.3 INTRODUCCIÓN 5
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS 6
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 8
1.6 CONCLUSIONES 13
CAPÍTULO II. ANÁLISIS DE INDICADORES FÍSICOS DEL SUELO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS DE RIEGO Y SU IMPACTO PRODUCTIVO 14
2.1 RESUMEN 14
2.2 ABSTRACT 15
2.3 INTRODUCCIÓN 16
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS 18
2.4.1 Métodos de siembra 19
2.4.2 Densidad de siembra 20
2.4.3 Fertilización 20
2.4.4 Control de maleza en cultivos de maíz, girasol, sorgo y frijol 20
2.4.5 Control de plagas en cultivos de PV y OI 21
2.4.6 Cosecha de los cultivos de PV y OI 21
2.4.7 Medición de las propiedades del suelo 22

2.4.8 Análisis Estadístico 22
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 23
2.5.1 Variabilidad de las propiedades físicas del suelo y producción de cultivos PV 23
2.5.2 Análisis de correlación entre propiedades de suelo y planta en los dos sistemas agrícolas evaluados 29
2.5.3 Efecto de la conductividad hidráulica (*K*) sobre el rendimiento de girasol, maíz, sorgo y frijol en PV 33
2.5.4 Influencia de las propiedades físicas del suelo en el rendimiento de cultivos PV bajo dos sistemas agrícolas 35
2.5.5 Discusión general de PV 38
2.5.6 Variabilidad de las propiedades físicas del suelo y producción de cultivos OI 40
2.5.7 Análisis de correlación entre propiedades de suelo y planta en los sistemas agrícolas evaluados 45
2.5.8 Efecto de la conductividad hidráulica (*K*) sobre el rendimiento de triticale 1, avena, trigo y trticale 2 de OI 49
2.5.9 Influencia de las propiedades físicas y químicas del suelo en el rendimiento de cultivos OI bajo dos sistemas agrícolas 52
2.5.10 Discusión general 56
2.5.11 Respuesta de los cultivos de PV 57
2.5.12 Respuesta de los cultivos de OI 57
2.5.13 Importancia de los patrones acumulativos 58
2.6 CONCLUSIONES 58
III. CONCLUSIONES GENERALES 59
IV. LITERATURA CITADA 60

LISTAS DE CUADROS

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos del contenido de humedad (Θ_g) y resistencia a la penetración (R_p) en dos sistemas de manejo del suelo. 8
Cuadro 2. Estadística descriptiva de las variables en girasol. 25
Cuadro 3. Estadística descriptiva de las variables en frijol. 26
Cuadro 4. Estadística descriptiva de las variables en maíz. 27
Cuadro 5. Estadística descriptiva de las variables en sorgo. 28
Cuadro 6. Análisis de correlación entre propiedades físicas del suelo y el rendimiento de girasol, maíz, sorgo y frijol en dos sistemas agrícolas. 31
Cuadro 7. Estadística descriptiva de las variables en triticale1. 41
Cuadro 8. Estadística descriptiva de las variables en triticale2. 42
Cuadro 9. Estadística descriptiva de las variables en avena. 43
Cuadro 10. Estadística descriptiva de las variables en trigo. 44
Cuadro 11. Análisis de correlación entre propiedades físicas del suelo y el rendimiento de triticale 1 , avena, trigo y triticale 2en dos sistemas agrícolas. 48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Histogramas de Θ_g (a=5 cm y b=15 cm) y R_p (c =15 cm) del suelo bajo el sistema regenerativo (SAR). 9

Figura 2. Histograma de Θ_g (d=5 cm y e=15 cm) y R_p (f=15 cm) del suelo bajo el sistema convencional (SAC). 10

Figura 3. Mapas de variabilidad espacial para las propiedades físicas del suelo estudiadas en el área experimental del sistema SAR A) Θ_g a 5 cm, B) Θ_g a 15 cm y C) R_p 12

Figura 4. Mapas de variabilidad espacial para las propiedades físicas del suelo estudiadas en el área experimental del sistema convencional (SAC) A) Θ_g a 5 cm, B) Θ_g a los 15 cm y C) R_p 12

Figura 5. Relación lineal entre el rendimiento de materia seca y grano con K en los sistemas SAR y SAC, de girasol (a.e), maíz (b,f), sorgo(c,g) y frijol (d,h). 34

Figura 6. Porcentaje explicativo individual y acumulativo de las propiedades del suelo y su efecto en el rendimiento, R_p- resistencia a la penetración, ρ_b- densidad aparente f_T- porosidad, K- conductividad hidráulica, S_o- sortividad, Ts- temperatura del suelo, Θ_g- humedad gravimétrica. En los sistemas SAR y SAC: (a, e) girasol, (b, f) maíz, (c, g) sorgo y (d, h) frijol..... 37

Figura 7. Relación lineal entre el rendimiento de materia seca con K en los sistemas SAR y SAC (a,e) triticale 1, (b, f) avena, (c, g) trigo, (d, h) triticale 2..... 51

Figura 8. Porcentaje explicativo individual y acumulativo de las propiedades del suelo y su efecto en el rendimiento, R_p- resistencia a la penetración, ρ_b- densidad aparente; f_T- porosidad, K- conductividad hidráulica, S_o-sortividad, Ts- temperatura del suelo, Θ_g- humedad gravimétrica. En los sistemas SAR y SAC: (a,b) triticale 1, (b,f) avena, (c,g) trigo, (d, h) triticale 2. 55

INTRODUCCIÓN GENERAL

En las zonas del altiplano semiárido del centro de México, como el Valle de Aguascalientes, donde se cultivan granos y forrajes durante el ciclo primavera-verano y cultivos forrajeros bajo riego en otoño-invierno, la agricultura convencional enfrenta desafíos críticos. Estos incluyen la escasez de agua, la degradación del suelo y los efectos del cambio climático (como sequías prolongadas y temperaturas extremas), que están afectando la productividad y sostenibilidad de estos sistemas agrícolas. Dichos problemas son una amenaza para la seguridad alimentaria en la región (Ortega, 2020)

En este contexto, la agricultura regenerativa ha surgido como una alternativa viable para promover sistemas agrícolas sostenibles y resilientes. Este enfoque se basa en un manejo holístico de las tierras agrícolas, priorizando la restauración de la salud del suelo, la promoción de la biodiversidad y el fortalecimiento de los ecosistemas naturales. A diferencia de los métodos convencionales que pueden agotar los recursos, la agricultura regenerativa busca restaurar la tierra mediante prácticas como la rotación de cultivos, el uso de cultivos de cobertura y la labranza mínima, la cual contribuye así a la producción de alimentos nutritivos y sostenibles (Tapia, 2025).

En México, diversas organizaciones, instituciones académicas y productores agrícolas han adoptado la agricultura regenerativa como una respuesta a los desafíos ambientales y productivos que enfrenta el país en la actualidad (Directo al Campo, 2023). En Aguascalientes, iniciativas como la implementación de riego tecnificado y la rotación de cultivos han permitido a los agricultores optimizar el uso del agua, reducir la contaminación de las aguas superficiales y los acuíferos (CIMMYT, 2025).

Sin embargo, en un ambiente donde la escasez de agua y la degradación del suelo amenazan la seguridad alimentaria, el creciente interés por los forrajes en los últimos años ha intensificado la competencia por el uso de tierras agrícolas. Esto evidencia que la agricultura convencional —con su excesiva dependencia de maquinaria pesada e insumos químicos— deteriora la estructura del suelo, acelera la erosión, contamina las aguas superficiales y los acuíferos, altera los ciclos de gases de efecto invernadero, destruye hábitats naturales y favorece la aparición de plagas resistentes genéticamente (FAO, 2023; Schreefel *et al*., 2020). Estas prácticas intensivas han acelerado significativamente la degradación del suelo, afectando aproximadamente el 85.4 % de

la superficie agrícola del estado (SEMARNAT-CP, 2003). En contraste, los sistemas agrícolas que incorporan buenas prácticas que conservan el suelo y los nutrientes, como el manejo de tierras con agricultura regenerativa, presentan una tasa de degradación del suelo más de tres veces menor que en los sistemas convencionales, al enfocarse en prácticas como la rotación de cultivos, el uso de abonos orgánicos y la cero labranza, lo que mejora la salud del suelo y su capacidad para retener carbono (Crystal-Ornelas *et al*., 2021; Khangura *et al*., 2023; Raveloaritiana & Wanger, 2024).

Además, la agricultura regenerativa ofrece beneficios adicionales, como la captura de carbono, la mejora de la calidad del agua y la resiliencia ante condiciones climáticas adversas (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2021). Estas prácticas no solo contribuyen a la sostenibilidad ambiental, sino que también pueden mejorar la productividad y la seguridad alimentaria en la región.

La implementación de la agricultura regenerativa en Aguascalientes no solo busca mejorar la productividad agrícola, sino también contribuir a la restauración de los ecosistemas y garantizar la seguridad alimentaria en el estado. Este enfoque integral es esencial para enfrentar los retos ambientales y sociales del siglo XXI.

Con base en estos antecedentes, en 2024 se inició el presente estudio que analizó la implementación de un sistema agrícola bajo riego con agricultura regenerativa en Aguascalientes, que busca la rehabilitación del suelo con el fin de mantenerlo productivo el mayor tiempo posible. Para lograr esto es necesario contar con información e indicadores sobre la salud del suelo, la biodiversidad y los servicios ambientales (carbono y agua) generados por el sistema agrícola que se pretende desarrollar en este tipo de esquema productivo. Por lo tanto, el objetivo fue demostrar cómo este sistema puede construir una agricultura sostenible y resiliente, capaz de enfrentar los retos actuales y así complementar los esfuerzos para restaurar las tierras agrícolas degradadas y proporcionar los mejores resultados para la seguridad alimentaria y el bienestar ambiental.

CAPÍTULO I. VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO BAJO DOS SISTEMAS DE MANEJO EN AGUASCALIENTES

1.1 RESUMEN

En el manejo convencional del suelo, la variabilidad inherente de éste se ha considerado una limitante, lo que ha llevado a buscar la homogeneización de sus propiedades mediante prácticas regenerativas que promuevan un manejo sostenible del mismo. La presente investigación se realizó con el objetivo de evaluar y comparar la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en dos sistemas de manejo agrícola. El estudio se hizo en Pabellón, Ags. El área experimental, abarca 0.8 ha, y fue dividida en dos parcelas de igual tamaño (0.4 ha). En ellas se establecieron dos sistemas de manejo de suelo: a) el sistema agrícola convencional (SAC) y b) el sistema con prácticas agrícolas regenerativas (SAR). En cada uno de los sistemas, se realizó un muestreo sistemático en una malla de 40 m x 100 m, con una separación de 5 m entre cada intersección, obteniéndose un total de 160 muestras por tratamiento. Se realizó un análisis exploratorio de datos donde se estimaron los parámetros estadísticos clásicos y un análisis geoestadístico para estudiar los cambios espaciales del contenido de humedad (Θ_g) y la resistencia a la penetración (R_p) del suelo. Los resultados mostraron que el Θ_g y la R_p fueron más altas en el sistema SAR en comparación con el SAC. Además, el Θ_g en el sistema SAR presentó una distribución más normal, mientras que en el SAC no se observó un comportamiento normal. Los mapas de distribución espacial revelaron que en el sistema SAR, los valores más altos de Θ_g y R_p se ubicaron en la parte centro-sur del área, mientras que en el SAC no hubo una tendencia definida y los valores fueron generalmente bajos en la mayor parte del área experimental. Estos resultados sugieren que el sistema SAR tiene efectos positivos sobre las propiedades físicas del suelo en comparación con el sistema convencional.

Palabras clave: Geoestadísticas. compactación, regenerativa, sostenibilidad, sistema.

1.2 ABSTRACT

In conventional soil management, the inherent variability of soils has often been regarded as a limitation, which has led to attempts to homogenize soil properties. In contrast, regenerative practices promote sustainable soil management by maintaining and improving its natural variability. The present study was conducted with the objective of evaluating and comparing the spatial variability of soil physical properties under two agricultural management systems. The research was carried out in Pabellón, Aguascalientes. The experimental area covered 0.8 ha, divided into two equal plots of 0.4 ha. Two management systems were established: (a) the Conventional Agriculture System (SAC) and (b) the Regenerative Agriculture System (SAR).

In each system, systematic sampling was conducted on a 40 m × 100 m grid with a 5 m spacing between intersections, yielding a total of 160 samples per treatment. An exploratory data analysis was performed to estimate classical statistical parameters, along with a geostatistical analysis to evaluate the spatial patterns of soil moisture content (Θ_g) and soil penetration resistance (R_p).

The results indicated that both Θ_g and R_p were higher in SAR compared to SAC. Furthermore, Θ_g under SAR exhibited a more normal distribution, whereas no normal behavior was observed in SAC. Spatial distribution maps revealed that in SAR, the highest values of Θ_g and R_p were concentrated in the central-southern portion of the study area, while SAC showed no defined trend, with generally low values across most of the experimental site. These findings suggest that SAR exerts positive effects on soil physical properties compared to conventional management.

Keywords: Geostatistics, compaction, regenerative, sustainability, system.

1.3 INTRODUCCIÓN

La evaluación de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo en áreas experimentales es de gran importancia ya que ésta puede enmascarar el efecto de los tratamientos aplicados. Diversos estudios han demostrado que, aun a nivel de pequeñas áreas experimentales, la variabilidad puede ser significativa (Ciarlo *et al*., 2020; Guachún, 2022; Hernández *et al*., 2018; Qu *et al*., 2023). Tradicionalmente el diseño experimental en el campo de la agronomía se basa en el diseño de bloques con tratamientos distribuidos al azar con el objetivo de reducir el error experimental (Clewer & Scarisbrick, 2001), permitiendo el uso de métodos convencionales de análisis estadísticos como el análisis de varianza, regresión, entre otros (Montgomery, 2009, Tavares *et al*., 2016). Esta consideración implica que la variabilidad espacial es aleatoria dentro de los bloques, condición que no siempre se cumple (Jaramillo, 2012). Como método alternativo para cuantificar la heterogeneidad se propone la aplicación de la geoestadística, la cual es usada para analizar la estructura de la variabilidad espacial de variables regionalizadas y para optimizar su interpolación (Jaramillo, 2012 y 2013).

En el mundo existen muchos trabajos relacionados con el estudio de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo bajo diferentes ambientes edafoclimáticos y tipos de manejo, los cuales se apoyan en el uso de la geoestadística para explicar las relaciones causa-efecto. La mayoría de las investigaciones han analizado la variabilidad espacial de variables físicas y químicas para determinar la respuesta del suelo a usos específicos bajo determinadas prácticas de manejo y establecer su relación con la productividad de los diferentes cultivos agrícolas (Ciarlo *et al.,* 2020, Vargas *et al*., 2015). Estos estudios demuestran que no existe un patrón único de distribución espacial de suelo y la misma puede ser influenciada por el manejo agrícola y la escala de muestreo.

La hipótesis de este estudio fue que los cambios de la estructura y estabilidad del suelo, derivados de las prácticas de manejo evaluadas, pueden ser explicados a través del comportamiento de las propiedades físicas del suelo. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar y comparar la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo como la humedad gravimétrica y la resistencia a la penetración en dos sistemas de manejo agrícola, con el fin de identificar cómo las prácticas de manejo influyen en la distribución y heterogeneidad de las características como la

capacidad de retención de humedad y resistencia mecánica, entre otras, y así proporcionar recomendaciones para mejorar la gestión sostenible de los suelos en cada sistema.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en el Campo Experimental Pabellón de INIFAP en Aguascalientes, situado en las coordenadas 22º11' Norte y 102º20' Oeste. El sitio se ubica a una altitud de 1,969 msnm. El suelo del sitio experimental es de tipo Xerosol, limitado en el subsuelo por tepetate, principalmente en la fase dúrica y más localizadamente la dúrica profunda, con clase textural media (migajón-arenoso), pH alcalino de 7.8, con menos de 1 % de materia orgánica y la pendiente del terreno varía de 2 a 3 % (INEGI, 2007).

El clima predominante en la región es semidesértico [BS1 kw (w) (e)]. La temperatura media anual es de 16.7 ºC, la media anual máxima es de 20 ºC y la mínima es de 13.2 ºC. La precipitación pluvial acumulada anual oscila entre 400 a 450 mm, y se tiene un régimen de lluvias en verano, precipitación invernal menor a 5 % del registro anual y un verano cálido (García, 2004).

Durante el ciclo otoño-invierno (OI) de 2023 se delimitaron dos parcelas contiguas de 40 m × 100 m, las cuales se emplearon como unidades experimentales. La primera había sido cultivada en monocultivo de verano con labranza convencional; la segunda, en descanso, estaba cubierta de pastizal nativo. Antes de iniciar la investigación, ambas fueron preparadas con arado de volteo y rastra. Posteriormente, la parcela en descanso se sembró con triticale (*Triticum aestivum*) para forraje, asociado con trébol alejandrino (*Trifolium alexandrinum* L.*),* con el fin de establecer una pradera de trébol tras la cosecha del cereal de OI. La otra parcela quedó lista para la siembra de los monocultivos de primavera-verano (PV) en 2024.

Después de la cosecha de los forrajes OI, se realizó un muestreo del contenido de humedad gravimetrica (Θ_g) y de la resistencia a la penetración del suelo (R_p). Las dos variables fueron determinadas mediante un muestreo sistemático a través de una malla, con una separación de 5 m entre cada intersección o punto de muestreo, lo que dio como resultado un total de 160 puntos de muestreo por sistema. Este muestreo se realizó en la capa superficial del suelo, de 0-5 cm y 0-15 cm de profundidad, en los dos sistemas. Para la determinación del contenido de humedad se utilizó un TDR (Reflectómetro del Dominio del Tiempo), mientras que la resistencia a la penetración se

midió con un penetrómetro de impacto de punta cónica (CIMMYT, 2013). Una vez obtenidos los datos, se estimaron medidas de tendencia central y dispersión (media, mediana, desviación estándar, máximo, mínimo, coeficiente de asimetría, kurtosis y coeficiente de variación). Posteriormente, se realizó un análisis exploratorio de los datos provenientes de 160 observaciones por variable y por tratamiento, evaluando su comportamiento y verificando el cumplimiento de la normalidad mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov y de Levene para homogeneidad de varianza.

Dado que en el sistema convencional (SAC) se observaron distribuciones altamente asimétricas y leptocúrticas, lo cual viola los supuestos de normalidad requeridos por las pruebas paramétricas, se optó por aplicar la prueba no paramétrica de Wilcoxon ($\alpha = 0.05$) como análisis principal para la comparación de grupos, los análisis se realizaron utilizando el software R Studio (versión 2024.12.0). Además, se efectuó un análisis de la variabilidad espacial de ambas variables utilizando herramientas geoestadísticas para su definición y ajuste.

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis exploratorio de datos

Las estadísticas descriptivas de las variables humedad (Θ_g) y resistencia a la penetración (R_p), se muestran en el Cuadro 1. En este se presentan los resultados de los principales estadísticos de las dos variables analizadas para ambos sistemas de manejo evaluados. En las Figuras 1 y 2 Se muestran los histogramas de frecuencia correspondientes a ambas variables.

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos del contenido de humedad (Θ_g) y resistencia a la penetración (R_p) en dos sistemas de manejo del suelo.

Sistema	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Varianza	DS	Asimetría	Kurtosis	CV
Humedad de suelo (Θg en % a 5 cm)									
SAR	0.50	29.50	15.71	16.55 **a**	43.15	6.56	-0.37	-0.35	0.41
SAC	0.50	12.50	1.05	0.50 **b**	2.59	0.61	3.52	17.82	0.58
Humedad de suelo (Θg en % a 15 cm)									
SAR	1.10	20.7	10.36	10.45 **a**	18.19	4.26	-0.11	-0.40	0.41
SAC	0.60	6.6	0.90	0.70 **b**	0.82	0.69	3.13	15.07	0.77
Resistencia a la penetración (R_p en MPa a 15 cm)									
SAR	0.19	3.43	0.92	0.76 **a**	0.28	0.53	2.19	6.51	0.576
SAC	0.50	4.39	0.61	0.02 **b**	0.29	0.53	5.79	35.54	0.87

SAR- Sistema de agricultura regenerativa; SAC- Sistema de agricultura convencional, DS- Desviación estándar, CV- coeficiente de variación; Prueba de W ($\alpha = 0.05$).

En el resumen de las estadísticas descriptivas del Cuadro 1, se observa que la Θ_g presenta una buena correspondencia entre el valor de media y la mediana indicando poblaciones con distribuciones simétricas. Por otro lado, se aprecia que la media para Θ_g es de 15.71 % y 10.36 % con un coeficiente de variación (CV) de 41.8 y 41.2 % en las dos profundidades muestreadas (5 y 15 cm) para el sistema SAR; mientras que la media de Θ_g en el sistema convencional (barbecho + rastra) para las dos profundidades es de 1.05 % y 0.90 % correspondiente a un CV de 58.0 y 77.0 %, respectivamente. En el caso de R_p se observa que la media es de 0.92 MPa en SAR y para el convencional es de 0.61 Mpa, respectivamente, en la capa superficial, lo cual indica bajos niveles de compactación y ninguna limitación para el crecimiento de los cultivos (Bravo *et al*., 2011). El CV que presentan las dos variables evaluadas, son relativamente altos lo que indica que la Θ_g y R_p

muestran una variabilidad media, en los dos sistemas de manejo del suelo. De acuerdo con Pinzón-Gómez *et al*. (2016), variables con CV > 65 % se consideran con una alta variabilidad, con CV entre 25 y 65 % se califican de variación media y aquellas con < 25 % son consideradas de baja variabilidad. En este análisis las variables analizadas son de media variabilidad; sin embargo, los valores que se utilicen en el análisis geoestadístico pueden generar buenas conclusiones, tal como lo reportan algunos autores (Subhash *et al*., 2020).

En relación con los valores de asimetría para el caso de Θ_g en las dos profundidades evaluadas, el sistema SAR, dio valores negativos lo que se evidencian en la Figura 1 a, b y c del histograma de Θ_g, donde se observa un ligero sesgo hacia la izquierda de los datos, mientras que para el caso de R_p, la asimetría mostró un valor positivo y se observa un leve sesgo hacia a la derecha de los datos de esta propiedad.

