

Universidad Autónoma de Sinaloa
Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte
Maestría en Producción Agrícola Sustentable



TESIS:

“Acrilato de potasio como potencial retenedor de agua en
suelos productores de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) en Ahome,
Sinaloa”

**Que para obtener el grado de Maestro en Ciencias en
Producción Agrícola Sustentable**

PRESENTA:

José Pablo Romero Berrelleza

DIRECTOR DE TESIS:

Dra. Karen Rábago Zavala.

CO-DIRECTOR DE TESIS:

M.C. Edgar Valenzuela Cuadras

ASESORES:

Dra. Blanca Elvira López Valenzuela.

Dr. Gabriel Herrera Rodríguez.

Juan José Ríos, Sinaloa, México; a 20 de junio del 2026



Universidad Autónoma de Sinaloa Dirección

General de Bibliotecas Repositorio

Institucional Buelna Restricciones de uso



Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd.
Universitarios
C.P. 80010 Culiacán Sin. Méx.
Tel (667) 713 78 32 y
(667) 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

ESTA TESIS FUE REALIZADA POR **JOSÉ PABLO ROMERO BERRELLEZA** BAJO LA DIRECCIÓN DEL CONSEJO PARTICULAR QUE SE INDICA, Y HA SIDO APROBADA POR EL MISMO, COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO (A) EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE

**(SELLO DE
POSGRADO)**

CONSEJO PARTICULAR

DIRECTOR

Dra. Karen Rábago Zavala.

CO-DIRECTOR

M.C. Edgar Valenzuela Cuadras

ASESORA

Dra. Blanca Elvira López Valenzuela.

ASESOR

Dr. Gabriel Herrera Rodríguez.

JUAN JOSÉ RÍOS, SINALOA. JUNIO DE 2026.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis, en primer lugar, a mi abuela Blanca Guadalupe Gastélum Rodríguez, quien fue y seguirá siendo mi gran inspiración en la vida. Su ejemplo, consejos y constante motivación para valorar la educación como un medio de superación personal fueron fundamentales para que hoy pueda culminar esta etapa académica.

A mis padres, José Mateo Romero Gastélum y Blanca Guadalupe Berrelleza Gastélum, por su apoyo incondicional, esfuerzo y sacrificio a lo largo de mi formación. Gracias por creer en mí, por impulsarme a hacia adelante siempre en los tiempos difíciles y por ser el pilar que ha sostenido cada uno de mis logros.

A mi hermana Mariana, por su compañía, comprensión y apoyo constante, que han sido un aliento importante durante este proceso académico.

Finalmente, dedico este trabajo a mi novia, por su paciencia, apoyo emocional y confianza en mí, siendo un apoyo fundamental durante el desarrollo de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento al Dra. Karen Rábago Zavala, directora de Tesis, por orientar mi trayectoria académica, su disposición y valiosas aportaciones en el desarrollo de la investigación. Su experiencia, compromiso y acompañamiento fueron fundamentales para la correcta culminación del trabajo. De igual manera, agradezco a la M.C. Edgar Valenzuela Cuadras, Codirector de Tesis, por su apoyo constante, observaciones oportunas y sugerencias técnicas, las que contribuyeron significativamente a mejorar la parte metodológica y la calidad científica del estudio. A los asesores, Dra. Blanca Elvira López Valenzuela y Dr. Gabriel Herrera Rodríguez, les agradezco profundamente su tiempo, conocimientos y recomendaciones, que permitieron fortalecer el análisis, interpretación de resultados y estructura general de la investigación.

De igual forma, agradezco a todos los profesores que formaron parte de la Maestría, los que a lo largo de esta etapa compartieron sus conocimientos, enseñanzas y experiencias, contribuyendo de manera significativa a mi formación profesional y académica.

Finalmente, doy gracias a la institución por brindar las facilidades, recursos y el entorno académico necesario para la realización del proyecto de investigación.

CONTENIDO

CONTENIDO

	PÁGINA
INDICE DE CUADROS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	Xi
RESUMEN.....	Xii
ABSTRACT.....	Xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	17
II. ANTECEDENTES	20
2.1. Origen del sorgo	20
2.2. Importancia del sorgo	20
2.2.1 Producción Global y Distribución Geográfica.....	20
2.2.2 Valor Económico del Sorgo en la Agricultura.....	21
2.2.3 Usos Industriales y Su Impacto en la Economía Global.....	21
2.3 Descripción general del cultivo de sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	22
2.3.1 Taxonomía.....	22
2.4 Anatomía y fisiología	22
2.4.1 La planta	23
2.4.1.1 Las hojas.....	23
2.4.1.2 El tallo.....	23
2.4.1.3 Inflorescencia	23
2.4.1.4 El fruto.....	24
2.4.1.5. Sistema radicular.....	24

2.4.2 Fisiología del Sorgo.....	25
2.4.2.1 Fotosíntesis y Respiración.....	25
2.4.3 Variedades.....	25
2.5 Requerimientos del cultivo.....	27
2.5.1 Clima.....	27
2.5.2 Temperatura.....	27
2.5.3 Luz solar.....	27
2.5.4 Precipitación.....	28
2.5.5 Suelo.....	28
2.5.6 Potencial de Hidrógeno (pH).....	28
2.5.7 Riego.....	29
2.5.8 Fertilización.....	29
2.6.1 Transpiración.....	30
2.6.2 Crecimiento y Desarrollo.....	30
2.7 Problemáticas del cultivo.....	30
2.7.1 Sensibilidad a las heladas.....	31
2.7.2. Plagas y enfermedades.....	31
2.7.3. Condiciones de suelo inadecuadas.....	31
2.7.4. Requerimientos nutricionales.....	31
2.7.5. Competencia con otras plantas.....	32
2.7.6. Baja aceptación en el mercado.....	32
2.7.7. Costos de producción elevados.....	32
2.7.8. Necesidad de investigación genética.....	33