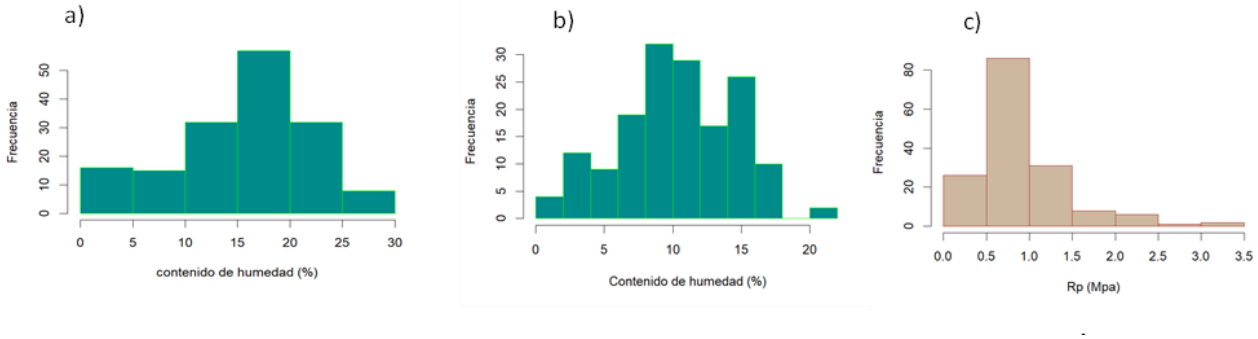


Figura 1. Histogramas de Θ_g (a=5 cm y b=15 cm) y R_p (c =15 cm) del suelo bajo el sistema regenerativo (SAR).

En el caso del sistema convencional, el comportamiento de Θ_g y R_p mostraron valores altos de asimetría positivos lo que se demuestra en la Figura 2 d, e y f del histograma donde se observa un ligero sesgo hacia la derecha de los datos.

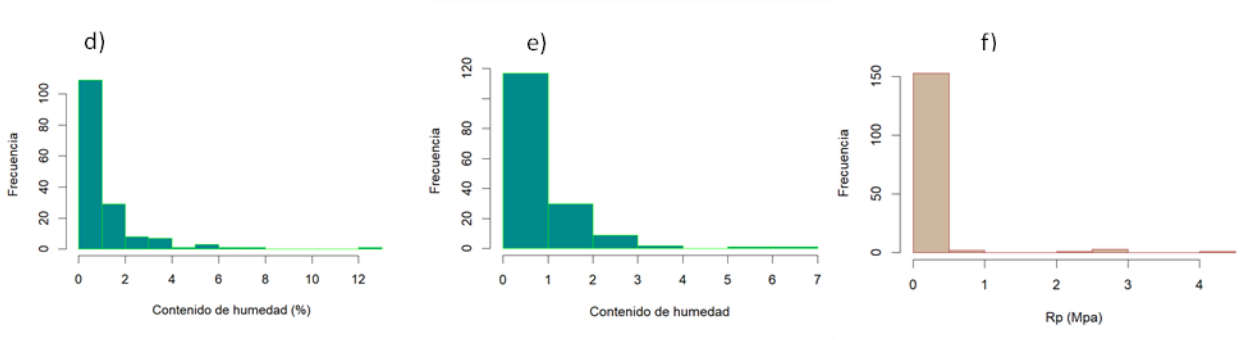


Figura 2. Histograma de Θ_g (d=5 cm y e=15 cm) y R_p (f=15 cm) del suelo bajo el sistema convencional (SAC).

De acuerdo con algunos reportes de la literatura, para una distribución normal y simétrica, éstos coeficientes deberían ser iguales a 0 y 3 para asimetría y Kurtosis respectivamente (Adhikari *et al*., 2009). Para comprobar la normalidad se realizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, en ambas variables para los dos sistemas de manejo. La variable de Θ_g a la profundidad de 5 cm arrojó un valor para el estadístico D = 0.0815 y un valor de p-value = 0.0113, y a 15 cm los estadísticos fueron de D = 0.0531 y un p-value = 0.3286; de acuerdo con estos resultados se puede interpretar que solo la Θ_g a 15 cm presentó una distribución normal. En tanto que la variable R_p se obtuvo el estadístico D = 0.1807 y un valor de p-value = $6.164e^{-14}$ con lo cual se concluye que los datos de esta variable no siguen una distribución normal con un nivel de significancia de 0.05.

De acuerdo con este criterio, se puede apreciar que los valores de ambas variables evaluadas en el sistema convencional, para Θ_g a 5 cm los estadísticos fueron D = 0.2567 y p-value = $2.2e^{-16}$ mientras que para Θ_g a 15 cm los valores fueron D = 0.1864 y p-value = $7.142e^{-15}$, con lo cual se confirma que los datos de esta variable no siguen una distribución normal. En el caso de R_p los valores estadísticos fueron D = 0.1483 y p-value = $2.2e^{-16}$, confirmando que no siguen una distribución normal. Sin embargo, es importante señalar que la mayoría de las propiedades físico-químicas de los suelos son sesgadas, es decir no siempre siguen una distribución normal (Hammer, *et al*., 1998; Webster y Oliver, 2007).

La homogeneidad de varianzas se evaluó mediante la prueba de Levene (Levene, 1960), cuyos resultados indicaron diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas de manejo para las variables analizadas: Resistencia a la penetración (R_p): F = 16.30, gl = 1,318, p < 0.001;

humedad a 5 cm: F = 154.98, gl = 1,318, p < 0.001; humedad a 15 cm: F = 187.27, gl = 1,318, p < 0.001.

Con base en estos resultados, se aplicó la prueba no paramétrica de Wilcoxon, la cual es menos sensible a los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Esta prueba mostró diferencias significativas entre los sistemas de manejo: Resistencia a la penetración: W = 24602, p < 0.001; Humedad a 5 cm: W = 25239, p < 0.001; Humedad a 15 cm: W = 25384, p < 0.001 lo cual indica que hay un cambio en las propiedades evaluadas según el tipo de manejo de suelo.

Mapas de isolíneas de las propiedades físicas (Θ_s y R_p) evaluadas para el área experimental de los dos sistemas de manejo de suelo

Los mapas de variabilidad espacial de las dos propiedades físicas del suelo evaluadas en ambos sistemas de manejo se muestran en las Figuras 3 a, b y c, y 4 a, b y c. En el área del sistema SAR, en sus mapas (Figura 3 a y b) se puede visualizar que los valores más altos de Θ_g para la profundidad de 5 cm, se presentan hacia la zona sur-centro y los valores menores en la parte norte y NW, mientras que el mapa correspondiente a la profundidad de 15 cm los valores más altos se presentan en la zona centro-sur. Lo anterior podría incidir en la variación de la respuesta productiva de los cultivos bajo estudio. El mapa de R_p del mismo sistema (SAR) muestra valores que oscilan de 0.4 a 3.6 MPa clasificados de bajo nivel de compactación. La mayor parte de la superficie presentó valores que fluctuaron de 0.4 a 0.8 MPa, con pequeños islotes o agregados cuyos valores de R_p estuvieron por encima de 0.8 hasta alcanzar el valor máximo de 3.6, localizados en los extremos norte y sur del área experimental (Figura 3 c).

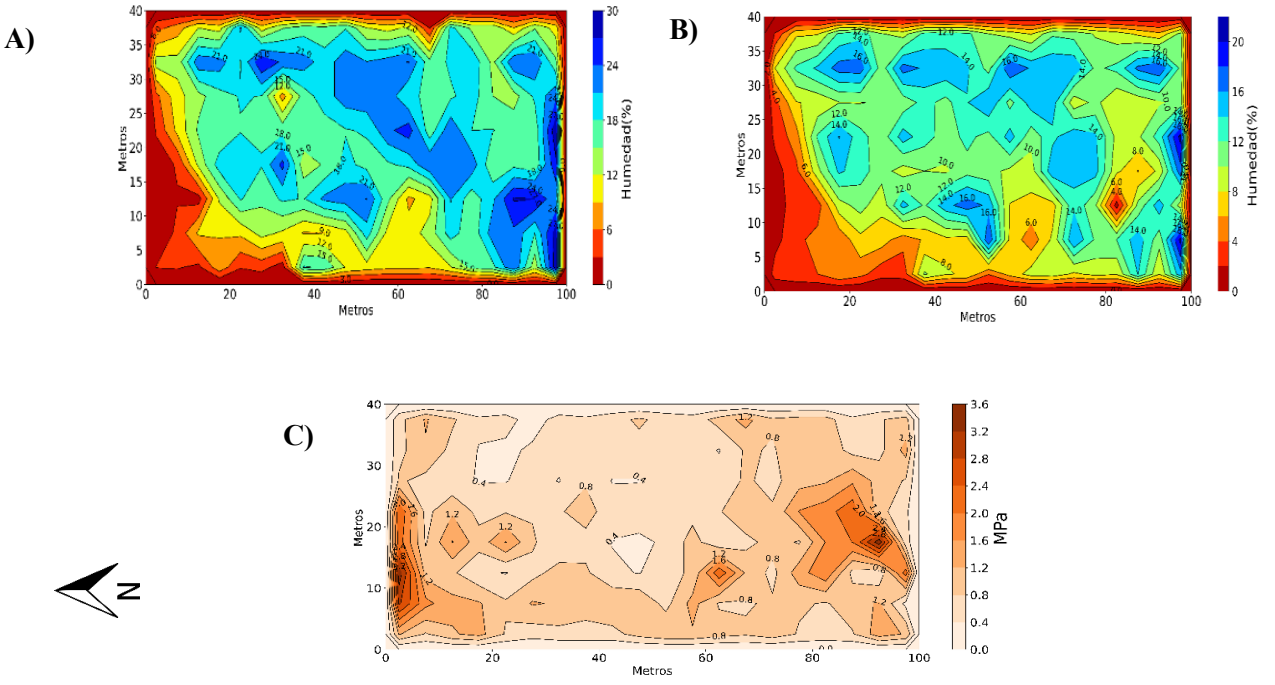


Figura 3. Mapas de variabilidad espacial para las propiedades físicas del suelo estudiadas en el área experimental del sistema SAR A) Θ_g a 5 cm, B) Θ_g a 15 cm y C) R_p .

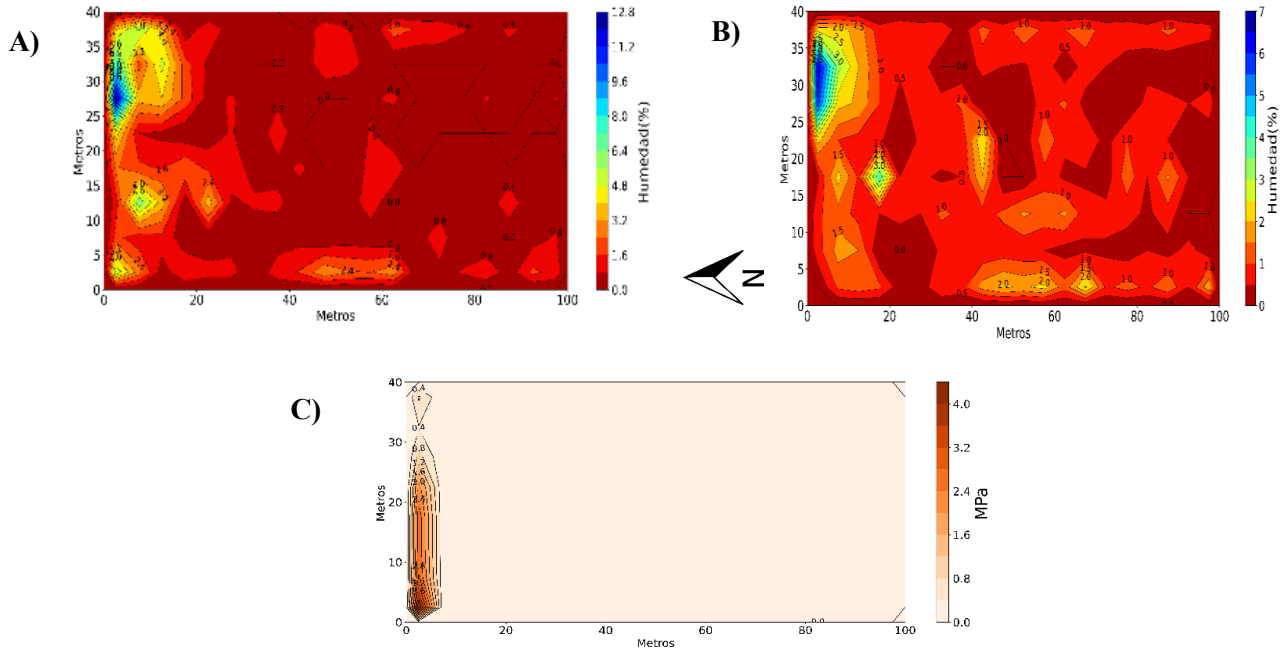


Figura 4. Mapas de variabilidad espacial para las propiedades físicas del suelo estudiadas en el área experimental del sistema convencional (SAC) A) Θ_g a 5 cm, B) Θ_g a los 15 cm y C) R_p .

La representación de las estimaciones de Θ_g y R_p muestran que la mayor parte del área experimental del sistema convencional presenta valores por debajo de 1 % de Θ_g, en la capa superficial de 5 cm de profundidad; mientras que en la capa de 15 cm los valores de Θ_g oscilaron de 0.5 a 1.0 %, con algunos pequeños islotes o agregados cuyos valores de la variable fueron de 2.0 % (Figura 4 a y b). En el caso de R_p, sus valores estuvieron prácticamente por debajo de 1.0 MPa en toda el área experimental, con algunos pequeños agregados en la parte sur del área cuyos valores oscilaron de 1.2 a 3.2 MPa (Figura 4 c).

1.6 CONCLUSIONES

1. Los resultados evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas evaluados, con mayores valores de R_p y mayores niveles de humedad en el sistema regenerativo (SAR) en comparación con el sistema convencional (SAC). Lo cual evidencia los cambios en las propiedades del suelo según el sistema de manejo aplicado.
2. El laboreo de los suelos agrícolas produce, en la mayoría de los casos, un deterioro de las propiedades edafológicas del mismo y una baja en su productividad. Por tanto, incorporar buenas prácticas regenerativas en el manejo de los suelos, tales como la siembra directa y el mantenimiento de los residuos de cultivo sobre la superficie del suelo, es una manera de mejorar el manejo de la humedad e incrementar su conservación en el perfil.
3. Con base en lo anterior, se ha constatado en este trabajo que los parámetros de suelo (Θ_g y R_p) evaluados, presentaron un buen nivel de dependencia espacial, especialmente en el sistema SAR, sugiriendo la necesidad de considerar la variabilidad espacial en áreas experimentales. La aplicación de la geoestadística para la caracterización espacial de los parámetros de suelo representa una ayuda importante para interpretar los resultados de los ensayos que se realizan en las áreas experimentales. Por tanto, la distribución de las variables estudiadas, reflejada en los mapas, pudiera influir sobre la variabilidad del rendimiento. No obstante, la variación del rendimiento de los cultivos depende de un conjunto de factores y los parámetros de suelo sólo representan uno de ellos.

CAPÍTULO II. ANÁLISIS DE INDICADORES FÍSICOS DEL SUELO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS DE RIEGO Y SU IMPACTO PRODUCTIVO

2.1 RESUMEN

Las buenas prácticas de manejo del suelo buscan optimizar las propiedades físicas en la zona radicular de las plantas, como la estructura, porosidad, infiltración y retención de agua, fundamentales para un manejo sustentable y regenerativo del recurso. Este estudio tuvo como objetivo analizar los cambios en indicadores físicos del suelo bajo dos sistemas agrícolas, y su impacto en el rendimiento de cultivos de primavera-verano (PV) y otoño-invierno (OI). Bajo condiciones de riego en Pabellón, Ags., se compararon: 1) un sistema de agricultura convencional (SAC), basado en barbecho, rastra y monocultivo; y 2) un sistema de agricultura regenerativa (SAR), con siembra directa, camas de cultivo, alta densidad de siembra, rotación de cultivos (gramíneas, leguminosas y oleaginosas en PV; cereales y leguminosas en OI) y cobertura vegetal permanente. Cada unidad experimental abarcó 4,000 m². Se evaluaron propiedades físicas y químicas del suelo: resistencia a la penetración (R_p), densidad aparente (ρ_b), porosidad total (f_T), conductividad hidráulica (K), sortividad (S_o), humedad gravimétrica (Θ_g), temperatura del suelo (T_s), materia orgánica (M_O), carbono orgánico (CO) y humedad aprovechable (Θ_a). También se registraron los rendimientos de los cultivos ($\hat{Y}_{m,G,S,F,T,A,T}$) en ambos ciclos. El análisis estadístico incluyó estadística descriptiva, correlación y regresiones simples. Los resultados mostraron a K, f_T y Θ_a como indicadores importantes, estrechamente relacionados con el rendimiento agrícola. Se concluye que el SAR mejora significativamente las propiedades del suelo y la productividad, destacando el valor de las prácticas agrícolas sostenibles para conservar y regenerar el recurso edáfico a largo plazo.

Palabras clave: Porosidad, conductividad hidráulica, estructura, agricultura regenerativa.

2.2 ABSTRACT

Good soil management practices aim to optimize the physical properties in the plant root zone, such as structure, porosity, infiltration, and water retention, which are essential for sustainable and regenerative resource management. This study aimed to analyze the changes in soil physical indicators under two agricultural systems and their impact on crop yields during the spring–summer (PV) and fall–winter (OI) cycles. Under irrigation conditions in Pabellón, Ags., two systems were compared: (1) a conventional agricultural system (SAC), based on fallowing, harrowing, and monoculture; and (2) a regenerative agricultural system (SAR), characterized by direct seeding, raised beds, high planting density, crop rotation (grasses, legumes, and oilseeds in PV; cereals and legumes in OI), and permanent vegetative cover. Each experimental unit covered 4,000 m². Soil's physical and chemical properties were evaluated: penetration resistance (R_p), bulk density (ρ_b), total porosity (f_T), hydraulic conductivity (K), sorptivity (S_o), gravimetric moisture (Θ_g), soil temperature (T_s), organic matter (M_O), organic carbon (CO), and available water content (Θ_a). Crop yields ($\hat{Y}_{m,G,S,F,T,A,T}$) were also recorded in both cycles. Statistical analysis included descriptive statistics, correlation, and simple regressions. Results identified K, f_T, and Θ_a as important indicators, closely related to agricultural yield. It is concluded that SAR significantly improves soil properties and productivity, highlighting the value of sustainable agricultural practices for conserving and regenerating soil resources in the long term.

Keywords: Porosity, conductivity, structure, regenerative agriculture.

2.3 INTRODUCCIÓN

El suelo constituye un recurso natural indispensable y un sistema altamente complejo que sustenta los procesos productivos, ecológicos y económicos. Sin embargo, debido a su amplia variabilidad física, química y biológica dificulta establecer un único indicador genérico que permita evaluar de manera integral su calidad y funcionalidad (Bedolla-Rivera *et al*., 2020).

La agricultura convencional ha dependido durante mucho tiempo de la labranza intensiva y el suministro de insumos externos como estrategias para aumentar la fertilidad del suelo y mejorar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, estas prácticas han generado efectos adversos significativos: la labranza intensiva contribuye a la compactación del suelo, la pérdida de biodiversidad y la contaminación del suelo y del agua debido al uso excesivo de agroquímicos, además de favorecer el incremento de la erosión hídrica y eólica (Reyes-Palomino & Cano, 2022; Martínez-Valderrama *et al*., 2023; Fundación Humanitaria, 2024). Investigaciones recientes han documentado que las prácticas agrícolas intensivas, como la labranza recurrente, conducen a la degradación del suelo, afectando su calidad física, lo que a su vez compromete la capacidad de drenaje y la conductividad hídrica del mismo (Valdez-Galvez *et al*., 2023).

En contraste, el sistema de agricultura regenerativa (SAR) representa un modelo de producción agrícola distinto al sistema de agricultura convencional (SAC), constituyendo una alternativa para el manejo sostenible del suelo (Breña, 2021). Entre sus principales beneficios se encuentran la restauración y mejora de la salud del suelo, el fomento de la biodiversidad y el aumento de la resiliencia de los ecosistemas agrícolas, sin comprometer la productividad ni la sostenibilidad a largo plazo. Además, contribuye al incremento del contenido de materia orgánica en la capa superficial del suelo, mejora su estabilidad estructural, aumenta la capacidad de retención de agua, y reduce el escurrimiento superficial y la generación de sedimentos. Estos efectos contribuyen a una mejora en la calidad física de los suelos agrícolas y en el entorno en general (Lal, 2020b).

Una estrategia para evaluar los cambios en la calidad física del suelo derivados del SAR a mediano y largo plazo consiste en el uso de índices de calidad de suelo (iCS), los cuales se basan en indicadores específicos relacionados con variaciones en la calidad física del suelo (Bedolla-Rivera *et al*., 2020). Estos indicadores deben ser fácilmente medibles, incluso para los cambios más sensibles provocados por las buenas prácticas de manejo del suelo promovidas por el SAR. Los

iCS permiten cuantificar magnitudes que explican la calidad del suelo, constituyendo una herramienta práctica orientada hacia la promoción de la sostenibilidad y la resiliencia ambiental (Breña, 2021, Northrup *et al*., 2021).

Los indicadores pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que son medibles y que afectan la capacidad del suelo para desempeñar sus funciones (Castillo-Valdez *et al*., 2021). Los cambios en los atributos físicos del suelo asociados con las prácticas de labranza suelen manifestar síntomas que comparten una causa común: el deterioro de la estructura del suelo. Esta propiedad y su estabilidad son fundamentales en una serie de procesos físicos, tales como la infiltración, la retención de humedad, la estabilidad a la erosión, la penetración de raíces, la aireación y resistencia a la penetración, entre otros. Por lo tanto, el deterioro de su integridad contribuye a la degradación del suelo, lo que resulta en una disminución de la productividad de los cultivos y de la estabilidad ecológica (Martínez-Gamiño *et al*., 2019, Núñez-Peñaloza *et al*., 2023).

Los indicadores son herramientas clave para la toma de decisiones en el manejo y uso del suelo a nivel parcelario, local y regional. A través de su integración, se obtienen los iCS, que son variables numéricas que permiten una evaluación precisa y confiable de la calidad del suelo mediante métodos estadísticos, como el conjunto mínimo de datos (CMD), la regresión lineal (factor simple) y el análisis multivariado que comprende el análisis de componentes principales (ACP) entre otros (Bedolla-Rivera *et al*., 2020). Diversos parámetros físicos, químicos y biológicos han sido incluidos en investigaciones sobre la calidad de suelo a nivel global. Sin embargo, la integración de estos iCS sigue siendo limitada e incierta, constituyendo un desafío pendiente en el campo de investigación.

La hipótesis de este estudio fue que la implementación de buenas prácticas de manejo que integra el SAR mejora significativamente los indicadores físicos del suelo, como la estructura, la porosidad, conductividad hidráulica y la capacidad de retención de agua, lo que, a su vez, incrementa la productividad agrícola en comparación con las prácticas convencionales del SAC. Por lo tanto, el objetivo fue analizar los cambios en los indicadores físicos del suelo bajo dos sistemas agrícolas y evaluar su impacto productivo, con el fin de determinar cómo las buenas prácticas de manejo pueden mejorar la salud del suelo y optimizar el rendimiento de los cultivos en el mediano y largo plazo.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en el Campo Experimental Pabellón de INIFAP, Aguascalientes, situado en las coordenadas 22º11' Norte y 102º20' Oeste. El sitio se ubica a una altitud de 1,969 msnm. El suelo del sitio experimental es de tipo Xerosol, limitado en el subsuelo por tepetate, principalmente en la fase dúrica y más localizadamente la dúrica profunda, con clase textural media (migajón-arenoso), pH alcalino de 7.9, con ±1 % de materia orgánica y la pendiente del terreno varía de 1 a 2 % (INEGI, 2007).

El clima predominante en la región es semiárido cálido [BS1 kw (w) (e)], según la clasificación climática de Köppen. La temperatura media anual es de 16.7 °C, con una máxima anual promedio de 20 °C y una mínima de 13.2 °C. La precipitación pluvial acumulada anual oscila entre 400 y 450 mm, concentrándose en un régimen de lluvias en verano que representan aproximadamente el 95 % del total anual, mientras que la precipitación invernal es inferior al 5 % del registro anual. Este patrón climático corresponde a un verano cálido, característico de las regiones semiáridas cálidas (Medina *et al*., 2006).

Durante el ciclo otoño-invierno (OI) de 2023, se estableció un experimento a largo plazo en un área de 8,000 m², inicialmente sembrada con triticale (*Triticum aestivum*) de hábito de crecimiento primaveral. Este cereal produjo dos cortes de forraje, ambos utilizados en la alimentación del ganado lechero. Posteriormente, el área se dividió en dos parcelas de igual tamaño (40 m × 100 m) para evaluar, bajo condiciones de riego, dos sistemas agrícolas: 1) el sistema de agricultura convencional (SAC), que incluyó un barbecho, una rastra y el monocultivo, y 2) el sistema de agricultura regenerativa (SAR), que consideró buenas prácticas agronómicas: siembra directa, métodos de siembra, densidad de siembra, rotación de cultivos (gramíneas-leguminosas-oleaginosas) de primavera-verano (PV) y cereales-leguminosas de OI que mantuvieron una cobertura permanente.

En ambos sistemas de manejo, durante PV 2024, fueron evaluados cuatro cultivos (maíz, frijol, sorgo y girasol) para la producción de grano y forraje en un esquema de rotación con cultivos de granos pequeños (triticale de corte o facultativo, avena y trigo) de OI. En SAC, los cereales se

manejaron como monocultivos y en SAR, se asociaron con trébol alejandrino (*Trifolium alexandrinum* L.). Cada unidad experimental tuvo una extensión de 4,000 m^2. El terreno del SAC se barbechó y rastreó antes de la siembra para incorporar los residuos del cultivo anterior, mientras que en el SAR sólo se preparó la línea de siembra con un paso de cincel para enterrar la semilla, los residuos vegetales no se incorporaron y quedaron sobre la superficie, cubriendo al suelo como un mantillo.

En los dos sistemas agrícolas evaluados, los cultivos de PV y OI se establecieron bajo un esquema de cultivos en franjas e intercalados (Castaños, 2015). Este diseño consistió en la siembra simultánea de los cuatro cultivos de PV y de los cereales de grano pequeño en OI. En el SAC, cada cultivo se sembró de forma individual, mientras que en el SAR se combinaron de manera asociada, todo ello dentro del mismo terreno de cada unidad experimental, aunque dispuestos en franjas amplias e intercaladas que permitieron el manejo independiente de cada cultivo, pero vecinos.

2.4.1 Métodos de siembra

La siembra de los cultivos de PV se realizó con maquinaria, bajo condiciones de riego el día 17 de junio de 2024. Los métodos de siembra evaluados en los dos sistemas de manejo fueron: a) En SAC, surcos de 0.76 m sembrados en hilera sencilla con una sembradora de precisión, y b) En SAR, camas de 1.6 m de ancho a 4 y 6 hileras con separación entre ellas de 30 y 20 cm respectivamente. Se utilizaron dos sembradoras de precisión para la siembra en camas, una de granos de tamaño medio y otra para granos de tamaño pequeños diseñadas por el Programa de mecanización del Campo Experimental Pabellón del INIFAP (Rojas *et al*., 2013, García *et al*., 2018). En los cultivos de OI la siembra se realizó con maquinaria, el día 17 de diciembre de 2024. Los métodos de siembra evaluados fueron: c) En SAC, la siembra se realizó al voleo con un equipo boleador de semillas y fertilizantes granulados y d) En SAR, la siembra de cereales se realizó con la sembradora de precisión de granos pequeños para siembra en camas a 6 hileras diseñada por el INIFAP.

2.4.2 Densidad de siembra

En los dos sistemas de manejo evaluados, se establecieron las siguientes densidades de población: i) En SAC, el maíz y girasol se sembró la cantidad de semilla suficiente para lograr una densidad de población aproximada de 80 mil plantas por hectárea (pl ha^{-1}), en frijol 90 mil pl ha^{-1} y en sorgo 250 mil pl ha^{-1}, y ii) En SAR, el maíz y girasol se sembraron 110 mil pl ha^{-1}, en frijol 170 mil pl ha^{-1} y en sorgo 372 mil pl ha^{-1}. En el caso de los cultivos de OI se manejaron las siguientes densidades de población: iii) En SAC, los cereales (triticales, avena y trigo) se usó una densidad de siembra de 120 kg ha^{-1} en todos los casos, y iv) En SAR, todos los cereales se asociaron con trébol alejandrino, cuya densidad fue 90 kg ha^{-1} de cada cereal y 30 kg ha^{-1} de trébol alejandrino, sumando 120 kg ha^{-1} por mezcla.

2.4.3 Fertilización

Los cultivos de PV en el SAC se fertilizaron al momento de la siembra con la dosis base de 50-60-00 kg ha^{-1} (NPK), y en la escarda se aplicaron 50 kg ha^{-1} de N a través del riego por cintilla. En el caso de SAR, antes de la siembra de todos los cultivos, se aplicaron 5 t ha^{-1} de estiércol de bovino seco mezclado con Clorpirifos etil, insecticida granulado para el control de plagas del suelo; no se aplicó ninguna fertilización base y solo en la etapa de floración del maíz y sorgo se aplicó una dosis de 5 L ha^{-1} de fertilizante orgánico (Actyguano) a través del riego. En el caso del frijol este producto orgánico se aplicó de manera foliar durante la formación de vaina y el llenado de grano, se hicieron dos aplicaciones de 5 L ha^{-1} cada una. En el SAC, los cultivos de OI al igual que los de PV se fertilizaron al momento de siembra con la dosis base de 40-40-00 kg ha^{-1} de NPK y en la etapa de floración se aplicaron 40 kg ha^{-1} de N a través del riego por cintilla. En el caso de SAR, no se aplicó ninguna fertilización base; solo en las etapas vegetativa, de floración y de llenado de grano, se hicieron aplicaciones de 5 L ha^{-1} de fertilizante orgánico a través del riego en cada cultivo.

2.4.4 Control de maleza en cultivos de maíz, girasol, sorgo y frijol

Para mantener los cultivos de maíz, girasol y sorgo libres de maleza durante los primeros 40 días, en el (SAC) se realizó una escarda y una limpieza manual. En el caso del frijol, además de estas prácticas, se aplicó una mezcla de herbicidas con aspersor de mochila: Fomesafen (para maleza de hoja ancha) y *Fluazifop-P-butil* (para maleza de hoja angosta), a una dosis de 1 L ha^{-1}; en el maíz

y sorgo se hizo una aplicación de Mesotrione y Atrazina (para maleza de hoja ancha y angosta), a una dosis de 1 L ha^{-1}; el volumen de la mezcla de ambos productos con agua fue de 250 L ha^{-1}, asperjados al follaje.

En el (SAR), los cultivos no fueron escardados. El control de maleza se realizó mediante limpieza manual en el girasol, y en los demás cultivos, la limpieza manual se acompañó de una aplicación de herbicida postemergente, cuyos productos y dosis ya fueron mencionados anteriormente. En los cultivos de OI, no se realizaron aplicaciones de herbicidas para ninguno de los cereales.

2.4.5 Control de plagas en cultivos de PV y OI

Para el control de plagas en los cultivos de maíz, sorgo, girasol y frijol evaluados en los dos sistemas de manejo, se aplicaron insecticidas específicos según la plaga objetivo: en maíz y sorgo se aplicó clorantraniliprol a 75 ml ha^{-1} para controlar el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*); en girasol no se realizaron aplicaciones de insecticidas y en frijol se realizaron tres aplicaciones de dimetoato a 1 L ha^{-1} para controlar la chicharrita (*Empoasca kraemeri*) y la mosquita blanca (*Trialeurodes sp.*). En los cultivos de OI no se hicieron aplicaciones de insecticidas en ninguno de los cultivos evaluados en ambos sistemas de manejo.

2.4.6 Cosecha de los cultivos de PV y OI

En los cultivos de PV la cosecha del frijol se realizó de manera manual, cuando el grano presentó aproximadamente 14 % de humedad. En contraste, los cultivos de maíz, sorgo y girasol para forraje fueron cosechados cuando el grano alcanzó un estado de madurez lechoso-masoso. En los cultivos de OI, el triticale produjo dos cortes: el primero a los 80 días después de la siembra (dds) en etapa vegetativa, y el segundo a los 125 dds en etapa de formación de grano. Por su parte, la avena y el trigo generaron un solo corte, cosechados en estado de madurez lechoso-masoso. En ambos ciclos, se tomaron 10 muestras por cultivo en los dos sistemas de manejo para la evaluación de rendimiento.

Para la toma de muestras, se empleó un muestreo sistemático estratificado, en el cual se trazó un transecto de 100 m de longitud en el centro de cada unidad experimental. A lo largo del transecto, se ubicaron diez puntos de muestreo, espaciados a intervalos de 10 metros. En cada punto, se cosecharon dos surcos de 0.76 m de ancho y de dos m de longitud en el SAC; En el SAR la siembra

en camas, se cosecho una de 1.52 m de ancho con 4 y 6 hileras de dos m de longitud. En ambos sistemas de manejo, en cada punto de muestreo se cosechó un área equivalente a 3.04 m^2.

2.4.7 Medición de las propiedades del suelo

Posterior a la cosecha de los cultivos de PV y de OI, en cada punto de muestreo, en la capa superficial del suelo a 0-10 cm de profundidad, se determinaron las propiedades físicas en los dos sistemas de manejo. La densidad aparente (ρ_b) se determinó mediante el método del cilindro de volumen conocido (Grossman y Reinsch, 2002); la porosidad total (f_T) se estimó con base en la densidad real (ρ_s) igual a 2.65 Mg m^{-3}; el contenido de humedad (Θ_g) y la temperatura (T_s) se midieron con el WET Sensor type WET-2; la resistencia a la penetración (R_p) se midió con un penetrómetro de impacto de punta cónica (CIMMYT, 2013); la conductividad hidráulica (K) y la sortividad (S_o) se midieron a través del uso del minidisco infiltrómetro, que permite controlar la tensión de suministro de agua a humedades cercanas a saturación.

Adicionalmente se determinó el contenido de materia orgánica (*MO*) mediante la técnica de calcinación (Sadzawka *et al*., 2006) y el carbón orgánico (*CO*) se determinó a partir de la materia orgánica, utilizando la ecuación:

$$\% CO = \% MO / 1.724$$

Donde:

% *CO* = el porcentaje de carbón orgánico,

% *MO* = el porcentaje de materia orgánica,

1.724 = factor de conversión que se basa en la suposición de que la *MO* contiene un 58 % de *CO*.

2.4.8 Análisis Estadístico

En los dos ciclos de cultivo (PV y OI) se determinaron las estadísticas descriptivas básicas (media, mediana, desviación estándar, máximo, mínimo, coeficiente de asimetría, kurtosis y coeficiente de variación). Después, se realizaron análisis de correlación por pares entre parámetros. En el ciclo PV se evaluaron siete atributos de suelo, medidos a 0-10 cm de profundidad, junto con rendimiento de biomasa verde, materia seca y altura de planta de girasol, maíz y sorgo, y rendimiento de grano

y paja del frijol. Para el ciclo OI, se analizaron diez atributos de suelo y el rendimiento de los cuatro cultivos forrajeros (triticale de corte intermedio y tardío, avena y trigo). Ambos análisis de correlación se realizaron usando datos estandarizados (con media cero y varianza unitaria), debido a que las variables tenían unidades distintas. Asimismo, se aplicó un análisis de regresión simple, con el rendimiento de los cultivos como variables dependientes y los atributos del suelo como independientes. El software utilizado fue el Statistical Analysis System, versión 9.4_M8 (2025).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos refuerzan la hipótesis de que los indicadores físicos del suelo, como la densidad aparente, la capacidad de retención de agua y la infiltración, entre otros, no solo reflejan su estado de salud, sino que también se vinculan directamente con el rendimiento de los cultivos. Además, demuestran que el análisis integrado de propiedades físicas y químicas permite una evaluación más completa y útil del efecto de los dos sistemas agrícolas estudiados, y aporta evidencia para orientar prácticas agronómicas hacia la sostenibilidad y la mejora productiva (Monsalve *et al*., 2021.

2.5.1 Variabilidad de las propiedades físicas del suelo y producción de cultivos PV

El conocimiento de la variabilidad en las propiedades del suelo es fundamental para diseñar buenas prácticas de manejo diferenciadas y más eficientes. Para clasificar dicha variabilidad se empleó el coeficiente de variación (CV) en tres categorías: baja (CV < 15 %), moderada (CV entre 15 y < 35 %) y alta (CV > 35 %). Este enfoque permite definir con claridad la heterogeneidad del suelo y, por ende, adaptar las estrategias agronómicas según las condiciones específicas de cada unidad experimental (Hidalgo-Campos & Camacho-Umaña, 2024).

Las propiedades del suelo que presentaron coeficientes de variación (CV) mayores de 35 % en ambos sistemas agrícolas (SAR y SAC) fueron: la S_o para los cuatro cultivos (girasol, frijol, maíz y sorgo) evaluados en PV; para R_p tres cultivos (girasol, frijol y maíz) y para Θ_g (girasol, frijol y sorgo); y K solo fue para frijol y sorgo, lo que indicó una mayor variación espacial de éstos en el área donde se ubicaron las dos unidades experimentales. Los coeficientes de variación de las propiedades físicas f_T, T_s, y ρ_b fueron los más bajos, cuyos valores oscilaron entre 10.31 y 3.5 %

para todos los casos, los cuales podrían interpretarse como una distribución más uniforme. Para el rendimiento de biomasa verde, materia seca y altura de planta, rendimiento de grano y paja de los cultivos evaluados: girasol ($\hat{Y}_{G\ mv}$ y $\hat{Y}_{G\ ms}$), maíz ($\hat{Y}_{MZ\ mv}$ y $\hat{Y}_{MZ\ ms}$), sorgo ($\hat{Y}_{So\ mv}$ y $\hat{Y}_{S\ oms}$) y de frijol ($\hat{Y}_{Fg}$ y $\hat{Y}_{Fms}$), los coeficientes fueron de bajos a altos, con un rango de 8.9 a > 35 %. Otras estadísticas tales como: mínimo, máximo, media, mediana y la desviación estándar se muestran en los Cuadros 2, 3, 4 y 5.

Cuadro 2. Estadística descriptiva de las variables en girasol.

Sistema	Propiedad	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DS	CV (%)
SAR	R_p (Mpa)	10	0.10	0.57	0.31	0.28	0.14	46.29
SAC			0.29	1.91	0.70	0.62	0.46	66.50
SAR	ρ_b (Mg m^{-3})	10	0.91	1.29	1.06	1.29	0.09	8.76
SAC			0.20	1.38	1.30	1.29	0.06	4.43
SAR	f_T(%)	10	51.23	65.84	60.00	51.23	3.50	5.84
SAC			48.00	54.63	51.12	51.28	2.17	4.24
SAR	K (cm h$^{-1)}$	10	1.52	7.89	3.38	7.89	0.66	19.65
SAC			1.08	9.50	2.93	2.56	2.45	83.6
SAR	So (cm h$^{-½}$)	10	0.56	4.93	3.29	3.29	1.25	37.87
SAC			0.02	3.32	1.89	1.76	1.12	58.95
SAR	T_s (° C)	10	27.40	37.5	31.54	31.3	2.77	8.78
SAC			32.2	37.7	35.73	35.6	1.55	4.33
SAR	Θ_g (%)	10	2.60	10.10	4.64	3.85	2.25	48.57
SAC			1.10	5.00	2.32	2.15	1.17	50.5
SAR	$\hat{Y}_G$ ms (t ha^{-1})	10	4.00	11.56	6.33	6.89	2.25	35.58
SAC			1.24	4.87	2.76	2.21	1.22	44.22
SAR	$\hat{Y}_G$ mv t ha^{-1}	10	22.90	47.00	31.9	29.70	8.4	26.3
SAC			6.41	23.52	13.35	10.94	6.31	47.24
SAR	A_p (m)	10	2.05	2.60	2.29	2.25	0.18	7.96
SAC			2.10	2.60	2.34	2.33	0.17	7.35

SAR- sistema de agricultura regenerativa; SAC- sistema de agricultura convencional, R_p**- resistencia a la penetración,** ρ_b **- densidad aparente,** f_T **- porosidad,** K**-conductividad hidráulica,** S_o **- sortividad,** $\hat{Y}_G$ ms**- rendimiento materia seca,** $\hat{Y}_G$ mv **- rendimiento materia verde,** Ts**- temperatura de suelo,** Θ_g **- humedad gravimétrica,** A_p **- altura de planta, DS- desviación estándar, CV- coeficiente de variación.**

Cuadro 3. Estadística descriptiva de las variables en frijol.

Sistema	Propiedad	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DS	CV (%)
SAR	R_p (Mpa)	10	0.29	0.76	0.43	0.33	0.18	42.23
SAC			0.29	1.34	0.78	0.81	0.35	44.08
SAR	ρ_b (Mg m^{-3})	10	1.14	1.33	1.23	1.22	0.05	4.35
SAC			1.28	1.45	1.39	1.39	0.05	3.95
SAR	f_T (%)	10	49.99	56.99	53.72	53.99	2.01	3.75
SAC			45.12	51.53	47.73	47.42	2.07	4.33
SAR	K (cm h^{-1})	10	0.87	6.27	3.14	3.20	1.46	46.59
SAC			1.26	5.88	3.39	3.19	1.90	55.87
SAR	S_o (cm h$^{-½}$)	10	0.88	5.42	2.36	1.77	1.46	61.95
SAC			0.28	4.31	2.53	2.70	1.11	44.08
SAR	T_s(° C)	10	24.40	31.00	28.63	29.00	2.09	7.29
SAC			33.2	37.10	34.47	34.00	1.34	3.90
SAR	Θ_g(%)	10	3.10	10.3	5.48	4.35	2.56	46.77
SAC			1.20	5.00	3.00	3.15	1.27	42.28
SAR	$\hat{Y}_{Fg}$ (t ha^{-1})	10	3.34	5.47	4.28	4.25	0.72	16.72
SAC			1.62	4.34	3.06	3.31	0.90	29.25
SAR	$\hat{Y}_{Fp}$ (t ha^{-1})	10	2.14	3.45	2.83	2.63	0.53	18.75
SAC			1.32	2.80	1.96	1.97	0.53	27.00

SAR- sistema de agricultura regenerativa; SAC- sistema de agricultura convencional, R_p -resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, $\hat{Y}$ Fg- rendimiento de grano, $\hat{Y}$ Fp- rendimiento de paja, T_s- temperatura de suelo, Θ_g - humedad gravimétrica, DS- Desviación estándar, CV- Coeficiente de Variación.

Cuadro 4. Estadística descriptiva de las variables en maíz.

Sistema	Propiedad	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DS	CV (%)
SAR	R_p (Mpa)	10	0.19	0.96	0.45	0.38	0.25	55.89
SAC			0.19	1.24	0.55	0.57	0.33	60.17
SAR	ρ_b (Mg m^{-3})	10	1.08	1.35	1.20	1.21	0.10	8.43
SAC			1.18	1.47	1.36	1.36	0.09	6.34
SAR	f_T(%)	10	48.94	59.37	54.64	54.39	3.82	7.00
SAC			44.70	55.61	48.82	48.62	3.25	6.65
SAR	K (cm h$^{-1)}$	10	2.30	4.94	3.56	3.14	1.02	28.58
SAC			0.89	3.28	2.28	2.46	0.73	31.83
SAR	S_o (cm h-^{½})	10	0.01	5.48	2.55	2.53	1.38	54.19
SAC			0.68	2.98	1.83	1.84	0.85	46.53
SAR	T_s (°C)	10	28.90	32.6	30.43	30.3	1.09	3.59
SAC			30.9	35.50	32.64	32.45	1.39	4.26
SAR	Θ_g (%)	10	1.70	5.60	3.94	4.05	1.01	25.55
SAC			2.00	5.70	3.35	3.10	1.13	33.81
SAR	$\hat{Y}_M$ ms (t ha^{-1})	10	8.62	16.09	12.24	12.68	2.22	18.10
SAC			9.49	20.09	14.50	15.29	3.68	25.38
SAR	$\hat{Y}_M$ mv (t ha^{-1})	10	32.24	53.45	45.19	47.36	6.74	14.90
SAC			30.10	72.86	51.00	47.04	13.37	26.21
SAR	A_p (m)	10	1.80	2.80	2.38	2.45	0.32	13.4
SAC			2.95	3.50	3.08	2.95	0.19	6.30

SAR- sistema de agricultura regenerativa; SAC- sistema de agricultura convencional, R_P **- resistencia a la penetración,** ρ_b **- densidad aparente,** f_T **- porosidad,** K **-conductividad hidráulica,** S_o **- sortividad,** $\hat{Y}_M$ ms**- rendimiento materia seca ,** $\hat{Y}_M$ mv **- rendimiento materia verde ,** Ts**- temperatura de suelo,** Θ_g **- humedad gravimétrica,** A_p **- altura de planta, DS- desviación estándar, CV- coeficiente de Variación.**

Cuadro 5. Estadística descriptiva de las variables en sorgo.