2.8. Suelos arenosos.....	33
2.8.1. Características de los Suelos Arenosos.....	34
2.8.2. Textura y Composición.....	34
2.8.3. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).....	35
2.8.4. Propiedades Físicas.....	35
2.8.5. Factores que Afectan la Productividad en Suelos Arenosos.....	35
2.8.5.1. Disponibilidad de Agua.....	36
2.8.5.2. Nutrientes del Suelo.....	36
2.8.6. Estrategias de Manejo de Suelos Arenosos para la Agricultura.....	36
2.8.6.1. Riego Eficiente.....	36
2.8.6.2. Fertilización Controlada.....	36
2.8.6.3 Uso de Materia Orgánica.....	36
2.8.7 Impacto de los Suelos Arenosos en el Cultivo de Sorgo.....	36
2.8.7.1 Alternativas para los suelos arenosos.....	36
2.8.7.2 Sistema radicular.....	37
2.8.7.3 Adaptación a la sequía.....	37
2.8.8. Prácticas de conservación para suelos arenosos.....	38
2.8.8.1. Cultivos de cobertura.....	38
2.8.8.2 Uso de barreras vegetales.....	38
2.8.8.3 Enmiendas Orgánicas.....	38
2.8.9. Fertilización.....	39
2.8.9.1. Fertilización Controlada.....	39
2.8.9.2. Fertilización a medida.....	39

2.8.9.3. Fertilización foliar.....	39
2.8.9.4. Uso de biofertilizantes.....	39
2.9. Técnicas de Conservación del Suelo.....	39
2.9.1. Cultivos de cobertura.....	40
2.9.2. Siembra directa o mínimo laboreo.....	40
2.9.3. Uso de barreras vegetales.....	40
2.9.4. Técnicas de Riego Eficiente.....	40
2.9.5. Uso de Cultivos Resilientes.....	40
2.9.5.1. Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>).....	40
2.9.5.2. Cebada y avena.....	41
2.9.5.3. Leguminosas.....	41
2.9.6. Aplicación de Micorrizas y Bacterias Fijadoras de Nitrógeno.....	41
2.9.7. Usos de polímeros superabsorbentes.....	41
2.10. Uso del acrilato de potasio.....	42
2.11 Estudios previos en cultivos similares al sorgo.....	43
III. HIPÓTESIS.....	45
IV. OBJETIVOS.....	46
4.1 Objetivo general.....	46
4.2 Objetivos específicos.....	46
V JUSTIFICACIÓN.....	47
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
6.1 Ubicación del experimento.....	48
6.2 Análisis fisicoquímica del suelo.....	49

6.3 Diseño experimental y unidad experimental.....	49
6.4 Establecimiento del cultivo.....	50
6.5 Tratamientos y aplicación de acrilato de potasio.....	50
6.6 Manejo de riego.....	52
6.7 Medición del contenido de agua del suelo y calibración TDR agronómicas.....	52
6.8 Manejo agronómico del cultivo.....	53
6.9 Medición de variables agronómicas.....	54
6.10 Cosecha y determinación del rendimiento.....	54
6.11 Análisis estadístico.....	56
VII. RESULTADOS Y DISCUSION.....	57
7.1 Efecto de los tratamientos con hidrogel sobre la humedad del suelo	58
7.2 Variables agronómicas.....	59
7.3 Rendimiento del cultivo de sorgo.....	64
7.4 Efecto de las dosis del tratamiento sobre el contenido de humedad del grano..	65
7.5. Efecto de las dosis del tratamiento sobre el peso específico del grano.....	67
7.6. Análisis costo beneficio del uso del acrilato de potasio en el cultivo de sorgo..	69
VIII. CONCLUSIONES.....	74
IX. LITERATURA CITADA.....	76

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1	Principales estados productores de sorgo de México 21
2	caracterización física y química del suelo del sitio experimental..... 49
3	Promedio de días transcurridos después del riego en función de la dosis de hidrogel..... 60
4	Efecto de las dosis de acrilato de potasio sobre el peso de panoja..... 62
5	Peso de parcela cosechada y rendimiento estimado por hectárea en función de la dosis aplicada 65
6	Efecto del hidrogel sobre el rendimiento y la rentabilidad del sorgo..... 72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Planta de sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench) y sus principales estructuras morfológicas.....	20
2. Grano de sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench) y estructura interna de la cariósida	22
3. Grano de sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench) y estructura interna de la cariósida	24
4. Relación entre el pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas	26
5. Triángulo de textura de suelos que muestra la clasificación de los suelos en función del porcentaje de arena, limo y arcilla.....	33
6. Muestra la ubicación del sitio experimental dentro del municipio de Ahome, Sinaloa, caracterizado por suelos de textura ligera y limitada disponibilidad hídrica.....	46
7. Plano y diseño de la zona de estudio.....	48
8. Aplicación del acrilato de potasio.....	49
9. Método de riego por gravedad.....	50
10. Medición de contenido volumétrico.....	51
11. Medición de altura de planta.....	52
12. Cosecha del cultivo de sorgo.....	53

13.	Contenido volumétrico de agua (%) en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de hidrogel.....	56
14.	Dinámica de la pérdida de humedad del suelo en función del tiempo bajo diferentes dosis de hidrogel.....	59
15.	Promedios de porcentaje de humedad de grano.....	65
16.	Promedios de peso específico de grano de sorgo.....	67

RESUMEN

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es de gran importancia agrícola en zonas áridas y semiáridas, debido a su tolerancia al estrés hídrico y a su relevancia como fuente de grano. En México, este cultivo ocupa una posición estratégica en regiones con baja disponibilidad de agua, como el norte del estado de Sinaloa; sin embargo, la escasez hídrica continúa siendo un factor principal, que limitan su productividad. En este contexto, el uso de polímeros superabsorbentes puede ser una alternativa eficaz para mejorar la retención de agua del suelo y la eficiencia en el uso del agua.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de dosis diferentes de acrilato de potasio sobre la retención de humedad del suelo y el rendimiento del cultivo de sorgo en Ahome, Sinaloa.

El experimento se realizó en el municipio de Ahome, Sinaloa, durante el ciclo otoño–invierno 2023–2024, con un diseño experimental de bloques completos al azar, cuatro tratamientos (0, 50, 100 y 150 gramos por metro lineal de hidrogel) y cuatro repeticiones. Se evaluaron variables como contenido volumétrico de humedad del suelo, altura de planta, peso de panoja, peso específico del grano, humedad del grano y rendimiento estimado por hectárea. Los resultados evidenciaron un incremento progresivo en retención de humedad del suelo conforme aumentó la dosis de hidrogel, siendo el tratamiento con 150 g/m el que presentó la mayor retención hídrica y el mayor intervalo entre riegos. Asimismo, el peso de panoja, peso específico del grano y rendimiento presentaron incrementos significativos en los tratamientos con hidrogel respecto al control, destacando la dosis alta con un rendimiento estimado de 5,913 kg ha⁻¹, en comparación con 3,700 kg ha⁻¹ del tratamiento sin aplicación. En contraste, en altura de planta, estadísticamente no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. El análisis económico indicó que, a pesar del incremento en el rendimiento, el uso del hidrogel no resultó rentable en un solo ciclo agrícola debido a su alto costo.