Sistema	Propiedad	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DS	CV (%)
SAR	R_p (Mpa)	10	0.29	1.05	0.44	0.38	0.23	53.40
SAC			0.29	0.57	0.43	0.43	0.08	18.89
SAR	ρ_b (Mg m^{-3})	10	0.88	1.11	1.01	1.03	0.08	7.50
SAC			1.16	1.33	1.24	1.24	0.05	4.09
SAR	f_T(%)	10	57.93	66.76	61.74	61.15	2.88	4.67
SAC			49.86	56.33	53.07	53.23	1.92	3.62
SAR	K (cm h$^{-1)}$	10	1.06	6.41	2.97	2.87	1.48	49.76
SAC			1.57	8.22	3.52	2.80	2.27	64.42
SAR	S_o (cm h-^{½})	10	0.42	4.82	2.47	2.43	1.36	55.13
SAC			0.50	2.83	1.84	1.99	0.73	39.67
SAR	T_s (° C)	10	24.80	31.20	28.75	29.10	1.85	6.43
SAC			27.00	38.00	31.34	31.50	3.23	10.31
SAR	Θ_g (%)	10	2.30	7.70	4.04	3.95	1.56	38.53
SAC			1.30	6.90	4.56	4.50	1.86	40.70
SAR	$\hat{Y}_S$ ms (t ha^{-1})	10	5.57	15.32	10.82	10.59	2.63	24.35
SAC			4.67	17.61	10.33	9.49	3.91	37.88
SAR	$\hat{Y}_S$ mv (t ha^{-1})	10	26.81	35.86	31.43	31.66	2.82	8.96
SAC			12.17	45.23	28.03	28.37	10.28	36.00
SAR	A_p (m)	10	1.45	1.90	1.75	1.80	0.14	7.93
SAC			1.50	1.85	1.71	1.73	0.10	5.57

SAR- sistema de agricultura regenerativa; SAC- sistema de agricultura convencional, R_p **- resistencia a la penetración,** ρ_b **- densidad aparente,** f **- porosidad,** K **-conductividad hidráulica,** S_o **- sortividad,** $\hat{Y}_S$ ms**- rendimiento materia seca,** $\hat{Y}_S$ mv **- rendimiento materia verde, Ts- temperatura de suelo,** Θ_g **- humedad gravimétrica,** A_p **- altura de planta, DS- desviación estándar, CV- coeficiente de Variación.**

2.5.2 Análisis de correlación entre propiedades de suelo y planta en los dos sistemas agrícolas evaluados

Se realizaron análisis de correlación por pares entre 10 atributos (siete del suelo, físicos e hidráulicos, medidos a 0–10 cm de profundidad), dos de rendimiento y uno de altura de cultivos de PV, cultivados en las unidades experimentales de ambos sistemas agrícolas. De los 55 pares posibles de variables en cada sistema y cultivo, en el sistema SAR se identificaron correlaciones medianamente altas en: girasol 10, maíz 9, sorgo15 y frijol 4. En el SAC, los resultados fueron: 9, 5, 6 y 11, para girasol, maíz, sorgo y frijol respectivamente. La ρ_b tuvo una correlación negativa (ρ = -1.0) alta con f_T en ambos sistemas agrícolas para todos los cultivos, aunque en sorgo el sistema convencional mostró una correlación más baja (ρ = - 0.63) y disminuyó estadísticamente con las otras variables en todos los casos. Esto indica que, sin importar el sistema una mayor compactación del suelo (ρb alta) afecta negativamente su porosidad (f_T). En consecuencia, puede afectar de forma negativa la aireación, retención de humedad y la penetración radicular del cultivo. Esto es especialmente crítico en suelos manejados con agricultura regenerativa, donde se busca una estructura óptima para la biodiversidad del suelo y su resiliencia.

Por el contrario, la K se correlacionó positivamente con f_T en ambos sistemas agrícolas para girasol, maíz, sorgo y frijol, presentando valores de ρ que variaron de 0.33 a 0.60 en SAR y de 0.29 a 0.60 en SAC. Sin embargo, K mantuvo una relación negativa moderada con ρ_b en ambos sistemas agrícolas; en SAR los valores de correlación variaron de -0.33 a -0.60 y en SAC la variación fue de -0.29 a -0.60 para los cuatro cultivos (Cuadro 6). Esto indica que, las variables físicas-hídricas (ρ_b, f_T, K) están consistentemente relacionadas en ambos sistemas, confirmando su importancia en el manejo de suelo para los cuatro cultivos. Además, las propiedades hídricas (K y S_o), térmica (T_s) y de planta (A_p, $\hat{Y}_{Gmv}$ y $\hat{Y}_{M\ ms}$) mostraron mayor sensibilidad en el SAR, evidenciando una dinámica microambiental más compleja y sostenible.

Estos resultados coinciden con los de otros estudios que destacan la fuerte influencia de la densidad aparente y la porosidad en la conductividad hidráulica del suelo (Hu *et al*., 2012; Soracco *et al*., 2010). Por ejemplo, Gamie & De Smedt (2018) encontraron que la conductividad K se relaciona negativamente con ρ_b y positivamente con porosidad, lo que respalda el patrón observado en el SAR y SAC. Asimismo, Soracco *et al*. (2010) demostraron anisotropía significativa en K según la

orientación y sistema de labranza, indicando una mayor conectividad de poros en sistemas de conservación (similar al SAR). Estos resultados refuerzan la importancia de manejar las variables físicas del suelo para promover la sustentabilidad agroambiental.

La resistencia a la penetración (R_p) se correlacionó negativamente con K (ρ = -0.78) y $\hat{Y}_{G\,mv}$ (ρ = -0.60) en el SAR en el cultivo de sorgo, mientras que en los dos sistemas evaluados (SAR y SAC) R_p se relacionó positivamente con ρ_b (ρ = 0.66 y 0.63), en los cuatro cultivos y reflejaron disminuciones significativas respecto a las otras variables. Sin embargo, en SAC, R_p mostró correlación negativa con A_p (ρ = -0.79) en maíz y con Θ_g, $\hat{Y}_{GF}$ y $\hat{Y}_{PF}$ (ρ = -0.63, -0.53 y -0.75) en frijol (Cuadro 6). En términos generales, esto indica que el SAR tiende a crear un sistema holístico, donde mejores condiciones físicas del suelo (como menor densidad, mayor porosidad y temperatura favorable) conducen a rendimientos mejores. Por el contrario, el SAC muestra relaciones más débiles. La compactación del suelo (R_p y ρ_b) ejerce un mayor impacto negativo sobre el rendimiento, lo que sugiere que otros factores (labranza, nutrientes o manejo químico) podrían predominar en este sistema. Estos resultados son congruentes con lo reportado por otros autores (Hamza & Anderson, 2005; Long *et al*., 2024; Bilibio *et al*., 2025).

Cuadro 6. Análisis de correlación entre propiedades físicas del suelo y el rendimiento de girasol, maíz, sorgo y frijol en dos sistemas agrícolas.

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAR GIRASOL

	R_p	ρ_b	f_T	K	S_o	T_s	Θ_g	$\hat{Y}$ G ms	$\hat{Y}$G mv	Ap
R_p	1.00									
ρ_b	0.23	1.00								
f_T	-0.23	-1.00	1.00							
K	-0.09	-0.60	0.60	1.00						
S_o	-0.50	-0.27	0.27	0.14	1.00					
T_s	0.50	-0.56	0.56	-0.28	0.19	1.00				
Θg	-0.18	-0.07	0.07	-0.47	-0.30	-0.50	1.00			
$\hat{Y}$ G m	-0.34	-0.38	0.38	0.46	0.22	-0.06	-0.17	1.00		
$\hat{Y}$G mv	-0.29	-0.46	0.46	0.43	-0.20	-0.01	-0.07	0.78	1.00	
Ap	-0.30	0.31	-0.31	0.54	0.14	0.05	-0.27	0.43	0.03	1.00

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAC GIRASOL

	R_p	ρb	f_T	K	S_o	T_s	Θ_g	$\hat{Y}$ G ms	$\hat{Y}$G mv	Ap
R_p	1.00									
ρ_b	0.05	1.00								
f_T	-0.05	-1.00	1.00							
K	-0.10	-0.58	0.58	1.00						
So	-0.38	0.50	-0.50	-0.38	1.00					
T_s	0.58	0.29	-0.29	-0.07	0.20	1.00				
Θ_g	-0.12	0.27	-0.27	-0.30	0.18	-0.12	1.00			
$\hat{Y}$ G ms	-0.15	-0.03	0.03	0.32	0.34	0.56	0.33	1.00		
$\hat{Y}$G mv	-0.14	-0.08	0.08	0.34	0.26	0.59	0.32	0.98	1.00	
Ap	-0.13	0.25	-0.25	-0.17	0.29	0.50	-0.02	0.30	0.23	1.00

SAR- Sistema de agricultura regenerativa, R_p -resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, $\hat{Y}_{G\,ms}$- rendimiento materia seca girasol, ŶG mv - rendimiento materia verde girasol , T_s- temperatura de suelo, Θ_g - humedad gravimétrica, A_p - altura de planta

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAR MAIZ

	R_p	ρ_b	f_T	K	S_o	T_s	Θ_g	$\hat{Y}_{M\,ms}$	$\hat{Y}_{G\,mv}$	A_p
R_p	1.00									
ρ_b	0.10	1.00								
f_T	-0.10	-1.00	1.00							
K	-0.24	0.53	-0.53	1.00						
S_o	-0.11	-0.05	0.05	-0.17	1.00					
Ts	0.25	0.54	-0.54	-0.11	0.29	1.00				
Θ_g	0.29	0.12	-0.12	0.34	-0.07	-0.19	1.00			
$\hat{Y}_{M\,ms}$	0.22	0.17	-0.17	0.66	-0.43	-0.06	0.14	1.00		
$\hat{Y}_{M\,mv}$	0.14	0.08	-0.08	0.47	-0.61	-0.04	0.11	0.88	1.00	
A_p	0.58	-0.02	0.02	-0.18	0.06	0.37	-0.32	0.29	0.13	1.00

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAC MAIZ

	R_p	ρ_b	f_T	K	S_o	T_s	Θ_g	$\hat{Y}_{M\,ms}$	$\hat{Y}_{M\,mv}$	A_p
R_p	1.00									
ρ_b	0.28	1.00								
fT	-0.28	-1.00	1.00							
K	-0.09	-0.29	0.29	1.00						
S_o	-0.46	0.08	-0.08	-0.13	1.00					
T_s	-0.02	0.19	-0.19	-0.17	-0.13	1.00				
Θ_g	-0.03	0.45	-0.45	0.07	-0.28	0.62	1.00			
$\hat{Y}_{M\,ms}$	-0.03	-0.26	0.26	-0.29	-0.10	0.35	-0.22	1.00		
$\hat{Y}_{M\,mv}$	0.02	-0.27	0.27	-0.29	0.02	0.15	-0.20	0.89	1.00	
A_p	0.79	-0.05	0.05	0.21	-0.56	0.15	-0.09	0.10	0.01	1.00

SAR- Sistema de agricultura regenerativa, R_p -resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, $\hat{Y}_{M\,ms}$- rendimiento materia seca maíz, ŶM mv - rendimiento materia verde maíz, T_s- temperatura de suelo, Θ_g - humedad gravimétrica, A_p - altura de planta,

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAR SORGO

	R_p	ρ_b	f_T	K	S_o	T_s	θ_g	Ŷ S ms	ŶS mv	Ap
R_p	1.00									
ρ_b	0.66	1.00								
f_T	-0.66	-1.00	1.00							
K	-0.78	-0.59	0.59	1.00						
S_o	-0.67	-0.36	0.36	0.34	1.00					
T_s	0.10	-0.37	0.37	-0.19	0.17	1.00				
θ_g	-0.01	0.28	-0.28	-0.41	0.61	0.40	1.00			
Ŷ S ms	-0.28	0.27	0.47	0.54	-0.10	-0.08	0.27	1.00		
ŶS mv	-0.60	-0.54	-0.27	-0.24	-0.41	0.17	0.25	0.69	1.00	
Ap	0.25	-0.38	0.38	0.42	-0.14	-0.39	-0.68	-0.63	-0.81	1.00

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAC SORGO

	R_p	ρ_b	f_T	K	S_o	T_s	θ_g	Ŷ S ms	ŶS mv	Ap
R_p	1.00									
ρ_b	0.63	1.00								
f_T	-0.63	-1.00	1.00							
K	-0.04	-0.31	0.31	1.00						
S_o	0.26	-0.12	0.12	-0.35	1.00					
T_s	0.37	-0.15	0.15	0.05	0.40	1.00				
θ_g	-0.03	0.09	-0.09	-0.39	0.02	-0.64	1.00			
Ŷ S ms	0.25	-0.22	0.22	0.02	0.32	0.34	-0.14	1.00		
ŶS mv	0.30	-0.20	0.20	-0.05	0.37	0.47	-0.15	0.98	1.00	
Ap	0.23	-0.17	0.17	-0.41	0.81	-0.16	0.48	0.19	0.17	1.00

SAR- Sistema de agricultura regenerativa, R_p -resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, $\hat{Y}_{S\,ms}$- rendimiento materia seca sorgo, $\hat{Y}_{S\,mv}$- rendimiento materia verde sorgo, T_s- temperatura de suelo, Θ_g - humedad gravimétrica, A_p - altura de planta

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAR FRIJOL

	R_p	ρ_b	f_T	K	S_o	T_s	θ_g	ŶGF	ŶPF
R_p	1.00								
ρ_b	0.32	1.00							
f_T	-0.32	-1.00	1.00						
K	-0.06	-0.33	0.33	1.00					
S_o	0.18	-0.16	0.16	-0.38	1.00				
T_s	0.39	0.22	-0.22	-0.48	0.04	1.00			
θ_g	-0.21	-0.29	-0.23	-0.07	-0.16	-0.73	1.00		
ŶGF	0.10	0.23	0.29	0.54	0.36	-0.17	-0.09	1.00	
ŶPF	-0.05	-0.09	0.09	-0.25	-0.12	-0.37	0.02	0.70	1.00

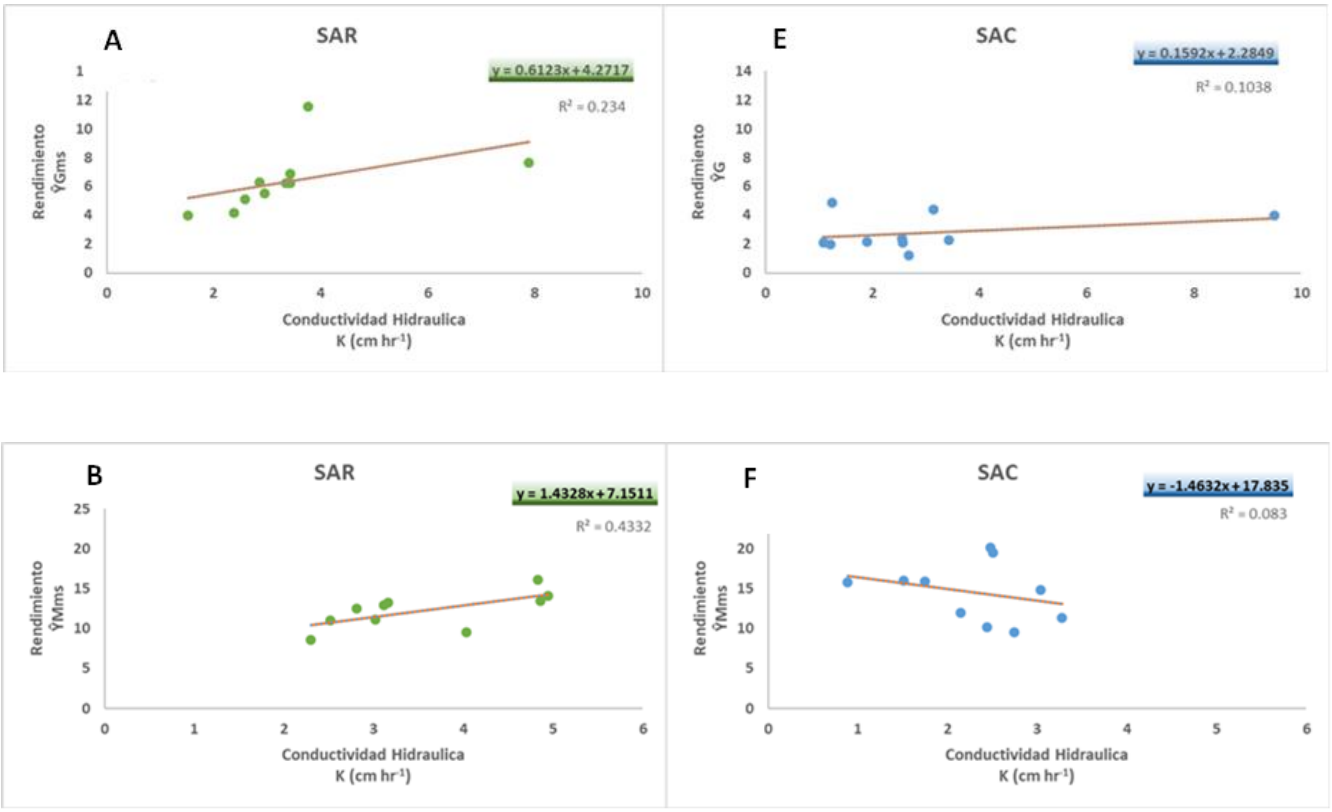
Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAC FRIJOL

	R_p	ρ_b	f_T	K	So	T_s	θ_g	ŶGF	ŶPF
R_p	1.00								
ρ_b	0.51	1.00							
f_T	-0.51	-1.00	1.00						
K	-0.69	-0.60	0.60	1.00					
S_o	0.01	0.23	-0.23	0.14	1.00				
T_s	0.23	0.03	-0.03	-0.37	0.30	1.00			
θg	-0.63	-0.59	0.59	-0.29	0.09	-0.33	1.00		
ŶGF	-0.53	-0.33	0.33	-0.45	0.71	0.17	0.39	1.00	
ŶPF	-0.75	-0.59	0.59	-0.59	0.44	0.14	0.62	0.85	1.00

SAR- Sistema de agricultura regenerativa R_p -resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, $\hat{Y}_{Fg}$- rendimiento de grano frijol, $\hat{Y}_{Fp}$- rendimiento de paja frijol, T_s- temperatura de suelo, Θ_g - humedad gravimétrica,

2.5.3 Efecto de la conductividad hidráulica (*K*) sobre el rendimiento de girasol, maíz, sorgo y frijol en PV

En los análisis de regresión lineal simple, la conductividad hidráulica (*K*) mostró una relación aceptable con el rendimiento de los cuatro cultivos evaluados en el Sistema de Agricultura Regenerativa, mientras que en el Sistema de Agricultura Convencional dicha relación fue prácticamente nula. En la Figura 5, se observa que los rendimientos de materia seca de girasol, maíz, sorgo y frijol grano en SAR muestran cierta dependencia con la *K* ($R^2 \leq 0.43$, Figura 5 a–d), en contraste con el SAC, donde la dependencia fue muy débil ($R^2 \leq 0.10$, Figura 5 e–h). Estas diferencias, aunque pequeñas y estadísticamente poco relevantes, podrían explicarse por la distribución espacial de las raíces en el SAR, que genera poros de mayor tamaño durante el ciclo anterior, los cuales podrían persistir hacia el final del ciclo de crecimiento del cultivo siguiente, debido a una estructura del suelo más estable. Esto coincide con la evidencia de que, en sistemas regenerativos, la acción de la fauna del suelo y las redes de poros continuos y estables aumentan la *K* y favorecen una mejor retención y circulación del agua (Falk *et al*., 2023).



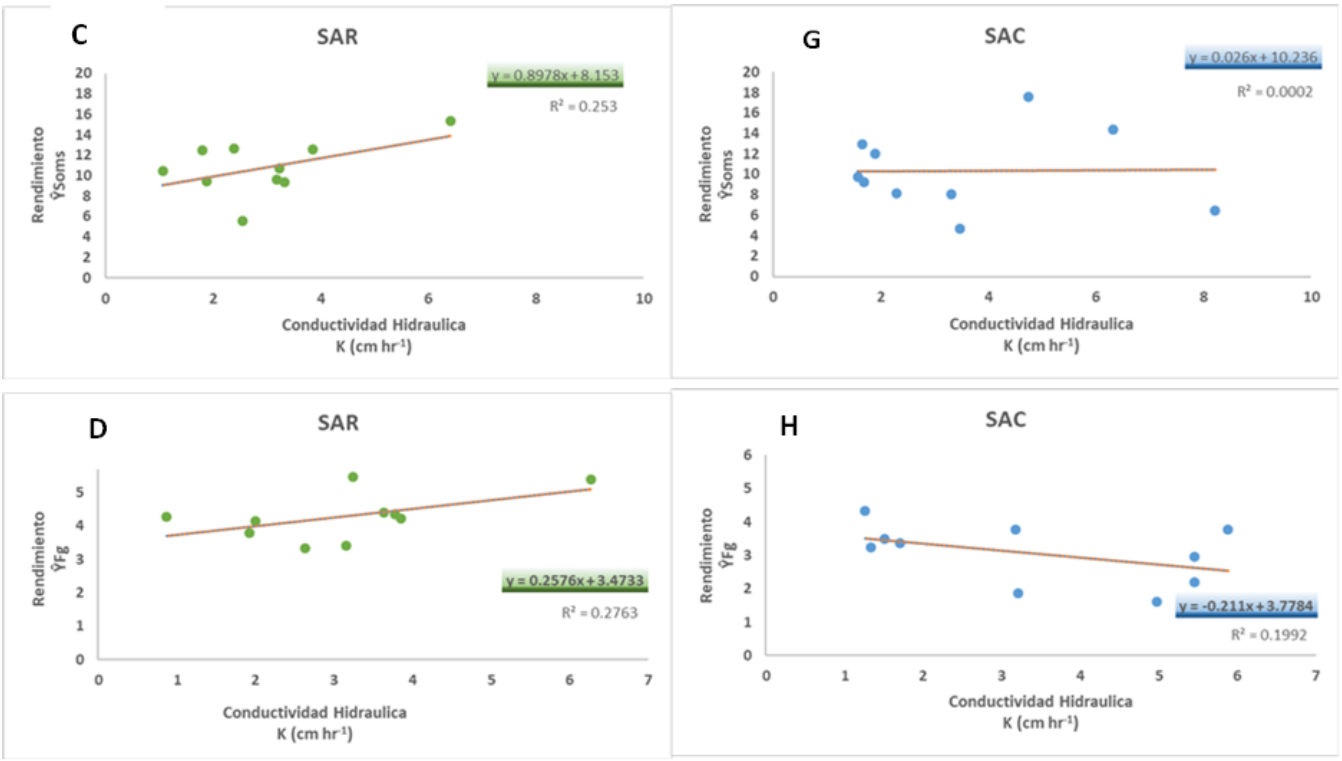


Figura 5. Relación lineal entre el rendimiento de materia seca y grano con K en los sistemas SAR y SAC, de girasol (a.e), maíz (b,f), sorgo(c,g) y frijol (d,h).

La comparación de valores de conductividad hidráulica (*K*) reportados en estudios recientes en México, corroboran la eficacia de los sistemas regenerativos para promover la formación de poros grandes, estables y continuos que favorecen mayores tasas de infiltración de agua en el perfil del suelo. Por ejemplo, en un estudio sobre vertisoles de Durango se observó que los suelos agrícolas presentaban incrementos $> 100\,\%$ en infiltración inicial y permeabilidad, respecto a áreas forestales con *K* muy bajas ($\approx 0.0011\ \mathrm{cm\ s^{-1}}$) (Rodríguez *et al*., 2024). Del mismo modo, un experimento a largo plazo en San Luís Potosí mostró que los sistemas de agricultura de conservación —que promueven materia orgánica, estabilidad de agregados y menor densidad aparente— presentó significativamente mayor porosidad y conductividad hidráulica que la labranza convencional (Osuna-Ceja *et al*., 2024).

Estas evidencias muestran que, si bien los suelos no laboreados pueden exhibir poros más pequeños dentro de los agregados, la descomposición radicular y la actividad de la fauna edáfica generan canales continuos y estables que mejoran el flujo de agua. Tal efecto se ha identificado

como una de las principales ventajas de los sistemas regenerativos en comparación con prácticas agrícolas tradicionales, al mejorar de manera sostenida el funcionamiento hidrológico del suelo.

2.5.4 Influencia de las propiedades físicas del suelo en el rendimiento de cultivos PV bajo dos sistemas agrícolas

En los Sistemas SAR y SAC, las propiedades físicas del suelo que mejor explican el rendimiento de los cuatro cultivos (PV) se identificaron en el siguiente orden, de mayor a menor influencia:

SAR-Girasol: La conductividad hidráulica (K), la porosidad total (f_T), la densidad aparente (ρ_b) y la resistencia a la penetración (R_p), contribuyeron individualmente entre un 21.2 % y 11.6 %. Por otro lado, la sortividad (S_o), la humedad gravimétrica (Θ_g) y la temperatura del suelo (T_s) explicaron individualmente menos del 5 % (Figura 6 a). En la misma figura se muestra la línea acumulativa del porcentaje de explicación de las propiedades del suelo sobre el rendimiento del cultivo. Se observa que la línea acumulativa inicia con K a R_p, con un ligero aumento en porcentaje de acumulación, pero de R_p a S_o y de S_o a Θ_g, existe un mayor aumento que termina con 100% de explicación. Por el contrario, en el tramo de Θ_g a T_s la pendiente es cero, es decir, indica que en forma acumulativa estas variables no explican un aumento razonable como la hacen individualmente.

SAC-Girasol: La temperatura del suelo (T_s), sortividad (S_o), humedad gravimétrica (Θ_g) y conductividad hidráulica (K) contribuyeron individualmente entre un 31.4 % y 11.6 %. Otras como R_p, ρ_b y f_T explicaron individualmente menos del 3 % (Figura 6 e). Además, se observó que la línea acumulativa inicia con T_s a S_o con un aumento importante en porcentaje de acumulación, pero Θ_g a K y de K a R_p, existe un ligero aumento que prácticamente finaliza con 100% de explicación. Sin embargo, en el tramo de f_T a ρ_b la pendiente es cero, lo que significa que no existe aumento en forma acumulativa.

SAR-Maíz: el rendimiento se influenció por K y S_o; las cuales explicaron individualmente de 43.6-18.5 %, mientras que R_p, f_T, ρ_b, Θ_g y T_s solo explicaron individualmente menos de 5 % (Figura 6 b); Además, se muestra la línea del porcentaje acumulativo de las variables del suelo que explicaron 100 % el rendimiento del cultivo, en este caso existe una pendiente muy marcada, en

el tramo de K a S_o donde se encuentra el mayor porcentaje de explicación (62 %); además se observan tramos de R_p a f_T y ρ_b a Θ_g, con menor porcentaje de explicación, pero hay tramos de Θ_g a T_s, donde no hay pendiente de rendimiento.

SAC-Maíz: el rendimiento se influenció ligeramente por T_s, K, f_T y ρ_b; las cuales explicaron individualmente de 12.2-6.7 %. Por otro lado, Θ_g, S_o, y R_p solo explicaron individualmente menos de 5 % (Figura 6 f). También se muestra la línea acumulativa de las variables del suelo que explicaron 100 % el rendimiento del cultivo, en este caso existen pendientes marcadas, por ejemplo, de T_s a Θ_g se encuentra el mayor porcentaje de explicación (90 %); además, se observa un tramo de Θ_g a S_o, con menor porcentaje de explicación, pero hay un tramo de S_o a R_p, donde no hay pendiente del rendimiento.

SAR-Sorgo: el rendimiento se influenció por K y f_T; mismas que explicaron individualmente de 29.2 y 22.1 % respectivamente. Las variables restantes (R_p, ρ_b, Θ_g, S_o y T_s) explicaron individualmente menos del 8 % (Figura 6 c). Por otro lado, se muestra la línea del porcentaje acumulativo de las variables del suelo que presenta pendientes marcadas, por ejemplo, de K a f_T se encuentra más del 50 % de explicación, siguiéndole el tramo de f_T hasta Θ_g que explicaron prácticamente 100 % el rendimiento del cultivo.

SAC-Sorgo: El rendimiento de sorgo se debió a la T_s, S_o y R_p, con un rango de 38-4.8 % y las variables restantes explican individualmente menos de 4 % (Figura 6 g). también, la línea acumulativa muestra un aumento continuo desde T_s hasta ρ_b alcanzando el 38 % de explicación, lo que indica una progresión muy pobre, es decir, hay muy poca influencia de las propiedades físicas del suelo en el rendimiento.

SAR-Frijol: El rendimiento se influenció por K, S_o y f_T, con aportes individuales de entre el 29.2 % y el 8.4 %, mientras que ρ_b, Θ_g, R_p y T_s explicaron individualmente menos del 6 % (Figura 6 d). Asimismo, la línea acumulativa muestra un aumento continuo desde K hasta Θ_g, alcanzando el 100 % de explicación, lo que indica una progresión constante.

SAC-Frijol: Las propiedades del suelo que explican el rendimiento del frijol de mayor a menor importancia son: S_o, R_p, K y Θ_g; estas variables del suelo aportaron una explicación individual de 50.4 % a 15.2 %; otras como la f_T, ρ_b y T_s explicaron individualmente menos del 15 % (Figura 6 h). En la misma figura se muestra la línea acumulativa del porcentaje de explicación de las propiedades del suelo sobre el rendimiento de frijol. Se observa que la línea comienza con 50.4 % de S_o, con un importante aumento a R_p del mismo modo en los tramos de K a Θ_g y de K a f_T existe un mayor aumento que prácticamente llegaron al 100 % en forma acumulativa; pero de ρ_b a T_s el aumento en forma acumulativa es imperceptible.

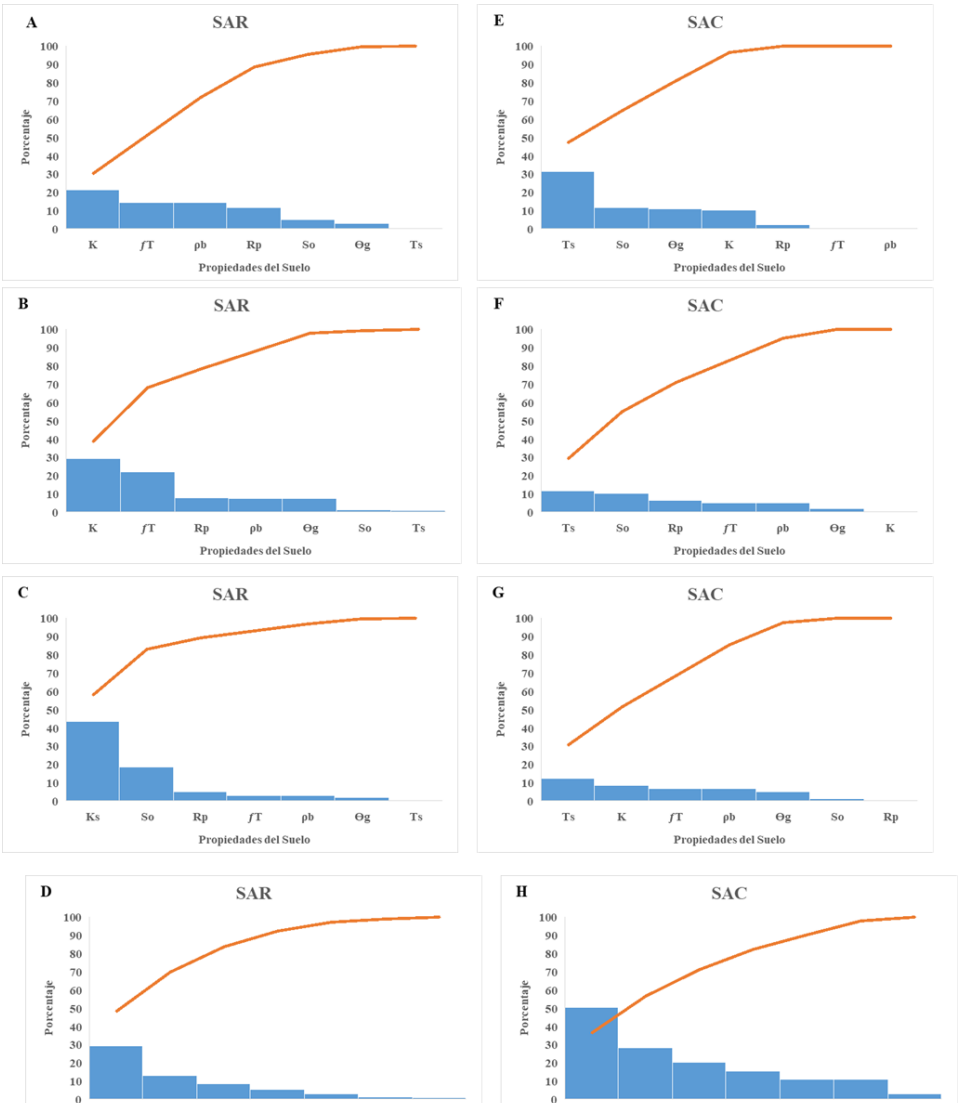


Figura 6. Porcentaje explicativo individual y acumulativo de las propiedades del suelo y su efecto en el rendimiento, R_p- resistencia a la penetración, ρ_b- densidad aparente f_T- porosidad, K- conductividad hidráulica, S_o- sortividad, Ts- temperatura del suelo, Θ_g- humedad gravimétrica. En los sistemas SAR y SAC: (a, e) girasol, (b, f) maíz, (c, g) sorgo y (d, h) frijol.

2.5.5 Discusión general de PV

En el ciclo PV, los resultados muestran diferencias notables entre el SAR y el SAC en cuanto a qué propiedades físicas del suelo influyen más significativamente en el rendimiento de los cultivos. Estas diferencias reflejan las condiciones del suelo generadas por cada tipo de manejo agrícola y coinciden con algunos resultados reportados en la literatura científica actual.

En el sistema SAR, la conductividad hidráulica (K) fue una de las variables más influyentes en los cultivos de girasol, maíz, sorgo y frijol, explicando hasta el 43.6 % del rendimiento en algunos casos. Esto respalda lo señalado por Lal (2020 a), quien argumenta que prácticas regenerativas como el uso de cultivos de cobertura y la mínima labranza favorecen la mejora de la estructura del suelo, incrementando su capacidad de infiltración y movimiento del agua, lo cual es crucial para el desarrollo radicular y la disponibilidad hídrica.

Del mismo modo, la porosidad total (f_T) mostró una influencia considerable, especialmente en el rendimiento SAR-sorgo y SAR-frijol, lo cual indica una mayor aireación y retención de agua útil en los sistemas regenerativos. Según Basche y DeLonge (2019), la porosidad está estrechamente relacionada con la biodiversidad edáfica y el contenido de materia orgánica, ambos favorecidos en la agricultura regenerativa.

En contraste, en el sistema convencional (SAC), propiedades como la temperatura del suelo (T_s) y la sortividad (S_o) tuvieron un papel más protagónico, sobre todo en los cultivos de girasol y el sorgo. La mayor influencia de T_s podría deberse a la exposición del suelo desnudo en este sistema, que tiende a calentarse más por la falta de cobertura vegetal, afectando directa e indirectamente los procesos de crecimiento de las raíces y microorganismos (Rusinamhodzi *et al*., 2011).

Sin embargo, el papel relevante de variables como S_o en SAC, aunque moderado, sugiere un comportamiento más errático de la infiltración y redistribución del agua en estos suelos, lo que puede estar relacionado con una estructura degradada o compactada debido al uso continuo de maquinaria y agroquímicos (Mbarki *et al*., 2023; Gürsoy, 2021).

Con respecto a los indicadores de compactación, la densidad aparente (ρ_b) y la resistencia a la penetración del suelo (R_p) tendieron a tener una menor influencia en ambos sistemas, aunque ligeramente más notoria en SAR-girasol y SAC-sorgo. No obstante, su baja contribución individual al rendimiento en la mayoría de los cultivos puede interpretarse de dos maneras: los suelos no presentan problemas severos de compactación y otras variables físicas (como K y f_T) amortiguan sus efectos negativos. Según Blanco-Canqui *et al*. (2015), estas propiedades suelen estar más correlacionadas con el tránsito de maquinaria y prácticas intensivas, por lo que su influencia puede ser más marcada en contextos donde se ha excedido el uso convencional.

En relación con la humedad gravimétrica (Θ_g) esta mostró una contribución generalmente baja al rendimiento, particularmente en SAR. Esto puede explicarse porque esta variable, aunque importante, representa una condición puntual y no necesariamente estable o representativa del régimen hídrico completo que experimenta un cultivo. En sistemas regenerativos, donde la cobertura vegetal y la materia orgánica permiten una mayor estabilidad hídrica, esta variable pierde peso relativo frente a otras más integradoras como K o f_T (Teague *et al*., 2020).

Por otro lado, las líneas acumulativas del porcentaje de explicación de las propiedades del suelo sobre el rendimiento de girasol, maíz, sorgo y frijol indican que, en general, el sistema SAR presenta un aumento más constante y sostenido, lo que sugiere una influencia más equilibrada y multifactorial de las propiedades físicas del suelo. En contraste, en SAC la acumulación es más abrupta y desigual, con tramos sin pendiente, lo que sugiere que pocas variables explican la mayor parte del rendimiento y que otras propiedades están desvinculadas del funcionamiento productivo del sistema.

Esto último coincide con lo planteado por Giller *et al*. (2021), quienes sostienen que los sistemas convencionales tienden a simplificar el entorno edáfico, haciendo que pocas variables sean determinantes, pero a costa de la resiliencia del sistema.

2.5.6 Variabilidad de las propiedades físicas del suelo y producción de cultivos OI

Los resultados presentados en los Cuadros 7, 8, 9 y 10 evidencian cambios en la variabilidad de las propiedades físicas y químicas del suelo determinadas en los cultivos de OI, lo que indica que muchos de estos parámetros fueron sensibles al impacto de las prácticas agrícolas aplicadas en los sistemas de manejo del suelo estudiados. Esto sugiere que varios de estos parámetros pueden considerarse indicadores útiles para evaluar la degradación de la calidad física del suelo como resultado del manejo agrícola.

Cuadro 7. Estadística descriptiva de las variables en triticale1.

Sistema	Propiedad	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DS	CV%
SAR	R_p (Mpa)	10	0.29	0.96	0.59	0.57	0.19	32.08
SAC		10	1.72	6.50	4.01	3.82	1.66	41.25
SAR	ρb (Mg m^{-3})	10	1.18	1.36	1.27	1.26	0.05	4.16
SAC		10	1.26	1.50	1.38	1.37	0.08	5.52
SAR	fT (%)	10	48.69	55.64	52.17	52.35	1.99	3.81
SAC		10	43.46	52.27	48.02	48.19	2.87	5.98
SAR	K (cm h^{-1})	10	0.14	2.56	1.30	1.05	0.75	57.80
SAC		10	0.13	1.51	0.76	0.81	0.38	50.03
SAR	So (cm h$^{-½}$)	10	1.31	6.30	2.57	2.09	1.43	55.67
SAC		10	0.18	3.40	1.35	1.16	1.01	74.67
SAR	Ts (°C)	10	26.80	30.70	29.02	28.85	1.10	3.79
SAC		10	32.40	35.40	34.06	34.3	0.97	2.85
SAR	Θg (%)	10	14.20	23.10	18.56	18.95	2.56	13.78
SAC		10	11.30	23.60	13.79	12.85	3.58	25.93
SAR	Θ_a (%)	10	9.76	14.15	12.50	12.8	1.34	10.71
SAC		10	10.66	12.67	11.74	11.83	0.83	7.09
SAR	MO	10	1.28	1.61	1.39	1.34	0.10	6.86
SAC		10	1.08	1.21	1.14	1.14	0.06	5.36
SAR	C	10	0.66	0.94	0.79	0.78	0.07	9.20
SAC		10	0.62	0.70	0.66	0.66	0.04	5.71
SAR	Ŷms (t ha^{-1})	10	5.00	7.00	6.00	6	0.67	11.11
SAC		10	3.00	7.00	4.60	4.5	1.26	27.50
SAR	Ŷmv (t ha^{-1})	10	13.00	25.00	19.80	20.5	3.43	17.30
SAC		10	8.00	24.40	14.74	14.5	5.49	37.27
SAR	Ap (m)	10	0.58	0.78	0.69	0.68	0.06	8.26
SAC		10	0.43	0.82	0.62	0.64	0.14	21.92
SAR	Ap2c (m)	10	0.76	0.96	0.84	0.81	0.07	8.20
SAC		10	0.62	1.50	0.79	0.7	0.27	33.48
SAR	At (m)	10	0.25	0.55	0.38	0.36	0.10	25.60

SAR- sistema de agricultura regenerativa; SAC- sistema de agricultura convencional, R_p- resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, Ŷms- rendimiento materia seca, Ŷmv - rendimiento materia verde, Ts- temperatura de suelo, Θ_g - humedad gravimétrica, A_p - altura de planta, Θ_a- humedad aprovechable, MO – materia orgánica, C- carbono Ap2c- altu*ra* de planta segundo corte, At- altura de trébol, DS- desviación estándar, CV- coeficiente de Variación.

Cuadro 8. Estadística descriptiva de las variables en triticale2.

sistema	Propiedad	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DS	CV%
SAR	R_p (Mpa)	10	0.29	1.15	0.75	0.76	0.25	32.93
SAC		10	0.76	3.06	2.14	2.25	0.75	35.04
SAR	ρb (Mg m^{-3})	10	1.04	1.20	1.12	1.14	0.05	4.85
SAC		10	1.26	1.47	1.36	1.36	0.07	5.22
SAR	fT (%)	10	54.84	60.70	57.57	57.1	2.06	3.58
SAC		10	44.72	52.36	48.80	48.77	2.67	5.48
SAR	K (cm h^{-1})	10	0.35	3.51	2.43	3.05	1.12	45.83
SAC		10	0.53	8.62	4.06	3.81	2.73	67.29
SAR	So (cm h$^{-½}$)	10	0.47	4.70	2.92	3.34	1.48	50.54
SAC		10	1.51	4.93	3.79	3.98	0.94	24.72
SAR	Ts(C°)	10	25.50	29.10	28.24	28.8	1.16	4.11
SAC		10	33.60	36.60	35.70	36.1	0.94	2.63
SAR	Ɵg	10	10.9	20.00	14.94	14.65	3.20	21.43
SAC		10	9.50	18.2	12.85	12.45	2.73	21.23
SAR	Ɵa	10	9.76	14.15	12.50	12.8	1.34	10.71
SAC		10	10.66	12.67	11.74	11.83	0.83	7.09
SAR	MO	10	1.28	1.61	1.39	1.34	0.10	6.86
SAC		10	1.08	1.21	1.14	1.14	0.06	5.36
SAR	C	10	0.66	0.94	0.79	0.78	0.07	9.20
SAC		10	0.62	0.70	0.66	0.66	0.04	5.71
SAR	Ŷms (t ha^{-1})	10	4.00	8.00	5.60	5.00	1.17	20.96
SAC		10	3.00	6.00	4.60	4.50	0.97	21.00
SAR	Ŷmv (t ha^{-1})	10	160	37.00	22.70	21.5	5.87	25.86
SAC		10	11.00	23.00	15.10	14.5	3.25	21.50
SAR	Ap (m)	10	0.65	1.01	0.78	0.76	0.11	13.74
SAC		10	0.57	0.68	0.63	0.64	0.04	5.72
SAR	Ap2c (m)	10	0.79	1.45	0.97	0.90	0.2	20.89
SAC		10	0.75	0.96	0.87	0.88	0.08	9.26
SAR	At (m)	10	0.29	0.75	0.48	0.46	0.13	27.29

SAR- sistema de agricultura regenerativa; SAC- sistema de agricultura convencional, R_p -resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, Ŷms- rendimiento materia seca, Ŷmv - rendimiento materia verde, Ts- temperatura de suelo, Θ_g - humedad gravimétrica, A_p - altura de planta, Θ_a- humedad aprovechable, MO – materia orgánica, C- carbono Ap2c- altura de planta segundo corte,At- altura de trébol DS- desviación estándar, CV- coeficiente de Variación.