Se concluye que la aplicación de acrilato de potasio mejora significativamente la retención de humedad en suelo y el rendimiento del cultivo, aunque su viabilidad económica depende de su residualidad y de estrategias de manejo más eficientes.

Palabras clave: polímero superabsorbente, alternativa tecnológica, eficiencia hídrica, agua disponible.

ABSTRACT

Sorghum (**Sorghum bicolor** L. Moench) is of great agricultural importance in arid and semi-arid zones due to its tolerance to water stress and its value as a grain source. In Mexico, this crop holds a strategic position in regions with low water availability, such as northern Sinaloa; however, water scarcity remains a primary factor limiting its productivity. In this context, the use of superabsorbent polymers offers a potential alternative for improving soil water retention and water use efficiency.

This study aims to evaluate the effect of different dosages of potassium acrylate on soil moisture retention and sorghum crop yield in Ahome, Sinaloa.

The experiment was conducted in the municipality of Ahome, Sinaloa, during the 2023–2024 autumn–winter season, using a randomized complete block design with four treatments (0, 50, 100, and 150 grams of hydrogel per linear meter) and four replications. Variables evaluated included volumetric soil moisture content, plant height, panicle weight, grain specific weight, grain moisture, and estimated yield per hectare. Results showed a progressive increase in soil moisture retention as the hydrogel dosage increased; the 150 g/m treatment exhibited the highest water retention and the longest interval between irrigations. Likewise, panicle weight, grain specific weight, and yield showed significant increases in the hydrogel treatments compared to the control, with the high dosage standing out by achieving an estimated yield of 5,913 kg ha⁻¹, compared to 3,700 kg ha⁻¹ for the treatment without application. In contrast, there were no statistically significant differences in plant height among the treatments. Economic analysis indicated that, despite the yield increase, the use of hydrogel was not profitable within a single agricultural cycle due to its high cost. It is concluded that the application of potassium acrylate significantly improves soil moisture retention and crop yield, although its economic viability depends on its residual effect and more efficient management strategies.

Keywords: perabsorbent polymer, technological alternative, water-use efficiency, available water.

I. INTRODUCCIÓN

El sorgo se sitúa entre los granos más cruciales para la alimentación humana en naciones en desarrollo, especialmente en aquellas zonas donde las dificultades económicas y la inseguridad alimentaria restringen el acceso a otros alimentos básicos. Su importancia radica en su capacidad para prosperar en entornos cálidos y secos, donde otros cultivos luchan por establecerse y producir de manera eficaz. Esta adaptación le permite seguir siendo una opción viable en áreas afectadas con regularidad por sequías y escasez de agua.

Más allá de su valor nutricional, el sorgo destaca por el aprovechamiento integral de sus partes. Tanto el grano como los residuos de la planta poseen importancia económica para los agricultores, particularmente en regiones con recursos limitados. En diversos países en desarrollo, la paja generada tras la cosecha constituye una fuente adicional de ingresos y, durante los años de sequía severa, puede llegar a representar hasta el 50 % del valor económico total del cultivo (FAO, 2021).

El agua disponible influye directamente en la producción agrícola mundial. El desarrollo y rendimiento de los cultivos dependen de este recurso, lo que convierte a su escasez en una de las principales limitaciones de la agricultura. Muchas regiones reciben precipitaciones insuficientes para satisfacer los requerimientos hídricos de las plantas, esto reduce significativamente la producción de los sistemas agrícolas. Esta problemática se agrava aún más por el constante aumento y demanda de alimentos y la creciente presión sobre unos recursos hídricos cada vez más limitados, impulsando la búsqueda de tecnologías y estrategias orientadas a mejorar la eficiencia en el uso del agua. Esta necesidad se hace más evidente ante los efectos de cambio climático, los cuales incrementan la incertidumbre respecto a la disponibilidad futura de agua y plantean desafíos significativos para la seguridad alimentaria (Solís et al., 2018).

En México, el sorgo ocupa una posición destacada dentro de la producción agrícola nacional. Durante el ciclo otoño-invierno 2022-2023, se cosecharon aproximadamente 897,363 hectáreas —lo que representa el 99.3 % de la superficie sembrada—, alcanzando una producción de cerca de 2.74 millones de toneladas de grano. Tamaulipas se consolidó como el principal estado productor, aportando más del 75% de la producción nacional, seguido por estados como Nayarit, Sinaloa, Campeche y

San Luis Potosí. Para el ciclo primavera-verano de 2023, la superficie de siembra se estimó en más de 565 mil hectáreas, con una producción esperada que superaría los 2.4 millones de toneladas. Para julio de ese año, se había establecido más del 60% del área planificada, destacando al estado de Guanajuato, Michoacán, Morelos, Sinaloa y Jalisco por su participación en la producción nacional. Asimismo, Sinaloa se situó entre los estados con mayor contribución productiva durante dicho periodo (SIAP, 2023).

La optimización del uso del agua representa actualmente una prioridad para la agricultura, particularmente en aquellas regiones donde la disponibilidad hídrica es limitada y las condiciones ambientales presentan una alta variabilidad. En el norte de Sinaloa, por ejemplo, la precipitación media anual se aproxima a los 270 mm y las temperaturas promedio rondan los 25 °C; condiciones que hacen indispensable mejorar la capacidad del suelo para retener y conservar la humedad. La disponibilidad de agua almacenada en el perfil del suelo influye directamente en el establecimiento del cultivo, su desarrollo fisiológico y, en última instancia, en su rendimiento productivo (García, 2010).

Ante este desafío, los polímeros superabsorbentes han suscitado un interés creciente como herramienta para optimización del agua la agricultura. Entre estos materiales, el acrilato de potasio ha mostrado resultados favorables debido a su potencial para absorber altas cantidades de agua y liberarla gradualmente conforme las plantas la requieren. Esta propiedad resulta particularmente valiosa en zonas áridas y semiáridas, donde el agua suele ser insuficiente para el desarrollo de los cultivos (Zhang et al., 2015). Según informes de El-Rehim et al. (2004), la incorporación de este polímero contribuye a mantener mayores reservas de humedad en el suelo durante los periodos de déficit hídrico, favoreciendo así el crecimiento vegetal y la productividad.