Cuadro 9. Estadística descriptiva de las variables en avena.

sistema	Propiedades	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DS	CV%
SAR	R_p (Mpa)	10	0.76	3.54	1.34	1.05	0.84	62.72
SAC		10	0.86	2.39	1.90	1.53	0.96	50.53
SAR	ρb (Mg m^{-3})	10	1.13	1.32	1.26	1.26	0.05	4.27
SAC		10	1.19	1.38	1.29	1.27	0.06	4.66
SAR	fT (%)	10	50.04	57.35	52.59	52.41	2.03	3.85
SAC		10	48.05	55.27	51.49	52.23	2.26	4.39
SAR	K (cm hr-1)	10	0.17	4.89	2.05	1.47	1.42	69.10
SAC		10	0.43	1.72	0.81	0.69	0.41	50.83
SAR	So (cm h-½)	10	0.68	5.89	3.05	3.19	1.77	58.03
SAC		10	0.00	2.13	0.44	0.56	0.64	68.87
SAR	Ts (°C)	10	23.50	29.50	27.86	28.65	1.89	6.78
SAC		10	30.70	35.60	33.03	32.90	1.64	4.96
SAR	Θ_g	10	10.30	25.10	15.47	14.95	4.03	26.03
SAC		10	9.80	15.00	12.98	13.3	4.6	28.22
SAR	Θ_a	10	9.76	14.15	12.50	12.8	1.34	10.71
SAC		10	10.66	12.67	11.74	11.83	0.83	7.09
SAR	MO	10	1.28	1.61	1.39	1.34	0.10	6.86
SAC		10	1.08	1.21	1.14	1.14	0.06	5.36
SAR	C	10	0.66	0.94	0.79	0.78	0.07	9.20
SAC		10	0.62	0.70	0.66	0.66	0.04	5.71
SAR	Ŷms(t ha^{-1})	10	3.00	8.00	4.40	4.00	1.89	23.28
SAC		10	3.00	6.00	4.40	4.00	0.84	19.17
SAR	Ŷmv (t ha^{-1})	10	7.00	23.00	11.40	10.00	4.58	24.89
SAC		10	10.00	150	11.80	12.00	4.88	26.33
SAR	Ap (m)	10	0.95	1.26	1.07	1.08	0.09	8.31
SAC		10	1.12	1.90	1.35	1.26	0.24	17.53

SAR- sistema de agricultura regenerativa; SAC- sistema de agricultura convencional, R_p -resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, Ŷms- rendimiento materia seca, Ŷmv - rendimiento materia verde, Ts- temperatura de suelo, Θ_g - humedad gravimétrica, A_p - altura de planta, Θ_a- humedad aprovechable, MO – materia orgánica, C- carbono DS- desviación estándar, CV- coeficiente de Variación.

Cuadro 10. Estadística descriptiva de las variables en trigo.

sistema	Propiedad	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DS	CV%
SAR	R_p (Mpa)	10	0.19	2.20	0.89	0.72	0.56	65.17
SAC		10	1.05	1.62	1.35	1.34	0.80	59.26
SAR	ρb (Mg m^{-3})	10	1.09	1.38	1.23	1.24	0.09	7.13
SAC		10	1.34	1.57	1.42	1.38	0.08	5.92
SAR	fT (%)	10	47.98	58.83	53.75	53.35	3.30	6.14
SAC		10	40.89	49.53	46.29	47.78	3.18	6.86
SAR	K (cm h^{-1})	10	0.89	6.11	3.48	3.47	1.64	47.21
SAC		10	0.22	4.98	2.09	1.71	1.69	77.99
SAR	So (cm h-½)	10	0.49	4.86	3.50	3.96	1.36	38.91
SAC		10	1.22	4.66	2.75	2.69	1.29	46.80
SAR	Ts (°C)	10	25.30	28.7	26.8	26.75	1.26	4.69
SAC		10	35.10	37.00	35.97	35.90	0.69	1.92
SAR	Θ_g	10	8.80	27.00	17.84	17.35	5.58	31.27
SAC		10	10.10	14.90	12.59	12.35	1.62	12.86
SAR	Θ_a	10	9.76	14.15	12.5	12.80	1.34	10.71
SAC		10	10.66	12.67	11.74	11.83	0.83	7.09
SAR	MO	10	1.28	1.61	1.39	1.34	0.10	6.86
SAC		10	1.08	1.21	1.14	1.14	0.06	5.36
SAR	C	10	0.66	0.94	0.79	0.78	0.07	9.20
SAC		10	0.62	0.70	0.66	0.66	0.04	5.71
SAR	Ŷms(t ha^{-1})	10	2.00	6.00	3.50	3.00	1.08	30.86
SAC		10	4.00	7.00	5.60	5.00	1.07	19.20
SAR	Ŷmv (t ha^{-1})	10	6.00	15.00	7.90	7.00	2.56	32.38
SAC		10	9.00	19.00	12.60	12.00	3.31	26.24
SAR	Ap (m)	10	0.80	1.17	0.96	0.94	0.09	9.67
SAC		10	0.95	1.90	1.21	1.11	0.30	24.94

SAR- sistema de agricultura regenerativa; SAC- sistema de agricultura convencional, R_p -resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, Ŷms- rendimiento materia seca, Ŷmv - rendimiento materia verde, Ts- temperatura de suelo, Θ_g - humedad gravimétrica, A_p - altura de planta, Θ_a- humedad aprovechable, MO – materia orgánica, C- carbono ,DS- desviación estándar, CV- coeficiente de Variación.

En los cuadros anteriores, se muestra la variación y la comparación de medias o medianas de las variables del suelo y planta determinadas para el ciclo de OI, relacionadas con las prácticas de manejo implementadas en ambos sistemas agrícolas estudiados.

De acuerdo con los resultados obtenidos, y al igual que en el ciclo PV, se utilizó el coeficiente de variación (CV) para clasificar la variabilidad de todas las variables analizadas, agrupándolas en tres categorías: baja (CV < 15 %), moderada (CV entre 15 % y < 35 %) y alta (CV > 35 %). Este enfoque permitió identificar con claridad la heterogeneidad del suelo y, en consecuencia, ajustar las estrategias agronómicas a las condiciones específicas de cada unidad experimental.

Los resultados muestran que las propiedades del suelo que presentaron CVs mayores de 35 % en ambos sistemas agrícolas (SAR y SAC) para los cuatro cultivos (triticale de corte, avena, trigo y triticale facultativo asociados con trébol alejandrino) evaluados en OI fue K; S_o para tres cultivos (triticale1, avena y trigo) y R_p para (avena y trigo). Lo que indicó una mayor variación espacial de estos en el área donde se ubicaron las dos unidades experimentales de ambos sistemas. El coeficiente de variación de la propiedad física: Θ_g, fue mayor de 15 % y mayor de 35 % solo en dos casos (avena y triticale 2). Esto se interpretó como una variación espacial moderada para dichas áreas de estudio; pero la ρ_b, f_T, T_s, Θ_a, C y Mo fueron los más bajos, cuyos valores oscilaron entre 1.92 y 13.78 % para todos los casos, los cuales podrían interpretarse como una distribución más homogénea. Para el rendimiento de biomasa verde y materia seca y altura de los cultivos evaluados: triticale de corte ($\hat{Y}T_1$ mv y $\hat{Y}T_1$ ms), avena ($\hat{Y}Av$ mv y $\hat{Y}Av$ ms), trigo ($\hat{Y}T_r$ mv y $\hat{Y}T_r$ ms) y triticale facultativo ($\hat{Y}T_2$ mv y $\hat{Y}T_2$ ms), los coeficientes fueron de bajos a moderados, con un rango de 8.26 a < 35 %. Otras estadísticas tales como: mínimo, máximo, y la desviación estándar se muestran en los Cuadros 7, 8, 9 y 10.

2.5.7 Análisis de correlación entre propiedades de suelo y planta en los sistemas agrícolas evaluados

Se realizaron análisis de correlación por pares entre 13 atributos medidos en las unidades experimentales de ambos sistemas agrícolas: diez propiedades del suelo (físicas y químicas) a una profundidad de 0–10 cm, dos variables de rendimiento y una de altura de cultivos de OI. En total, se evaluaron 91 pares posibles de variables por sistema y por cultivo. En el sistema de agricultura

regenerativa (SAR), se identificaron correlaciones medianamente altas: triticale 1 (29 pares), avena (11), trigo (16) y triticale 2 (8). En contraste, el sistema de agricultura convencional (SAC) mostró una cantidad similar o ligeramente mayor de correlaciones para los mismos cultivos: triticale 1 (17), avena (15), trigo (16) y triticale 2 (17). Esto sugiere que, aunque ambos sistemas muestran relaciones importantes entre variables, la estructura y magnitud de estas asociaciones varía entre sistemas y cultivos, posiblemente como reflejo de diferencias en manejo, diversidad edáfica o respuestas fisiológicas de los cultivos.

Un resultado destacado fue la correlación negativa altamente significativa (ρ = -1.0) entre la densidad aparente del suelo (ρ_b) y la porosidad total (f_T) en ambos sistemas y para todos los cultivos. Esta relación indica una fuerte asociación inversa entre la compactación del suelo y su contenido de partículas finas, lo cual es razonable con lo esperado desde un punto de vista físico. Además, la ρ_b mostró disminuciones estadísticamente significativas frente a otras variables, lo que refuerza su papel como un indicador clave de calidad del suelo. Estos patrones fueron consistentes con los observados en el ciclo agrícola PV anterior, lo que sugiere una estabilidad temporal en las interacciones entre variables edáficas y de rendimiento bajo diferentes prácticas de manejo.

Otro resultado importante fue la correlación positiva entre la conductividad hidráulica (*K*) y la materia orgánica (*MO*) en ambos sistemas agrícolas, observada en los cultivos de triticale 1, avena, trigo y triticale 2. En el sistema de agricultura regenerativa (SAR), los coeficientes de correlación (ρ) oscilaron entre 0.35 y 0.48. En el sistema de agricultura convencional (SAC), la relación fue más variable: se registró una correlación negativa en triticale 1 (ρ = -0.08), mientras que, en los cultivos de trigo, avena y triticale 2 las correlaciones fueron positivas, aunque bajas, con valores entre 0.04 y 0.36. Por otro lado, la conductividad hidráulica (*K*) mostró una correlación negativa moderada con la densidad aparente (ρb) en ambos sistemas agrícolas. En el SAR, los valores de correlación oscilaron entre -0.12 y -0.35, mientras que en el SAC variaron entre -0.07 y -0.15 para los cuatro cultivos evaluados (Cuadro 10). Además, la sortividad (S_o) mostró una correlación negativa con la humedad aprovechable (Θ_a) y el contenido de carbono (*C*) ($\rho \leq$ -0.65), y una correlación positiva con la altura de planta (A_p) (ρ = 0.55) en el cultivo de triticale 1. Sin embargo, en este mismo cultivo y en los otros tres evaluados en el SAR, la relación de So con las demás variables fue baja. Por otro lado, las otras propiedades hídricas (S_o, Θ_a y Θ_g), químicas (*MO* y *C*)

y de planta (A_p, $\hat{Y}_{Gmv}$ y $\hat{Y}_{M\ ms}$) mostraron mayor sensibilidad en el SAR, lo que evidencia una dinámica microambiental más compleja y sostenible. En contraste, la temperatura del suelo (T_s) presentó una correlación baja con todas las variables hídricas, químicas y de planta en los cultivos evaluados en el SAR.

Con base en los resultados anteriores, se sugiere que, a mayor contenido de materia orgánica, mayor capacidad del suelo para permitir el paso del agua. Esta relación fue más consistente y fuerte en el SAR, donde los coeficientes de correlación (ρ) fueron moderadamente positivos (entre 0.35 y 0.48), mostrando una relación directa clara entre ambos parámetros. En cambio, en el SAC, la relación fue menos consistente y más débil. Por ejemplo, en el cultivo de triticale 1, la relación fue incluso negativa (ρ = -0.08), lo cual podría deberse a prácticas agrícolas que alteran negativamente la estructura del suelo (Lal, 2020a; Pimentel & Burgess, 2013). Para los otros cultivos (trigo, avena y triticale 2), las correlaciones fueron positivas pero muy bajas (ρ entre 0.04 y 0.36), lo que indica una relación más débil y posiblemente influenciada por otros factores del manejo convencional (de Graaff *et al*., 2015).

Por otro lado, se observó que la conductividad hidráulica (K) se correlacionó negativamente con la densidad aparente del suelo (ρb) en ambos sistemas. Esto significa que a mayor densidad del suelo (es decir, suelo más compactado), menor es su capacidad para conducir el agua. En el SAR, esta relación fue más marcada (ρ entre -0.12 y -0.35), mientras que en el SAC fue más débil (ρ entre -0.07 y -0.15), lo que sugiere que la agricultura regenerativa podría estar promoviendo una mejor estructura del suelo que favorece la infiltración de agua al reducir la compactación (Basche & DeLonge, 2017; Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

Cuadro 11. Análisis de correlación entre propiedades físicas del suelo y el rendimiento de triticale 1 , avena, trigo y triticale 2en dos sistemas agrícolas.

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAR TRITICALE 1

	R_p	ρ_b	f_T	k	S_o	T_s	θ_g	θ_a	MO	C	Ŷms	Ŷmv	Ap	Ap2c	At
R_p	1.00														
ρ_b	-0.47	1.00													
f_T	0.47	-1.00	1.00												
k	-0.08	-0.35	0.35	1.00											
S_o	-0.07	-0.25	0.25	-0.60	1.00										
T_s	-0.15	-0.47	0.47	-0.18	0.44	1.00									
θ_g	-0.09	0.19	-0.19	0.80	-0.35	-0.25	1.00								
θ_a	-0.45	0.04	-0.04	0.32	-0.65	-0.01	0.12	1.00							
MO	-0.48	-0.51	0.66	0.32	-0.06	0.31	0.28	0.65	1.00						
C	-0.45	-0.45	0.55	0.57	-0.52	-0.02	0.46	0.79	0.86	1.00					
Ŷms	-0.59	-0.36	0.36	0.71	0.07	-0.23	0.40	0.56	0.28	0.24	1.00				
Ŷmv	-0.48	-0.42	0.42	0.55	0.01	-0.30	-0.20	0.25	0.62	0.50	0.49	1.00			
Ap	0.15	-0.38	0.38	-0.67	0.55	0.17	-0.32	0.56	0.48	-0.82	0.15	0.66	1.00		
Ap2c	-0.58	-0.19	0.19	0.35	-0.10	-0.34	-0.05	0.23	0.29	0.19	0.63	0.79	0.19	1.00	
At	0.12	0.16	-0.16	0.43	-0.25	-0.52	0.55	-0.01	0.06	0.29	0.71	0.15	-0.30	0.40	1.00

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAC TRITICALE 1

	R_p	ρ_b	f_T	k	S_o	T_s	θg	θa	MO	C	$\hat{Y}ms$	$\hat{Y}mv$	Ap	$Ap2c$
R_p	1.00													
ρ_b	0.49	1.00												
f_T	-0.49	-1.00	1.00											
k	-0.09	-0.11	0.11	1.00										
S_o	-0.37	-0.11	0.11	0.09	1.00									
T_s	0.62	0.61	-0.61	0.06	-0.08	1.00								
θ_g	-0.33	-0.25	0.25	-0.13	-0.02	-0.44	1.00							
θ_a	-0.28	-0.20	0.20	0.01	-0.06	-0.31	0.27	1.00						
MO	-0.64	-0.56	0.56	-0.08	0.13	-0.43	0.48	0.48	1.00					
C	-0.59	-0.51	0.51	-0.05	0.10	-0.41	0.48	0.50	0.94	1.00				
Ŷms	-0.15	-0.09	0.09	-0.23	-0.05	0.08	0.04	-0.10	-0.01	-0.01	1.00			
Ŷmv	-0.15	-0.20	0.20	0.23	-0.05	0.11	0.12	0.12	0.10	0.11	0.82	1.00		
Ap	-0.39	-0.34	0.34	0.10	0.27	-0.64	0.16	0.10	0.44	0.36	-0.05	-0.16	1.00	
Ap2c	-0.43	-0.22	0.22	0.13	0.21	-0.14	-0.12	-0.01	0.20	0.20	0.46	0.59	0.38	1.00

SAR- Sistema de agricultura regenerativa, SAC- sistema de agricultura convencional, Rp -resistencia a la penetración, ρb - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, So - sortividad, θ_a- humedad aprovechable, Ap2c- altura de planta segundo corte, At- altura de trébol Ŷ ms- rendimiento materia seca, Ŷmv - rendimiento materia verde, T_s- temperatura de suelo, θ_g - humedad gravimétrica, Ap - altura de planta

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAR AVENA

	R_p	ρ_b	f_T	k	S_o	T_s	θ_g	θ_a	MO	C	$\hat{Y}ms$	$\hat{Y}mv$	Ap
R_p	1.00												
ρ_b	0.12	1.00											
f_T	-0.12	-1.00	1.00										
k	-0.26	-0.17	0.17	1.00									
S_o	-0.12	-0.31	0.31	-0.14	1.00								
T_s	0.02	-0.23	0.23	-0.25	0.00	1.00							
θ_g	-0.06	0.16	0.16	0.06	-0.37	0.11	1.00						
θ_a	-0.30	-0.04	0.04	-0.09	-0.08	-0.16	0.21	1.00					
MO	-0.19	-0.56	0.59	0.48	0.33	0.21	0.25	0.60	1.00				
C	-0.21	-0.53	0.53	0.46	0.29	0.13	0.30	0.79	0.86	1.00			
Ŷms	-0.20	-0.01	0.21	0.59	0.21	0.34	0.26	0.58	0.30	0.28	1.00		
Ŷmv	0.01	-0.02	0.02	-0.32	0.18	0.32	0.33	0.49	0.39	0.32	0.76	1.00	
Ap	-0.70	-0.19	0.19	0.35	0.18	-0.36	0.33	0.10	0.16	0.18	0.39	-0.53	1.00

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAC AVENA

	R_p	ρ_b	f_T	k	S_o	T_s	θ_g	θ_a	MO	C	$\hat{Y}ms$	$\hat{Y}mv$	Ap
R_p	1.00												
ρ_b	0.49	1.00											
f_T	-0.49	-1.00	1.00										
k	-0.09	-0.12	0.12	1.00									
S_o	-0.31	-0.12	0.12	0.22	1.00								
T_s	0.58	0.57	-0.57	-0.02	-0.19	1.00							
θ_g	-0.32	-0.25	0.25	-0.04	0.10	-0.46	1.00						
θ_a	-0.27	-0.19	0.19	0.05	0.02	-0.35	0.30	1.00					
MO	-0.58	-0.53	0.53	0.05	0.31	-0.43	0.51	0.47	1.00				
C	-0.54	-0.49	0.49	0.06	0.26	-0.47	0.51	0.46	0.95	1.00			
Ŷms	-0.13	-0.08	0.08	0.18	0.01	0.03	-0.02	-0.06	0.01	0.00	1.00		
Ŷmv	-0.14	-0.20	0.20	-0.16	0.05	0.04	-0.08	-0.09	-0.01	-0.03	0.81	1.00	
Ap	-0.24	-0.13	0.13	-0.15	-0.20	-0.20	-0.06	-0.01	-0.03	-0.05	-0.09	-0.25	1.00

SAR- Sistema de agricultura regenerativa, SAC- sistema de ahticultura convencional, R_p -resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, Ŷms- rendimiento materia seca , Ŷmv - rendimiento materia verde, T_s- temperatura de suelo, θ_g - humedad gravimétrica, Ap - altura de planta

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAR TRIGO

	R_p	ρ_b	f_T	k	S_o	T_s	θ_g	θ_a	MO	C	$\hat{Y}ms$	$\hat{Y}mv$	Ap
R_p	1.00												
ρ_b	0.49	1.00											
f_T	-0.49	-1.00	1.00										
k	-0.09	-0.12	0.12	1.00									
S_o	-0.31	-0.12	0.12	0.22	1.00								
T_s	0.58	0.57	-0.57	-0.02	-0.19	1.00							
θ_g	-0.32	-0.25	0.25	-0.04	0.10	-0.46	1.00						
θ_a	-0.27	-0.19	0.19	0.05	0.02	-0.35	0.30	1.00					
MO	-0.58	-0.53	0.53	0.46	0.31	-0.33	0.51	0.59	1.00				
C	-0.54	-0.49	0.49	0.36	0.26	-0.27	0.51	0.62	0.95	1.00			
Ŷms	-0.13	-0.08	0.18	0.62	0.01	0.03	-0.02	0.51	0.29	0.00	1.00		
Ŷmv	-0.14	-0.20	0.20	0.16	0.05	0.04	0.08	0.49	0.25	0.20	0.81	1.00	
Ap	-0.24	-0.13	0.13	0.15	0.20	-0.20	0.06	0.01	0.03	0.05	-0.09	-0.25	1.00

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAC TRIGO

	R_p	ρ_b	f_T	k	S_o	T_s	θ_g	θ_a	MO	C	$\hat{Y}ms$	$\hat{Y}mv$	Ap
R_p	1.00												
ρ_b	0.38	1.00											
f_T	-0.38	-1.00	1.00										
k	-0.09	-0.15	0.15	1.00									
S_o	-0.31	-0.09	0.09	0.25	1.00								
T_s	0.47	0.64	-0.64	-0.01	-0.13	1.00							
θ_g	-0.29	-0.33	0.33	-0.01	0.09	-0.46	1.00						
θ_a	-0.26	-0.22	0.22	0.07	0.00	-0.36	0.31	1.00					
MO	-0.52	-0.57	0.57	0.04	0.26	-0.46	0.53	0.45	1.00				
C	-0.49	-0.53	0.53	0.05	0.22	-0.43	0.53	0.49	0.96	1.00			
Ŷms	-0.14	0.03	0.03	-0.14	0.01	0.13	-0.07	-0.06	-0.07	-0.07	1.00		
Ŷmv	-0.13	-0.23	0.23	-0.13	0.06	-0.03	-0.05	-0.06	0.03	0.00	0.75	1.00	
Ap	-0.23	0.12	-0.12	-0.16	-0.11	0.03	-0.17	-0.07	-0.16	-0.16	-0.02	-0.24	1.00

SAR- Sistema de agricultura regenerativa, SAC-sistema de agricultura convencional, R_p -resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, Ŷms- rendimiento materia seca , Ŷmv - rendimiento materia verde, T_s- temperatura de suelo, θ_g - humedad gravimétrica, Ap - altura de planta

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAR TRITICALE 2

	R_p	ρ_b	f_T	k	S_o	T_s	θ_g	θ_a	MO	C	Yms	Ymv	Ap	$Ap2c$	At
R_p	1.00														
ρ_b	0.09	1.00													
f_T	-0.09	-1.00	1.00												
k	-0.06	-0.28	0.28	1.00											
S_o	-0.11	0.07	-0.07	-0.11	1.00										
T_s	0.18	-0.03	0.03	-0.22	-0.09	1.00									
θ_g	-0.22	0.04	-0.04	0.05	-0.07	-0.14	1.00								
θ_a	-0.18	0.00	0.00	0.08	-0.11	-0.12	0.21	1.00							
MO	-0.24	-0.30	0.48	0.45	0.00	0.08	0.42	0.65	1.00						
C	-0.23	-0.37	0.37	0.44	0.04	0.02	0.42	0.79	0.86	1.00					
Ŷms	-0.12	-0.09	0.29	0.70	0.15	0.38	0.03	0.48	0.27	0.12	1.00				
Ŷmv	-0.07	-0.28	0.28	0.35	0.13	0.35	0.14	0.49	0.27	0.23	0.83	1.00			
Ap	0.46	0.14	-0.14	0.24	0.22	-0.38	0.07	0.47	0.15	0.17	0.26	-0.37	1.00		
Ap2c	-0.08	-0.40	0.40	0.13	0.29	0.03	0.30	0.17	0.01	0.04	0.41	0.67	0.61	1.00	
At	0.19	-0.33	0.33	0.44	0.04	0.04	0.13	0.12	0.03	0.17	0.37	0.46	0.46	0.73	1.00

Coeficientes de correlación Pearson, N = 10 SAC TRITICALE 2

	R_p	ρ_b	f_T	k	S_o	T_s	θ_g	θ_a	MO	C	Yms	Ymv	Ap	$Ap2c$
R_p	1.00													
ρ_b	0.41	1.00												
f_T	-0.41	-1.00	1.00											
k	-0.43	-0.07	0.07	1.00										
S_o	0.06	0.18	-0.18	-0.09	1.00									
T_s	0.64	0.52	-0.52	0.30	0.16	1.00								
θ_g	-0.45	-0.21	0.21	-0.23	-0.15	-0.40	1.00							
θ_a	-0.31	-0.11	0.11	-0.07	-0.17	-0.28	0.29	1.00						
MO	-0.60	-0.43	0.43	0.36	-0.13	-0.35	0.51	0.49	1.00					
C	-0.55	-0.38	0.38	-0.28	-0.14	-0.46	0.51	0.49	0.92	1.00				
Ŷms	-0.02	-0.09	0.09	0.29	-0.15	0.10	0.01	0.16	0.05	-0.04	1.00			
Ŷmv	-0.10	-0.24	0.24	0.29	-0.13	0.12	-0.08	-0.18	0.15	-0.15	0.81	1.00		
Ap	-0.08	-0.21	0.21	-0.08	0.07	-0.61	0.15	-0.01	0.32	0.23	-0.18	-0.30	1.00	
Ap2c	-0.19	-0.31	0.31	0.05	0.14	-0.10	-0.15	-0.09	0.10	0.10	0.35	0.57	0.53	1.00

SAR- Sistema de agricultura regenerativa, SAC- sistema de agricultura convencional, R_p -resistencia a la penetración, ρ_b - densidad aparente, f_T - porosidad, K -conductividad hidráulica, S_o - sortividad, θ_a- humedad aprovechable, Ap2c- altura de planta segundo corte,At- altura de trébol Ŷ ms- rendimiento materia seca, Ŷmv - rendimiento materia verde, T_s- temperatura de suelo, θ_g - humedad gravimétrica, Ap - altura de planta

2.5.8 Efecto de la conductividad hidráulica (*K*) sobre el rendimiento de triticale 1, avena, trigo y trticale 2 de OI

La dependencia entre la conductividad hidráulica (*K*) y el rendimiento de materia seca (ŶMS), de los cuatro cultivos evaluados, muestran una tendencia lineal más clara en el Sistema de Agricultura Regenerativa (SAR), mientras que en el Sistema de Agricultura Convencional (SAC) dicha dependencia fue prácticamente inexistente. En la Figura 7, se observa que la *K* hasta cierto grado explica el rendimiento de materia seca de triticale 1, avena, trigo y triticale 2 en SAR ($R^2 \leq 0.50$,, en contraste con el SAC, donde el grado de dependencia fue muy débil ($R^2 \leq 0.10$m. Aunque los valores de R^2 en SAR no son extremadamente altos, indican una dependencia moderada entre la capacidad del suelo para infiltrar agua y el rendimiento en materia seca.

Esto sugiere que, en el SAR, la mejora de las propiedades físicas del suelo —como su estructura y porosidad— favorecen la infiltración de agua y, por lo tanto, un mejor desarrollo de los cultivos, gracias a prácticas como la siembra directa (no labranza), la rotación de cultivos, el uso de cultivos de cobertura e incorporación de materia orgánica. Estudios recientes confirman que la no labranza tiende a aumentar la conectividad de macroporos y a conservar la humedad del suelo, mientras que los cultivos de cobertura contribuyen a reducir la densidad aparente del suelo y aumentar la porosidad total, promoviendo una mayor conductividad hidráulica y mejor disponibilidad de agua para las plantas (Lieskamp *et al*., 2024; Blanco-Canqui & Ruis, 2020).

Por el contrario, en el SAC, la relación entre K y ŶMS fue prácticamente nula, con valores de $R^2 \leq 0.10$. Esto indica que, en este sistema, la conductividad hidráulica del suelo no explica de manera significativa las variaciones en el rendimiento de materia seca. Esto podría deberse a que el SAC, al incluir prácticas como el uso intensivo de maquinaria, labranza frecuente y menor aporte de materia orgánica, deteriora la estructura del suelo, reduce su capacidad de infiltración y almacenamiento de agua, y genera una mayor compactación. Como resultado, otras variables pueden estar afectando más el rendimiento, como el uso de insumos químicos o factores climáticos no amortiguados por la calidad del suelo.

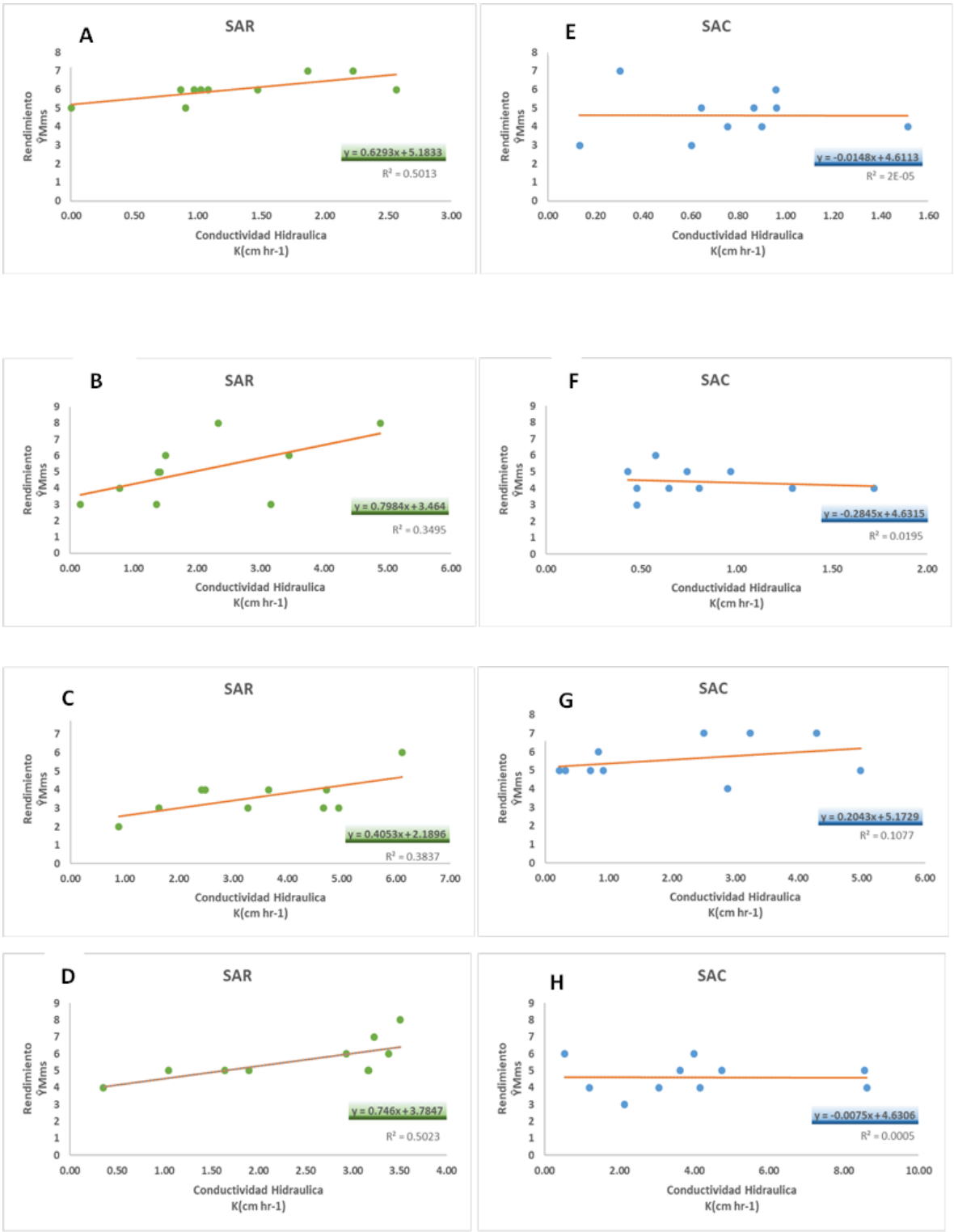


Figura 7. Relación lineal entre el rendimiento de materia seca con K en los sistemas SAR y SAC (a,e) triticale 1, (b, f) avena, (c, g) trigo, (d, h) triticale 2.

En términos agronómicos, se podría decir que la diferencia en los patrones de correlación entre SAR y SAC resalta el papel del suelo como regulador de la productividad agrícola, especialmente bajo sistemas regenerativos. En estos, el suelo actúa como un sistema más resiliente e interconectado, donde sus propiedades físicas están más directamente vinculadas con la respuesta del cultivo (Lal, 2020a; Reganold & Wachter, 2016).

En conclusión, los resultados refuerzan la hipótesis de que la salud del suelo, reflejada parcialmente en su conductividad hidráulica, tiene un impacto más directo en la productividad de los cultivos bajo sistemas regenerativos. En contraste, en sistemas convencionales, donde la función del suelo se ve deteriorada, esta relación se pierde, lo que puede aumentar la dependencia de insumos externos para sostener los rendimientos.

2.5.9 Influencia de las propiedades físicas y químicas del suelo en el rendimiento de cultivos OI bajo dos sistemas agrícolas

En los dos sistemas agrícolas bajo estudio (SAR y SAC), se identificaron y jerarquizaron, según su grado de influencia de mayor a menor, las propiedades físicas y químicas del suelo que más afectaron el rendimiento de los cuatro cultivos de OI.

SAR-Triticale 1: La conductividad hidráulica (K), la resistencia a la penetración (R_p), la porosidad total (f_T), la densidad aparente (ρ_b) y la humedad aprovechable (Θ_a), fueron las variables del suelo que mayor explicación individual aportaron al rendimiento, con valores que oscilaron entre el 50.41 % y el 12.96 %. Otras variables, como la materia orgánica (M_O), el carbono (C) y la temperatura del suelo (T_s), explicaron individualmente entre 7.84 y 5.29 % del rendimiento. Por su parte, la humedad gravimétrica (Θ_g) y la sortividad (So) presentaron explicaciones individuales inferiores al 5 % (Figura 8 a). En la misma Figura se muestra la línea acumulativa del porcentaje de explicación de las propiedades del suelo sobre el rendimiento del Triticale 1. Se observa que la línea comienza con 50.41 % de conductividad (K), con un ligero aumento a R_p, del mismo modo en los tramos de ρ_b a Θ_a y de M_O a T_s existieron aumentos que llegaron prácticamente al 100 % en forma acumulativa; pero de Θ_g a S_o no existieron aumentos en forma acumulativa.

SAC-Triticale 1: El rendimiento de triticale fue poco influenciado por las propiedades fisicoquímicas del suelo analizadas, las cuales explicaron individualmente entre el 1.0% y el 5.29% de la variabilidad observada (Figura 8 e). La línea acumulativa inicia con K y R_p, mostrando un ligero incremento en porcentaje acumulado de explicación. Sin embargo, a partir de las variables Θ_a a T_s, y de Θ_g a M_O, así como C a ρ_b, el aumento en la varianza explicada es menor, alcanzando de forma progresiva el 100%. En contraste, en el tramo correspondiente de f_T a S_o, la pendiente es cero, lo que indica que estas variables no contribuyen al aumento acumulativo de la explicación del rendimiento.

SAR-Avena: el rendimiento se influenció por K, Ts, Θ_a y M_O; las cuales explicaron individualmente de 34.81-9.0 %, mientras que Θ_g, f_T, So, C, R_p, y ρ_{bs} solo explicaron individualmente menos de 9 % (Figura 8 b); Además, se presenta la línea del porcentaje acumulativo de las variables del suelo que explicaron 100 % el rendimiento del cultivo. En este análisis, se observa una pendiente muy pronunciada en el tramo que va de K a Θ_a, donde se concentra el mayor porcentaje de explicación (57.3 %). También se identifican otros tramos -de M_O a Θ_g, f_T a S_o y C a R_p – que contribuyen con un menor porcentaje de explicación. Por otro lado, en los tramos correspondientes a ρ_b, no se evidencia una pendiente asociada al rendimiento.

SAC-Avena: Al igual que en el cultivo de triticale 1, el rendimiento de avena bajo el sistema de agricultura convencional fue escasamente influenciado por las propiedades fisicoquímicas del suelo analizadas, las cuales, de manera individual explicaron entre el 1.0 % y el 3.0 % de la variabilidad observada (Figura 8 f). Además, se observó que la línea acumulativa inicia con la conductividad (K) a la resistencia a la penetración (Rp), mostrando un ligero incremento en el porcentaje de acumulación. En contraste, los tramos que van de S_o a Ts, de Θ_g a Θ_a, de M_O a C y de ρ_b a f_T presentaron menores porcentajes de explicación, sin mostrar una pendiente significativa en el rendimiento para ninguno de estos tramos.

SAR-Trigo: el rendimiento se influenció por K, Θ_a y MO; mismas que explicaron individualmente de 38.4-8.4 % respectivamente. Las variables restantes (C, f_T, R_p, ρ_b, So, Ts y Θ_g,) explicaron individualmente menos del 8 % (Figura 8 c). Por otro lado, se muestra la línea del porcentaje acumulativo de las variables del suelo que presenta pendientes marcadas, por ejemplo, de K a M_O se encuentra más del 70 % de explicación, siguiéndole el tramo de C hasta R_p que explicaron prácticamente 100 % el rendimiento del cultivo.

SAC-Trigo: En el rendimiento de trigo la influencia de las propiedades físico-químicas del suelo analizadas fue insignificante, ya que, de forma individual, explicaron entre el 1.0% y el 2.0% de la variabilidad observada (Figura 8 g). La línea acumulativa inicia con la resistencia a la penetración (Rp) hasta *Ts*, mostrando un ligero incremento en el porcentaje de explicación acumulada. Posteriormente, se observa un aumento continuo desde S_o hasta C, alcanzando el 100% de explicación, lo que indica un aumento muy pobre. Es decir, las propiedades físicas del suelo tuvieron una influencia muy baja sobre el rendimiento del cultivo.

SAR-Triticale 2: El rendimiento se influenció por *K,* Θ_a, T_s y f_T, con aportes individuales de entre el 48.0 % y el 8.0 %, mientras que *MO*, *C*, So y R_p, ρ_b y Θ_g, explicaron individualmente menos del 8 % (Figura 8 d). Asimismo, la línea acumulativa muestra un aumento continuo desde *K* hasta R_p, alcanzando el 100 % de explicación, lo que indica un aumento constante.

SAC-Trticale 2: El rendimiento se influenció por *K,* Θ_a, y S_o, con aportes individuales de entre el 8.4 % y el 2.3 %, mientras que *Ts,* R_p, ρ_b, f_T, Θ_g, *MO y C* explicaron individualmente menos del 2 % (Figura 8 h). La línea acumulativa inicia con la conductividad (*K)* hasta sortividad (*So*), mostrando un ligero incremento en el porcentaje de explicación acumulada. En contraste, los tramos que van de R_p a p_b, f_T a Θ_g y de M_O a *C*, presentaron menores porcentajes de explicación, sin mostrar una pendiente significativa en el rendimiento para ninguno de estos tramos.

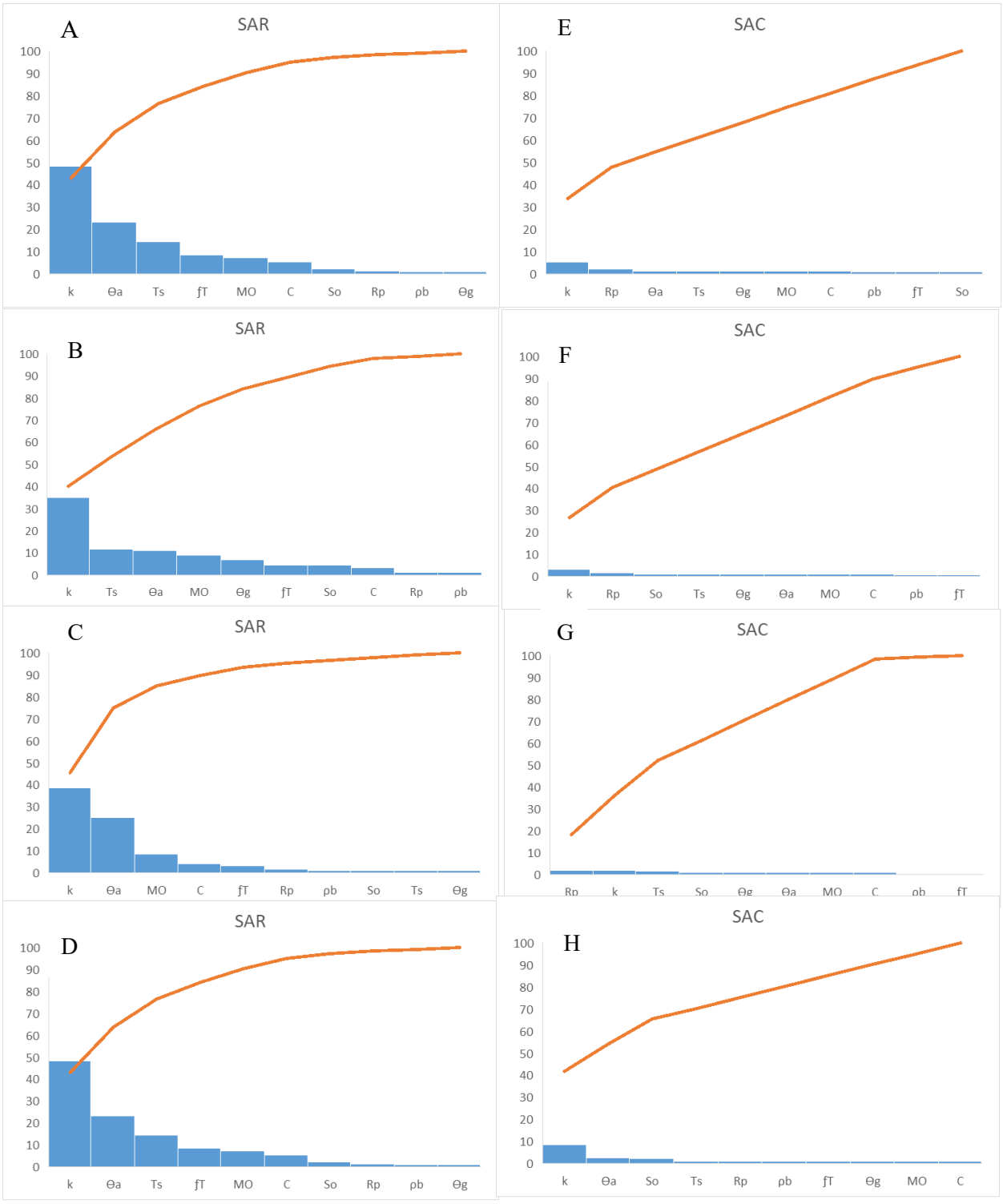


Figura 8. Porcentaje explicativo individual y acumulativo de las propiedades del suelo y su efecto en el rendimiento, R_p- resistencia a la penetración, ρ_b- densidad aparente; f_T- porosidad, K- conductividad hidráulica, S_o-sortividad, Ts- temperatura del suelo, Θ_g- humedad gravimétrica. En los sistemas SAR y SAC: (a,b) triticale 1, (b,f) avena, (c,g) trigo, (d, h) triticale 2.

2.5.10 Discusión general

Los resultados presentados muestran diferencias marcadas en la influencia de las propiedades físicas del suelo sobre el rendimiento de cultivos entre sistemas de agricultura regenerativa (SAR) y convencional (SAC), tanto en los ciclos de PV como en OI. Estas diferencias no solo destacan la variabilidad entre tipos de cultivo, sino que reflejan los efectos del manejo agrícola sobre la calidad del suelo y su capacidad para sostener una producción agrícola sostenible.

En términos generales, los cultivos establecidos bajo el sistema SAR mostraron una mayor influencia de variables físicas del suelo sobre el rendimiento, mientras que en el sistema SAC, la explicación individual de estas propiedades fue considerablemente menor, especialmente en cultivos de OI como avena, trigo y triticale 1, donde en algunos casos no superaron el 3 % de explicación individual (Figura 8d, 8f). Este resultado concuerda con estudios recientes que evidencian cómo el SAR mejora la estructura del suelo, la actividad biológica y la retención de agua, lo cual incrementa la sensibilidad del rendimiento a variaciones en las propiedades edáficas (LaCanne & Lundgren, 2018; Giller *et al*., 2021).

En el SAR, propiedades como la conductividad hidráulica (K), la porosidad total (f_T) y la resistencia a la penetración (R_p) emergieron como los indicadores más explicativos del rendimiento en varios cultivos, particularmente en girasol, maíz y frijol. La conductividad hidráulica, en particular, se mostró como un indicador clave, coincidiendo con estudios que destacan su papel en la mejora del movimiento del agua y la disponibilidad de nutrientes para las raíces (Koehler *et al*., 2022).

Por el contrario, en los sistemas SAC, variables como la temperatura del suelo (T_s) y la sortividad (So) mostraron un impacto relativamente mayor en ciertos cultivos como girasol y sorgo, lo que podría deberse a una estructura del suelo más compactada y menos estable, donde la temperatura y el flujo inicial del agua superficial cobran mayor relevancia (Lal, 2020b).