Múltiples estudios han demostrado que la aplicación de polímeros superabsorbentes puede generar beneficios significativos en los sistemas agrícolas, como: mejora en las propiedades físicas y químicas del suelo, una mayor eficiencia en el aprovechamiento del agua disponible y la reducción de la frecuencia de riego. Adicionalmente, se ha documentado que estos materiales promueven un mejor desarrollo vegetal y contribuyen al incremento de los rendimientos en diversos cultivos (Gehring et al.,

2007). Considerando estos antecedentes, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar tres dosis de acrilato de potasio en comparación con un tratamiento control sobre el contenido volumétrico de agua disponible en el suelo (VWC) y su impacto en el rendimiento del cultivo de sorgo.

II. ANTECEDENTES

2.1. Origen del sorgo

El sorgo (*Sorghum bicolor*) tiene su origen en África, específicamente en la región del Sahel, lo que lo hace una planta muy adaptada a climas cálidos y secos. Es considerado uno de los cultivos más antiguos, cultivado desde hace más de 5,000 años. La evidencia arqueológica sugiere que comenzó a ser cultivado en la zona de lo que hoy es Sudán y Etiopía, donde se ha mantenido como una planta fundamental para la alimentación y la agricultura en regiones de clima árido y semiárido (Hernan *et al.*, 1972).

Es una de las especies de cereal más cultivadas en todo el mundo, especialmente en regiones semiáridas y tropicales. En muchas partes del mundo, su cultivo juega un papel crucial en la seguridad alimentaria, la economía agrícola y la sostenibilidad ambiental. Este cereal se destaca por su capacidad de adaptarse a suelos poco fértiles y por su resistencia a la sequía, lo que lo convierte en una opción viable para zonas donde otras plantas de grano no pueden prosperar.

2.2. Importancia del sorgo

2.2.1 Producción Global y Distribución Geográfica

El sorgo es uno de los cultivos de grano más importantes, especialmente en países como India, Estados Unidos, Brasil y algunos países de África. Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021). En 2024, la producción mundial de sorgo alcanzó aproximadamente 61.5 millones de toneladas, consolidándose como uno de los cereales más importantes a nivel global. Estados Unidos lideró la producción con cerca de 9.3 millones de toneladas, seguido por Nigeria con 6.6 millones, mientras que México registró una producción aproximada de 4.8 millones de toneladas aportando alrededor del 7.3 % del total mundial y posicionándose entre los cinco principales países productores de este cultivo.

A nivel nacional, los estados productores que ocuparon los primeros lugares fueron Tamaulipas, Guanajuato y Michoacán. El estado de Sinaloa ocupó el cuarto lugar nacional, con una producción cercana a 296,456 toneladas (Cuadro 1). Lo que representa aproximadamente el 6.2 % de la producción total del país, destacando su importancia en la oferta nacional de sorgo (FAO, 2021).

Cuadro 1. *Principales estados productores de sorgo en México (FAO, 2021).*

Estado	Superficie sembrada (ha)	Producción (toneladas)	Participación nacional (%)	Valor económico estimado (MXN)
Tamaulipas	571,000	2,000,000	41.7	\$9,000,000,000
Guanajuato	257,000	900,000	18.8	\$4,050,000,000
Michoacán	186,000	650,000	13.5	\$2,925,000,000
Sinaloa	84,700	296,456	6.2	\$1,334,052,000

2.2.2 Valor Económico del Sorgo en la Agricultura

Desde un punto de vista económico, el sorgo representa una fuente de ingresos significativa para los pequeños y medianos productores, especialmente en África y Asia. El grano es utilizado para la producción de alimentos y piensos, y también tiene aplicaciones industriales en la fabricación de etanol y biocombustibles (Ranum *et al.*, 2020). En países como Estados Unidos, el sorgo es una fuente clave de alimentación animal, especialmente en la industria ganadera, y contribuye significativamente al mercado de exportaciones. De acuerdo con la Universidad de Texas A&M (2022), el sorgo representa una importante fuente de ingresos para los productores agrícolas, al ser un cultivo resistente que requiere menos insumos en comparación con otros cereales como el maíz.

En México el costo promedio de establecimiento del cultivo de sorgo se estima entre \$12,000 y \$15,000 MXN por hectárea, dependiendo del sistema de producción, tipo de suelo y nivel tecnológico empleado. El precio promedio de comercialización del grano durante 2024 fue de aproximadamente \$4,500 por tonelada. Considerando un rendimiento medio nacional de 3.5 t ha⁻¹, el ingreso bruto por hectárea puede alcanzar alrededor de \$15,750, lo que genera una ganancia neta estimada de entre \$1,500 y \$3,500 por hectárea. Estos valores confirman que el sorgo es un cultivo económicamente viable, especialmente en zonas con limitaciones hídricas, donde otros cereales presentan mayores riesgos productivos. (SIAP, 2024).

2.2.3 Usos Industriales y Su Impacto en la Economía Global

Además de su valor como grano alimenticio y forrajero, el sorgo también tiene un valor significativo en la industria de los biocombustibles. En los últimos años, el uso de sorgo

en la producción de etanol ha cobrado relevancia, ya que se considera una alternativa sostenible frente a los combustibles fósiles. Según un estudio de Liu, Xie y Zhang (2019), la demanda de etanol producido a partir de sorgo ha aumentado debido a su eficacia en la transformación de biomasa en energía, lo que ha llevado a un aumento en la superficie cultivada de este cereal en varias regiones del mundo. Esto, a su vez, ha generado nuevas oportunidades económicas en las zonas rurales, creando empleos en la producción de biocombustibles y promoviendo la inversión en tecnologías sostenibles.

2.3 Descripción general del cultivo de sorgo

2.3.1 Taxonomía

Pérez (2010), clasificó al sorgo (*Sorghum bicolor* L.) de la siguiente manera

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Poales

Familia: Poaceae

Género: *Sorghum*

Especie: *Sorghum bicolor* (L.) Moench 1794

2.4 Anatomía y fisiología

El sorgo pertenece al género *Sorghum*, el cual comprende alrededor de 25 especies, siendo *Sorghum bicolor* (L.) Moench la única especie ampliamente domesticada y cultivada a nivel mundial. Esta especie es una de las más importantes dentro de los cereales debido a su amplia adaptación ecológica y a su importancia en la alimentación de humanos, animales y en usos industriales (Vega *et al.*, 2015).

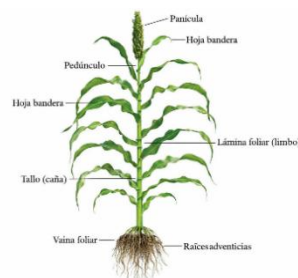


Figura 1. Planta de sorgo y sus principales estructuras morfológicas

2.4.1 La planta

El sorgo es una gramínea anual herbácea, de crecimiento determinado, porte erecto y escasa ramificación lateral. Puede alcanzar alturas que varían entre 0.8 y 4.0 m, dependiendo de la variedad, el manejo agronómico y las condiciones climáticas. Presenta una elevada plasticidad fisiológica, lo que le permite adaptarse a ambientes cálidos y secos. (Martínez *et al.*, 2017).

2.4.1.1 Las hojas

Las hojas del sorgo son simples, alternas y lanceoladas, con una longitud que varía entre 30 y 135 cm y de ancho de 2 a 13 cm. La lámina foliar presenta nervadura central bien marcada y nervaduras secundarias paralelas, típicas de las gramíneas. La vaina foliar envuelve parcialmente el tallo y la lígula es corta y membranosa; carece de aurículas. La superficie de la hoja puede presentar una capa cerosa que evita la pérdida de agua por transpiración, contribuyendo a su adaptación a condiciones de estrés hídrico.

2.4.1.2 El tallo

Conocido como caña, es cilíndrico, sólido o ligeramente esponjoso, con entrenudos bien definidos y nudos prominentes (Figura 1). Su coloración varía de verde claro a verde oscuro, y en algunos cultivares puede presentar tonalidades rojizas o purpúreas.

El crecimiento del tallo es vertical y continuo hasta la emisión de la inflorescencia. En algunos genotipos puede presentarse macollamiento limitado, dependiendo del espaciamiento y las condiciones ambientales. El tallo es generalmente glabro y de color verde claro a verde oscuro, pudiendo presentar coloraciones rojizas o purpúreas.

2.4.1.3 Inflorescencia

Es una panícula terminal, cuya forma puede ser compacta, semicompacta o laxa, con una longitud aproximada de 10 a 60 cm. La panícula está constituida por pares de espiguillas, una sésil fértil y otra pedicelada generalmente estéril. Las flores son hermafroditas y presentan tres estambres y un ovario súpero. El sorgo es predominantemente autógamo, aunque puede presentarse polinización cruzada en porcentajes variables, generalmente inferiores al 10 %, dependiendo de la variedad y el ambiente.

2.4.1.4 El fruto

El grano de sorgo corresponde a una cariósida compuesta por pericarpio, endospermo y embrión (Figura 2). El grano se encuentra parcialmente cubierto por glumas persistentes y presenta una amplia variación de color, que puede ser blanco, amarillo, rojo, marrón o negro, según el cultivar. El endospermo puede ser harinoso, vítreo o intermedio, característica que influye directamente en su uso alimenticio o industrial.

Las semillas contienen un embrión bien desarrollado y reservas nutricionales que permiten una germinación rápida bajo condiciones adecuadas. El ciclo del cultivo varía generalmente entre 90 y 140 días, dependiendo del tipo de sorgo (granífero, forrajero o dulce) y de las condiciones agroclimáticas (Ramírez *et al.*, 2018).

Debido a su alta tolerancia a la sequía, eficientiza el uso del agua y la capacidad de adaptación a ambientes cálidos y semiáridos, el sorgo es considerado de los cereales uno de los más importantes para la seguridad alimentaria y la producción agrícola sostenible en regiones con limitaciones hídricas (FAO, 2018).

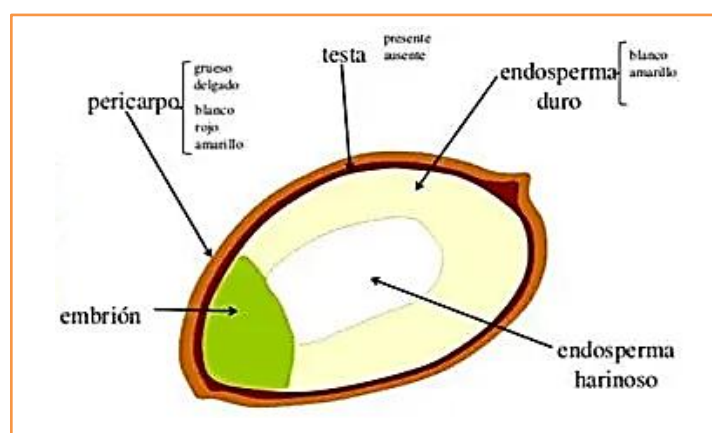


Figura 2. Grano de sorgo y estructura interna de la cariósida (Agrotenendencia,2025).

2.4.1.5. Sistema radicular

Las raíces del sorgo forman un sistema fasciculado que se caracteriza por su profundidad y amplia ramificación. Este conjunto incluye raíces primarias, secundarias y adventicias que nacen desde los nudos ubicados en la base del tallo. La profundidad

que pueden alcanzar estas raíces supera los 1.5 metros, aunque esto varía según las características físicas y la estructura del terreno. Esta capacidad permite que la planta explore de manera efectiva las diferentes capas del suelo y desarrolle una notable resistencia a los períodos secos (Blum, 2014).

Existe una conexión directa entre el crecimiento radicular y la producción del cultivo, pues un mejor desarrollo de las raíces facilita la captación de agua y elementos nutritivos, especialmente en terrenos con limitada fertilidad.

2.4.2 Fisiología del Sorgo

La fisiología del sorgo implica mecanismos complejos que están estrechamente vinculados a su capacidad para soportar el estrés hídrico y las condiciones de altas temperaturas. A continuación, se describen algunas características fisiológicas importantes del sorgo:

2.4.2.1 Fotosíntesis y Respiración

Es una especie que realiza la fotosíntesis mediante el metabolismo C₄, específicamente a través de la vía Hatch–Slack, lo cual le confiere una alta eficiencia en la fijación de carbono, especialmente bajo condiciones de alta radiación solar, elevadas temperaturas y limitada disponibilidad hídrica. En este tipo de metabolismo, el CO₂ es inicialmente fijado por la enzima fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEP-carboxilasa) en las células del mesófilo, reduciendo las pérdidas por fotorrespiración en comparación con las plantas C₃ (Taiz *et al.*, 2015).