2.5.11 Respuesta de los cultivos de PV

En los cultivos de PV como girasol y maíz, tanto en el SAR como el SAC, la conductividad hidráulica *(K*) fue determinante, pero su influencia explicativa fue mucho más alta en el SAR (hasta 43.6 % en maíz-SAR) que en el SAC (12.2 % en maíz-SAC). En girasol-SAR, la combinación de K, f_T, ρ_b y R_p alcanzó explicaciones individuales significativas (21.2 %-11.6 %), mientras que en el SAC la temperatura del suelo dominó el modelo (31.4 %). Este contraste reafirma que un suelo regenerado permite que variables relacionadas con la estructura y dinámica del agua del suelo sean más determinantes para la productividad (Reganold & Wachter, 2016).

En el caso del frijol-SAR, donde K, S_o y f_T explicaron más del 60 % del rendimiento, también refleja la importancia de un suelo bien estructurado para leguminosas, las cuales son más sensibles a la compactación y a la aireación del suelo (Mäeder *et al*., 2002).

2.5.12 Respuesta de los cultivos de OI

En el ciclo OI, los resultados revelan una tendencia clara: los cultivos bajo el SAR tienen una explicación del rendimiento mucho más ligada a las propiedades físicas del suelo que los del sistema convencional. En triticale 1-SAR, por ejemplo, K, R_p y f_T aportaron entre el 50.41 % y el 12.96 %, mientras que en el SAC-triticale 1 ninguna variable superó el 5.3 %. Esta diferencia sugiere que los suelos manejados con prácticas de manejo regenerativas presentan una mayor interacción entre las condiciones edáficas y el rendimiento de cultivos, lo que es congruente con estudios que evidencian una mayor resiliencia de los sistemas regenerativos frente a condiciones climáticas adversas (Basche & DeLonge, 2017).

La humedad aprovechable (Θ_a) también fue una variable destacada en los cultivos del SAR como el triticale 2, trigo y avena, explicando hasta un 48 % del rendimiento. Esta capacidad del suelo para retener agua disponible para las plantas resulta crítica en sistemas sostenibles, donde se busca disminuir la dependencia del riego y aprovechar la humedad del suelo disponible de forma natural (Altieri *et al*., 2015).

2.5.13 Importancia de los patrones acumulativos

Las gráficas de acumulación de porcentaje explicativo mostraron que, en el SAR, los tramos con pendiente positiva suelen abarcar varias variables clave (por ejemplo, de K a f_T en sorgo o de K a Θ_a en avena), lo que implica un efecto sinérgico entre múltiples propiedades del suelo sobre el rendimiento. En contraste, en el SAC, estas pendientes son planas o casi nulas en la mayoría de los tramos, lo cual indica una desconexión entre la calidad física del suelo y la producción, resultado típico de un manejo intensivo que degrada progresivamente la estructura del suelo (Gomiero, 2016).

2.6 CONCLUSIONES

- El sistema de agricultura regenerativa permite una mayor expresión del potencial productivo del suelo, donde variables físicas como la conductividad hidráulica, la porosidad y la humedad aprovechable explican de manera significativa el rendimiento.
- En el sistema de agricultura convencional, la influencia de estas propiedades es mucho más limitada, lo que refleja una degradación del suelo que reduce su capacidad de respuesta a condiciones físicas.
- Las diferencias observadas entre cultivos y ciclos de cultivo sugieren que la interacción suelo-planta es altamente dependiente del tipo de manejo agrícola y de las condiciones estacionales, pero consistentemente favorecen al SAR como una alternativa más sostenible y resiliente.

III. CONCLUSIONES GENERALES

Con base en los resultados presentados en ambos capítulos de la investigación, se tienen las siguientes conclusiones generales:

- La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo evidenció que el laboreo convencional tiende a degradar sus características edafológicas y disminuir su productividad. En contraste, la implementación de prácticas de manejo regenerativas, como la siembra directa y la cobertura con residuos de cultivo, favorece la conservación de la humedad y mejora las condiciones del perfil del suelo. Además, se comprobó que parámetros clave como la humedad y la resistencia a la penetración muestran una clara dependencia espacial, particularmente en el sistema de agricultura regenerativa, lo que resalta la importancia de incorporar herramientas como la geoestadística para caracterizar y comprender esta variabilidad. Aunque en esta etapa de la investigación, aún no se han evaluado los rendimientos de los cultivos, los mapas de distribución espacial generados ofrecen un recurso valioso para anticipar posibles correlaciones productivas y optimizar el manejo de los sistemas agrícolas estudiados.

- El análisis comparativo entre los dos sistemas agrícolas estudiados, evidencia que la agricultura regenerativa (SAR) promueve una mayor expresión del potencial productivo del suelo, al favorecer propiedades físicas clave como la conductividad hidráulica, la porosidad y la humedad aprovechable, las cuales inciden de manera importante en el rendimiento de los cultivos. En contraste, el sistema de agricultura convencional (SAC) muestra una limitada influencia de estas variables, reflejo de una degradación del suelo que compromete su funcionalidad. Además, las variaciones observadas entre cultivos y ciclos de cultivo resaltan la importancia del tipo de manejo en la dinámica suelo-planta, confirmando que el SAR ofrece una alternativa más sostenible y resiliente frente a los desafíos agroambientales.

IV. LITERATURA CITADA

Adhikari, K., Guadagnini, A., Toth, G., & Hermann, T. (2009). Geostatistical analysis of surface soil texture from Zala county in western Hungary. En *International Symposium on Environment, Energy and Western in Nepal: Recent Rasearches and Direction for Future* (pp. 219-224).

Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, *35*(3), 869-890. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2

Basche, A. D., & DeLonge, M. S. (2019). Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLOS ONE*, *14*(9), e0215702. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702

Basche, A., & DeLonge, M. (2017). The Impact of Continuous Living Cover on Soil Hydrologic Properties: A Meta-Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, *81*(5), 1179-1190. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.03.0077

Bedolla-Rivera, H. I., Xochilt Negrete-Rodríguez, M. de la L., Medina-Herrera, M. del R., Gámez-Vázquez, F. P., Álvarez-Bernal, D., Samaniego-Hernández, M., Gámez-Vázquez, A. J., & Conde-Barajas, E. (2020). Development of a Soil Quality Index for Soils under Different Agricultural Management Conditions in the Central Lowlands of Mexico: Physicochemical, Biological and Ecophysiological Indicators. *Sustainability*, *12*(22), 9754. https://doi.org/10.3390/su12229754

Bilibio, C., Weber, T. K. D., Hammer-Weis, M., Junge, S. M., Leisch-Waskoenig, S., Wack, J., Niether, W., Gattinger, A., Finckh, M. R., & Peth, S. (2025). Changes in soil mechanical and hydraulic properties through regenerative cultivation measures in long-term and farm experiments in Germany. *Soil and Tillage Research*, *246*, 106345. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106345

Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, *326*, 164-200. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011

Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2020). Cover crop impacts on soil physical properties: A review. *Soil Science Society of America Journal*. https://doi.org/10.1002/saj2.20129

Blanco-Canqui, H., Shaver, T., Lindquist, J., Shapiro, C., Elmore, R., Francis, C., & Hergert, G. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal,* 107(6), 2449-2474. https://doi.org/10.2134/agronj15.0086

Bravo, C., Cabrera, J., Carvallo, M., Cánchica, H., Ramírez, E., & González, I. (2011). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con el rendimiento de frijol (Vigna unguiculata L.) en una parcela experimental de los Llanos Centrales Venezolanos. *Bioagro,* 23(3), 219-228.

Breña Naranjo, A. (2021). Agua, suelo y agricultura regenerativa. *Perspectivas IMTA*, *2*(29). https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-29

Castaños, C. M. (2015). *El manejo del suelo y la materia orgánica: Principios fundamentales para un nuevo sistema de producción de alimentos.* Secretaría de Desarrollo Rural, Gobierno del Estado.

Castillo-Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo-Moreno, C. M. I., & Aguirre-Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: Generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, *39*. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698

Ciarlo, E. A., Muschietti, M. del P., Peralta, N., Comparín, M., Gregorini, F., Cipriotti, P. A., & Giuffre, L. (2020). Variabilidad espacial de propiedades del suelo: Efecto del uso y tipo. *Ciencia del Suelo*, 38(2), 174-190. https://ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/625

CIMMYT. (2013). *Resistencia a la penetración guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo*. https://repository.cimmyt.org/server/api/core/bitstreams/e6ce6372-6a9e-4b9b-9406-6c3605f95e28/content

CIMMYT, IDP. (s. f.). *Agricultores de Aguascalientes optimizan el uso de agua y conservan su suelo bajo la práctica de agricultura sustentable*. Recuperado 11 de septiembre de 2025, de https://idp.cimmyt.org/agricultores-de-aguascalientes-optimizan-el-uso-de-agua-y-conservan-su-suelo-bajo-la-practica-de-agricultura-sustentable/

Clewer, A. G. & Scarisbrick, D. H. (2001). *Practical Statistics and Experimental Design for Plant and Crop Science* | John Wiley & Sons .https://www.wiley.com/en-us/Practical+Statistics+and+Experimental+Design+for+Plant+and+Crop+Science-p-9780471899082

Crystal-Ornelas, R., Thapa, R., & Tully, K. L. (2021). Soil organic carbon is affected by organic amendments, conservation tillage, and cover cropping in organic farming systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *312*, 107356. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107356

de Graaff, M.-A., Kardol, P., & Throop, H. L. (2015). A meta-analysis of soil biodiversity impacts on the carbon cycle. *Soil*, 1(1), 257-271. https://doi.org/10.5194/soil-1-257-2015

Directo al Campo. (2023, julio 11). La Agricultura regenerativa en México y su creciente avance. *Regeneration International*. https://regenerationinternational.org/2023/07/11/la-agricultura-regenerativa-en-mexico-y-su-creciente-avance/

Falk, D. A., Winowiecki, L. A., Vågen, T.-G., & Lohbeck, M. (2023). Drivers of field-saturated soil hydraulic conductivity: Implications for restoring degraded tropical landscapes. *Science of The Total Environment,* 896, 168038. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168038

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Statistical yearbook world food and agriculture 2023. https://doi.org/10.4060/cc8166en

Fundación Humanitaria. (2024). *Impacto en el agua y el suelo—Humane Foundation*. fecha de consulta, 1 de octubre de 2024]https://cruelty.farm/es/ambiente/dano-ambiental/impacto-del-agua-y-el-suelo/

Gamie, R., & De Smedt, F. (2018). Experimental and statistical study of saturated hydraulic conductivity and relations with other soil properties of a desert soil. *European Journal of Soil Science*, *69*(2), 256-264. https://doi.org/10.1111/ejss.12519

García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen* (quinta edicion). Universidad Nacional Autónoma de México. https://librosoa.unam.mx/handle/123456789/1372

García Hernández, R. V., Garibaldi Márquez, F., Osuna Ceja, E. S., Martínez Reyes, E., & Borja Bravo, M.. (2018). *Sembradora Neumática para siembra de granos finos en camas.* SAGARPA-INIFAP-CIRNOC,https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_folletotecnico/1075_4759_Sembradora_Neum%c3%a1tica_para_siembra_de_granos_finos_en_camas.pdf

Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A., & Sumberg, J. (2021). Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. *Outlook on Agriculture*, *50*(1), 13-25. https://doi.org/10.1177/0030727021998063

Gomiero, T. (2016). Soil Degradation, Land Scarcity and Food Security: Reviewing a Complex Challenge. *Sustainability*, *8*(3), 281. https://doi.org/10.3390/su8030281

Grossman, R. B., & Reinsch, T. G. (2002). Bulk density and linear extensibility: Core method. En J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods* (pp. 208-228). Soil Science Society of America.

Guachún Calderón, D. R. (2022). *Evaluación de la variabilidad espacial de propiedades del suelo bajo diferentes usos/coberturas en la granja El Romeral de la Universidad de Cuenca*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/40024

Gürsoy, S. (2021). Soil Compaction Due to Increased Machinery Intensity in Agricultural Production: Its Main Causes, Effects and Management. En *Technology in Agriculture*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.98564

Hammer, R. D., Young, F. J., & Williams, F. (1998). Evaluating Central Tendency and Variance of Soil Properties within Map Units. *Soil Science Society of America Journal*, *62*(6), 1640-1646. https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200060022x

Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, *82*(2), 121-145. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009

Hernández, W., Marco, L., Torres, D., & Romero, P. (2018). Variabilidad espacial del pH y del contenido de Fe2O3 en suelos de la cuenca del río Tabure del Estado Lara. *Ciencia y Tecnología*, *11*(1), 19-27. https://doi.org/10.18779/cyt.v11i1.217

Hidalgo-Campos, C., & Camacho-Umaña, M. E. (2024). Potencial hídrico y contenido del agua en el suelo: Métodos de análisis disponibles y sus implicaciones en el manejo de los recursos suelo y agua. *Agronomía Costarricense*, 167-197. https://doi.org/10.15517/rac.v48i2.62575

Hu, W., Shao, M. A., & Si, B. C. (2012). Seasonal changes in surface bulk density and saturated hydraulic conductivity of natural landscapes. *European Journal of Soil Science*, *63*, 820-830. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01479.x

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007*). Conjunto de datos vectorial edafológico, Serie II (Continuo Nacional)* [Conjunto de datos]. escala 1:250,000. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235659

INEGI. (2007). *Conjunto de datos Vectorial Edafológico, Serie II, escala 1: 250,000 (Continuo Nacional). México.* https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235659

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2021, agosto 1). *Agua, suelo y agricultura regenerativa*. gob.mx. http://www.gob.mx/imta/articulos/agua-suelo-y-agricultura-regenerativa

Jaramillo, D. F. J. (2012). Variabilidad espacial del suelo: Bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias*, *1*(1), 73-87.

Jaramillo J., D. F., Sadeghian K., S., & Lince S., L. A. (2013). Variabilidad espacial de las bases en un Andisol de la zona cafetera central colombiana. Boletín de Ciencias de la Tierra, 33, 111-124.

Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., & Bowyer, J. (2023). Regenerative Agriculture—A literature review on the practices and mechanisms used to improve soil health. *Sustainability*, *15*(3), 2338. https://doi.org/10.3390/su15032338

Koehler, T., Moser, D. S., Botezatu, Á., Murugesan, T., Kaliamoorthy, S., Zarebanadkouki, M., Bienert, M. D., Bienert, G. P., Carminati, A., Kholová, J., & Ahmed, M. (2022). Going underground: Soil hydraulic properties impacting maize responsiveness to water deficit. *Plant and Soil*, *478*(1), 43-58. https://doi.org/10.1007/s11104-022-05656-2

LaCanne, C. E., & Lundgren, J. G. (2018). Regenerative agriculture: Merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ*, *6*, e4428. https://doi.org/10.7717/peerj.4428

Lal, R. (2020a). Regenerative agriculture for food and climate. *Journal of Soil and Water Conservation*, *75*(5), 123A-124A. https://doi.org/10.2489/jswc.2020.0620A

Lal, R. (2020b). Soil organic matter content and crop yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, *75*(2), 27A-32A. https://doi.org/10.2489/jswc.75.2.27A

Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variances. En I. Olkin (Ed*.), Contributions to probability and statistics: Essays in honor of Harold Hotelling* (pp. 278-292). Stanford University Press.

Lieskamp, D. R., Moseley, A. M., Legrain, I. M. R., Kelly, C., Haque, M. A., Ku, S., & Haruna, S. I. (2024). No-till cover crop effects on the hydro-physical properties of a silt loam. *Soil Science Society of America Journal*, *88*(3), 764-778. https://doi.org/10.1002/saj2.20645

Long, Z., Wang, Y., Sun, B., Tang, X., & Jin, K. (2024). Impact of mechanical compaction on crop growth and sustainable agriculture. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, *11*(2), 243-252. https://doi.org/10.15302/J-FASE-2024566

Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). *Soil fertility and biodiversity in organic farming.* Science, 296(5573), 1694-1697

Martínez-Gamiño, M. Á., Osuna Ceja, E. S., & Espinosa Ramírez, M. (2019). Impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades del suelo y rendimiento de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *10*(4), 765-778. https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1640

Martínez-Valderrama, J, Gartzia, R., Olcina, J, Guirado, E., Ibáñez, J, & Maestre, F. T. (2023). *Un estudio liderado por el CSIC determina que la agricultura intensiva a gran escala es una amenaza para las zonas áridas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.* https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/un-estudio-liderado-por-el-csic-determina-que-la-agricultura-intensiva-gran-escala-es-una-amenaza-para-las-zonas-aridas

Mbarki, Y., Gumiere, S. J., Celicourt, P., & Brédy, J. (2023). Study of the effect of the compaction level on the hydrodynamic properties of loamy sand soil in an agricultural context. *Frontiers in Water*, *5*. https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1255495

Medina, G. G., Maciel, P. L. H., Ruiz, C. J. A., Serrano, A. V., & Silva, S. M. M. (2006). *Estadísticas climatológicas básicas del estado de Aguascalientes (período 1961-2003)* (Libro Técnico Núm. 2). INIFAP, Campo Experimental Pabellón.*

Monsalve , Camacho, Oscar Iván, Bojacá, Aldana ,Carlos Ricardo, & Henao, Toro, Martha Cecilia. (2021). *Agricultural sustainability indicators associated with soil properties, processes, and management*. https://revistacta.agrosavia.co/html/1919/

Montgomery, D. C. (2009). *Design and Analysis of Experiments* (7th Edition). John Wiley & Sons.

Northrup, D. L., Basso, B., Wang, M. Q., Morgan, C. L. S., & Benfey, P. N. (2021). Novel technologies for emission reduction complement conservation agriculture to achieve negative emissions from row-crop production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *118*(28), e2022666118. https://doi.org/10.1073/pnas.2022666118

Núñez-Peñaloza, J. L., Pérez-Nieto, J., & Prado-Hernández, J. V. (2023). Análisis de indicadores e índices de calidad de suelos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *14*(6), e3148. https://doi.org/10.29312/remexca.v14i6.3148

Ortega, J. S. (2020, septiembre 13). Agricultura inteligente para protegerse del cambio climático. *El País*. https://elpais.com/elpais/2020/09/10/planeta_futuro/1599723844_846240.html

Osuna-Ceja, E. S., Martínez-Gamiño, M. Á., Padilla-Ramírez, J. S., & Pimentel-López, J. (2024). Indicadores de calidad de suelo y productividad sustentable con agricultura de conservación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *15*(8), e2970. https://doi.org/10.29312/remexca.v15i8.2970

Pimentel, D., & Burgess, M. (2013). Soil Erosion Threatens Food Production. *Agriculture*, *3*(3), 443-463. https://doi.org/10.3390/agriculture3030443

Pinzón-Gómez, L. P., Herrera, J. G. A., & Mesa-Amezquita, A. (2016). Study of the spatial variability of moisture and compaction in soils with different plant covers. *Agronomía Colombiana*, *34*(3), 355-363. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n3.59984

Qu, L., Zhu, Y., Liang, Y., & Qiu, D. (2023). Spatial variation of soil properties and evaluation of the risk of soil erodibility on a river alluvial and marine sedimentary plain in eastern China. Journal of Soils and Sediments, 23(9), 3375-3388. https://doi.org/10.1007/s11368-023-03460-8

Raveloaritiana, E., & Wanger, T. C. (2024). *Decades matter: Agricultural diversification increases financial profitability, biodiversity, and ecosystem services over time* (arXiv:2403.05599). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.05599

Reganold, J. P., & Wachter, J. M. (2016). Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, *2*(2), 15221. https://doi.org/10.1038/nplants.2015.221

Reyes Palomino, S. E. , & Cano Ccoa, D. M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas* *24*(1), 53-64. https://doi.org/10.18271/ria.2022.328

Rodríguez, Reta, I. R., Robles, E. O. L., Calderón, C. E. A., Pulido, S. J. B., & Favela, D. O. A. (2024). Evaluación de las propiedades físicas e hidrológicas de un Vertisol con diferentes usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *15*(84), 105-131. https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1463

Rojas S. C., Osuna C. E.S., & N. Y. Zitz R. C. (2013). *Sembradora de precisión, versátil para agricultura de conservación.* [Folleto técnico Núm.. 51 ISBN, 978-607-37-0169-3].

Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., Nyamangara, J., & Giller, K. E. (2012). Maize–grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholder farmers in central Mozambique. *Field Crops Research*, *136*, 12-22. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.014

Sadzawka A, Carrasco MA & Grez R, Mora ML. (2016). *Métodos de Análisis Recomendados para los Suelos Chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo.* https://www.schcs.cl/wp-content/uploads/2018/11/Analisis-de-suelos.pdf

Schreefel, L., Schulte, R. P. O., de Boer, I. J. M., Schrijver, A. P., & van Zanten, H. H. E. (2020). Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security*, *26*, 100404. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250,000. Memoria Nacional 2001-2002.* SEMARNAT, Colegio de Postgraduados.

Soracco, C. G., Lozano, L. A., Sarli, G. O., Gelati, P. R., & Filgueira, R. R. (2010). *Anisotropy of Saturated Hydraulic Conductivity in a soil under conservation and no-till treatments*. https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.013

Subhash, M., Sinha, N. K., Kumar, J., Mohanty, M., Sahoo, R. N., Jayaraman, S., Kumar, N., Rani, A., Thakur, J. K., Mandal, A., Kumar, D., Mishra, R., & Prabhakar, M. (2025). Spatial variability of soil physicochemical properties in soybean wheat belts in Vertisols of central India. *Scientific Reports*, *15*(1), 33830. https://doi.org/10.1038/s41598-025-03540-4

Tapia Sánchez, D. (2025, marzo 31). *Agricultura Regenerativa: Origen, Beneficios y Presencia en México - Banco de Alimentos de Culiacán*. https://baculiacan.org.mx/opinion-baculiacan/agricultura-regenerativa-origen-beneficios-y-presencia-en-mexico/

Tavares, L. de F., Carvalho, A. M. X. de, & Machado, L. G. (2016). An Evaluation of the Use of Statistical Procedures in Soil Science. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, *40*, e0150246. https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150246

Teague, W. R, Kreuter, U. P, & Rowntree, J. E. (2020). The role of ruminants in reducing agriculture's carbon footprint in North America. Journal of Soil and Water Conservation. https://doi.org/10.2489/jswc.71.2.156

Valdez-Gálvez, M. de J., Coronado-González, Y.´in U. kan, & Camarena-Gómez, B. O. (2023). Degradación ambiental y sustentabilidad en áreas con prácticas agrícolas intensivas de Sonora, México. *Scientia et PRAXIS*, *3*(05), 26-50. https://doi.org/10.55965/setp.3.coed1.a2

Vargas S, R. P., Serrato C, F., & Torrente T., A. (2015). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas—Huila. *Ingeniería y Región*, *13*, 113-123. https://doi.org/10.25054/22161325.713

Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). Geostatistics for Environmental Scientists. (2nd ed.). John Wiley & Sons.