La eficiencia fotosintética del cultivo genera una mayor producción de biomasa por unidad de agua consumida, lo cual resulta ventajoso en ambientes semiáridos. En cuanto a la respiración, el sorgo presenta una adecuada regulación metabólica que le permite mantener el balance energético incluso bajo condiciones de estrés, optimizando el uso de carbohidratos generados durante la fotosíntesis. Estas características explican su adaptación y alto rendimiento relativo en regiones con climas adversos. (Hernández *et al.*, 2020).

2.4.3 Variedades

Dentro de esta especie, se identifican diversas variedades que se han adaptado a distintos fines agronómicos y a diversas condiciones climáticas. Estas incluyen el sorgo de grano, el dulce y el forrajero. Las subespecies varían en características como la cantidad de azúcares en los tallos (en el caso del sorgo dulce) o la cantidad de

proteína en los granos (en el caso del sorgo forrajero).

Es una especie con una gran diversidad de variedades que se adaptan a diferentes condiciones ambientales, desde áreas semiáridas hasta regiones más húmedas. Estas variedades se dividen en diversas categorías según su uso (forrajero, grano, dulce) y su adaptabilidad a factores climáticos y de suelo. Las principales variedades de sorgo incluyen el sorgo grano, el sorgo forrajero y el sorgo dulce.

El cultivo de variedades de sorgo grano se destina fundamentalmente a la elaboración de alimentos y forrajes para animales. Esta clase de sorgo resulta especialmente apreciada debido a sus bajos niveles de taninos, característica que favorece una mejor digestión en el ganado. En naciones como México, Brasil y Argentina, este cereal se emplea tanto en la alimentación humana directa como en la fabricación de harinas y productos alimentarios industrializados (Cox et al., 2019). El sorgo granífero muestra una excelente adaptación a condiciones climáticas cálidas y áridas, además de demostrar notable tolerancia a periodos de escasez hídrica, factores que lo posicionan como una opción de cultivo muy adecuada para las zonas semidesérticas de Latinoamérica (Carvalho et al., 2017).



Figura 3. Grano de sorgo y estructura interna de la cariósida

El sorgo forrajero, por su parte, es esencial en la ganadería como alimento para el ganado bovino, caprino y otros animales. Las variedades forrajeras de sorgo se

caracterizan por un alto rendimiento en biomasa y son especialmente importantes en zonas donde la producción de pasto es limitada por las condiciones climáticas. Algunas variedades populares incluyen NK 300, y Shakti (Gómez *et al.*, 2020).

El sorgo forrajero también es resistente a plagas y enfermedades, lo que lo hace adecuado para un manejo agronómico más sencillo. Su capacidad de adaptación a suelos salinos y su tolerancia a la sequía permiten que sea una excelente opción para la alimentación del ganado en zonas marginales de América Latina (Ceballos *et al.*, 2018).

El sorgo dulce es una variedad que se distingue por su alto contenido de azúcares, lo que lo convierte en una fuente importante para la producción de jarabe y biocombustibles. Además, se emplea en la producción de etanol, particularmente en países como Brasil, que están liderando la investigación y la implementación de tecnologías de biocombustibles a partir del sorgo (Zapata *et al.*, 2019).

Las variedades de sorgo dulce son ideales para la producción de bioenergía debido a su alto rendimiento de azúcares. Las variedades más conocidas son Sweet Sudan, BRS 810 y Hegari. Estas variedades también se utilizan en la producción de alimentos como melazas y jarabes, y tienen aplicaciones en la industria farmacéutica debido a su contenido de nutrientes (Silva *et al.*, 2020; WFO, 2026).

2.5 Requerimientos del cultivo

2.5.1 Clima

El sorgo es una planta de clima cálido y es especialmente adecuado para zonas de temperaturas altas y lluvias escasas. Los requerimientos climáticos del sorgo son:

2.5.2 Temperatura

El sorgo es sensible a las heladas, por lo que su rango de temperatura óptima para el crecimiento es entre 25°C y 35°C. En temperaturas más bajas, su crecimiento se ve limitado, mientras que las temperaturas superiores a los 40°C pueden causar estrés térmico.

2.5.3 Luz solar

Este cultivo necesita una alta cantidad de radiación solar para realizar su fotosíntesis de manera eficiente. La radiación solar adecuada permite que el sorgo maximice su producción de biomasa, especialmente durante la fase vegetativa (González *et al.*, 2018).

2.5.4. Precipitación

El sorgo es un cultivo resistente a la sequía y puede tolerar condiciones de escasez de agua. Sin embargo, para obtener rendimientos óptimos, se requiere un total de precipitación anual de entre 400 mm y 800 mm (López *et al.*, 2017). El sorgo es capaz de soportar largos periodos de sequía debido a su sistema radicular profundo.

2.5.5. Suelo

El sorgo puede crecer en suelos diferentes, pero su desarrollo es mejor en suelos bien drenados y con pH entre 5.5 y 7.0. Los requisitos específicos de suelo incluyen:

Textura del suelo: Prefiere suelos ligeros a medios, como los franco-arenosos o franco-limosos. Sin embargo, también puede crecer en suelos arcillosos, siempre y cuando estos cuenten con un buen drenaje. El sorgo tolera suelos con baja fertilidad, lo que lo hace adecuado para regiones con suelos marginales.

El sorgo puede crecer en suelos con bajo contenido de materia orgánica, la cual mejora la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes, favoreciendo el desarrollo y la productividad (Martínez *et al.*, 2016).

2.5.6 Potencial de Hidrógeno (pH)

El sorgo presenta tolerancia a un amplio rango de pH, desarrollándose adecuadamente entre 5.5 y 8.5, aunque el pH óptimo se sitúa entre 6.0 y 7.5. En suelos muy ácidos o alcalinos puede presentarse deficiencia de nutrientes esenciales (Smith & Frederiksen, 2000).

El rango de pH entre 6.0 y 7.5 favorece el equilibrio químico del suelo (Figura 4), optimiza la actividad microbiana y mejora la mineralización de la materia orgánica, lo cual se traduce en una mayor eficiencia en la absorción nutrimental y un mejor desarrollo del cultivo. Por esta razón, el manejo adecuado del pH del suelo constituye una estrategia fundamental dentro de los programas de fertilización y conservación de la fertilidad, ya que permite maximizar la disponibilidad de nutrientes y reducir riesgos de deficiencias o toxicidades (Havlin *et al.*, 2014).

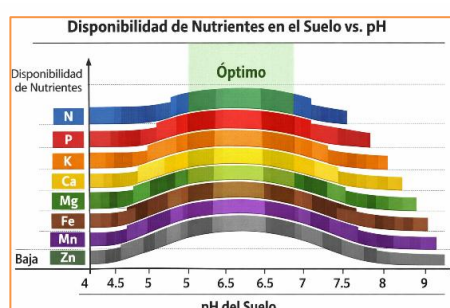


Figura 4. Relación entre el pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas (Brady y Weil 2017).

2.5.7 Riego

El sorgo es conocido por tolerar a la sequía debido a su eficiente mecanismo de conservación de agua. Aun así, los requerimientos hídricos dependen de la fase de crecimiento:

Durante la germinación requiere suficiente humedad en el suelo para permitir una adecuada germinación. La falta de agua en esta etapa puede reducir la germinación de las plántulas.

Crecimiento vegetativo y floración estas etapas, el sorgo es relativamente tolerante a la sequía. Sin embargo, el riego adecuado en estas fases mejora el rendimiento final. En la maduración el sorgo es resistente a la sequía en las etapas de maduración, lo que le permite finalizar su ciclo sin grandes pérdidas de rendimiento debido a la falta de agua.

Los riegos deben ser moderados, evitando el exceso de humedad que favorece el acame y el desarrollo de enfermedades radiculares. El riego por surcos o por aspersión es comúnmente utilizado, ajustando la frecuencia según el suelo y el clima (INIFAP, 2015).

2.5.8 Fertilización

El sorgo responde positivamente a la fertilización nitrogenada. De manera general, se recomiendan dosis aproximadas de 80 a 150 kg ha⁻¹ de N, 40 a 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 40 a 60 kg ha⁻¹ de K₂O, ajustándose al requerimiento de suelo. El nitrógeno debe fraccionarse, aplicándose una parte a la siembra y el resto durante el desarrollo vegetativo, para reducir pérdidas por lixiviación (INIFAP, 2014)

2.6. Tolerancia a la Sequía

El sorgo es considerado uno de los cultivos más tolerantes a la sequía entre los cereales, debido a una combinación de mecanismos morfológicos, fisiológicos y bioquímicos. Entre ellos destaca su capacidad para desarrollar un sistema radical profundo y ramificado, que le permite explorar mayores volúmenes de suelo y acceder a reservas hídricas profundas.

A nivel celular, el sorgo responde a la deficiencia de agua mediante la acumulación de osmólitos compatibles, como prolina, azúcares solubles y otros compuestos orgánicos, los cuales contribuyen al mantenimiento de la turgencia celular y la estabilidad de las membranas. Asimismo, presenta una eficiente regulación estomática que reduce la pérdida de agua por transpiración sin afectar de manera drástica la fotosíntesis, lo que le permite sobrevivir y producir bajo condiciones de estrés hídrico prolongado.

2.6.1 Transpiración

La transpiración en el sorgo está estrechamente relacionada con su alta eficiencia en el uso del agua. Este cultivo es capaz de regular la apertura estomática en respuesta a la disponibilidad hídrica y a la demanda evaporativa del ambiente, reduciendo las pérdidas de agua en condiciones de sequía severa (Tawfiq *et al.*, 2019).

Además, características morfológicas como la presencia de una cutícula cerosa, hojas angostas y una disposición foliar favorable contribuyen a disminuir la transpiración excesiva. Estas adaptaciones permiten al sorgo mantener un equilibrio entre la absorción de CO₂ y la pérdida de agua, favoreciendo su crecimiento en ambientes con baja precipitación y altas temperaturas (Tawfiq *et al.*, 2019).

2.6.2 Crecimiento y Desarrollo

El crecimiento del sorgo está influenciado por factores como la temperatura, la luz y la disponibilidad de nutrientes. El sorgo tiene un rápido crecimiento vegetativo en condiciones óptimas, lo que le permite competir eficazmente con otras plantas en términos de captura de recursos (WFO, 2026).

Durante las etapas iniciales, el sorgo muestra un crecimiento vigoroso que le permite competir eficazmente por luz, agua y nutrientes. No obstante, aunque es altamente adaptable, el rendimiento del cultivo depende de un manejo agronómico adecuado, particularmente en lo referente a la nutrición mineral y la disponibilidad hídrica durante las etapas críticas de floración y llenado de grano (Taiz *et al.*, 2015). Esta plasticidad fisiológica convierte al sorgo en un cultivo estratégico para sistemas agrícolas en regiones áridas y semiáridas.

2.7 Problemáticas del cultivo

A pesar de que el sorgo es reconocido por su alta adaptabilidad a condiciones adversas, su producción se ve significativamente afectada por diversas problemáticas

ambientales, entre las que destacan el estrés hídrico y las características físicoquímicas del suelo. Estas limitantes son particularmente relevantes en regiones áridas y semiáridas, donde la disponibilidad de agua es irregular y los suelos presentan baja capacidad de retención hídrica, factores que inciden directamente en el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo (Blum, 2014).

2.7.1 Sensibilidad a las heladas

Aunque el sorgo es resistente a la sequía y a las altas temperaturas, es sensible a las heladas. Las temperaturas bajo cero pueden dañar tanto las hojas como los brotes, reduciendo el rendimiento del cultivo. Esto limita su cultivo en zonas donde las heladas son comunes, especialmente durante la siembra o en las etapas de crecimiento inicial (Ramos *et al.*, 2017).

2.7.2. Plagas y enfermedades

El sorgo es susceptible a plagas y enfermedades que pueden afectar su rendimiento. Entre las plagas más comunes se encuentra la mosquita midge *Contarinia sorghicola* (Coquillett, 1899) (Díptera: Cecidomyiidae) y enfermedades como la mancha foliar y la podredumbre de la raíz. Sin duda esto pueden reducir la calidad de la cosecha y aumentar los costos de producción debido a la necesidad de aplicar tratamientos fitosanitarios (González *et al.*, 2019).

2.7.3. Condiciones de suelo inadecuadas

Aunque el sorgo es bastante resistente a suelos pobres, su crecimiento óptimo ocurre en suelos bien drenados con un pH cercano a 7. En suelos con alta salinidad, compactación o baja materia orgánica, el sorgo puede experimentar crecimiento limitado y reducir su capacidad de producción (Barrera *et al.*, 2020).

2.7.4. Requerimientos nutricionales

A pesar de que el sorgo puede crecer en suelos de baja fertilidad, para obtener rendimientos altos se requieren altos niveles de fertilización, especialmente de nitrógeno (N) y fósforo (P). La deficiencia de estos nutrientes puede resultar en un crecimiento limitado, afectando tanto el rendimiento como la calidad del grano (Martínez *et al.*, 2018). Además, la disponibilidad de estos nutrientes en suelos marginales puede ser un reto para los productores que no pueden permitirse altas dosis de fertilizantes.

2.7.5. Competencia con otras plantas

El sorgo, aunque tiene un buen sistema radicular, puede ser vulnerable a la competencia con otras plantas, especialmente con maleza. La competencia por recursos como agua, luz y nutrientes puede reducir significativamente el rendimiento del sorgo si no se maneja adecuadamente. Un control adecuado de maleza y una siembra a la densidad correcta son fundamentales para obtener una cosecha productiva (González *et al.*, 2019).

2.7.6. Baja aceptación en el mercado

Aunque el sorgo es ampliamente cultivado para la producción de grano, forraje y biocombustibles, en muchos países, especialmente en América Latina, la demanda de grano de sorgo es menor en comparación con otros cultivos como el maíz. Esto se debe en parte a la falta de conocimiento sobre sus usos y la preferencia por el maíz como fuente principal de alimento y forraje. La baja demanda en mercados nacionales e internacionales puede limitar la rentabilidad del cultivo (López *et al.*, 2017).

2.7.7. Costos de producción elevados

El cultivo de sorgo, aunque se caracteriza por su tolerancia relativa a condiciones de sequía, puede implicar costos de producción elevados, particularmente en regiones con limitada disponibilidad hídrica o en suelos de baja fertilidad, donde es necesario incrementar las inversiones en riego y fertilización para mantener rendimientos económicamente viables. En México, los costos totales de producción del sorgo oscilan generalmente entre \$12,000 y \$20,000 ha⁻¹, dependiendo del sistema de producción, la disponibilidad de infraestructura y el nivel tecnológico empleado (SIAP, 2023; INIFAP, 2019).

Dentro de estos costos, la fertilización representa uno de los rubros más importantes, con valores que pueden variar entre \$3,000 y \$6,000 ha⁻¹, equivalentes a aproximadamente 25–35 % del costo total de producción, especialmente en suelos con baja fertilidad o alta lixiviación de nutrientes. Asimismo, los costos asociados al riego, incluyendo energía, mantenimiento y operación, pueden fluctuar entre \$2,500 y \$5,000 ha⁻¹, incrementándose considerablemente en zonas áridas y semiáridas donde se requieren riegos frecuentes (INIFAP, 2019).

El control de plagas y enfermedades también impacta de forma relevante en la estructura de costos, con inversiones estimadas entre \$1,200 y \$2,500 ha⁻¹, mientras

que los gastos en preparación del terreno, siembra y cosecha pueden representar entre \$4,000 y \$6,000 ha⁻¹, dependiendo del grado de mecanización. En escenarios donde la infraestructura de riego es deficiente o el acceso a insumos es limitado, estos costos pueden incrementarse, reduciendo significativamente la rentabilidad del cultivo.

Con rendimientos promedio que oscilan entre 3.0 y 5.0 t ha⁻¹, y precios de venta del grano que varían desde \$3,500 hasta \$4,500 t⁻¹, los márgenes de rentabilidad pueden verse afectados negativamente, particularmente cuando se presentan condiciones de estrés hídrico de forma repetida. En este contexto, resulta esencial adoptar técnicas que optimicen el aprovechamiento del agua y los nutrientes, ya que esto permite disminuir los gastos de producción y fortalecer la viabilidad económica del cultivo de sorgo en zonas con limitaciones ambientales (Barrera et al., 2020).

2.7.8. Necesidad de investigación genética

A pesar de que este cultivo, tiene un alto potencial, la mejora genética es crucial para aumentar el rendimiento y la resistencia a plagas, enfermedades y sequía. (Ramos *et al.*, 2017). Aunque el sorgo posee mecanismos fisiológicos que le permiten tolerar periodos moderados de sequía, como la regulación estomática y una alta eficiencia en el uso del agua, estos mecanismos no compensan completamente la falta de humedad en suelos con textura arenosa, donde el estrés hídrico puede presentarse incluso poco tiempo después de un riego o evento de precipitación. Como resultado, los rendimientos pueden disminuir hasta en 20–40 % bajo condiciones de déficit hídrico prolongado, afectando directamente la rentabilidad del cultivo (Blum, 2014).

Por lo anterior, la adopción de estrategias orientadas a mejorar la retención de humedad en suelos arenosos se vuelve fundamental para reducir la frecuencia de riego, mitigar el estrés hídrico y optimizar el uso del agua. Estas prácticas no solo contribuyen a estabilizar los rendimientos del cultivo, sino que también permiten disminuir los costos de producción asociados al manejo hídrico, fortaleciendo la viabilidad económica del cultivo en regiones áridas y semiáridas.

2.8. Suelos arenosos

Los suelos arenosos contienen más del 85 % de partículas de arena, lo que genera una estructura gruesa y porosa. Esta composición confiere a estos suelos su conocida característica de escasa capacidad de retención de agua y nutrientes. No obstante, a

pesar de estos inconvenientes, desempeñan un papel significativo en la agricultura, ya que son fáciles de trabajar y ofrecen excelentes propiedades de drenaje. Este marco teórico examinará las características, los beneficios, las limitaciones y las técnicas de manejo para mejorar los suelos arenosos en entornos agrícolas.

2.8.1. Características de los Suelos Arenosos

Los suelos arenosos son aquellos en los que la fracción arenosa predomina sobre otras partículas, como arcilla o limo. La textura de estos suelos es gruesa, y debido a su estructura porosa, el agua y los nutrientes tienden a ser rápidamente drenados.

2.8.2. Textura y Composición

Los suelos arenosos se caracterizan por contener una alta proporción de partículas de arena, generalmente superiores al 70 % (Figura 5). Lo que les confiere una textura suelta, gruesa y de baja cohesión. Este tipo de textura favorece una elevada macroporosidad, permitiendo una rápida infiltración y drenaje del agua, así como una adecuada aireación del sistema radicular. No obstante, estas mismas características limitan de manera significativa la capacidad de retención de agua y nutrientes, lo que incrementa la susceptibilidad del suelo a periodos frecuentes de estrés hídrico, especialmente en regiones con baja precipitación o alta evaporación (Gómez *et al.*, 2017).

En términos de composición, los suelos arenosos se caracterizan por tener cantidades reducidas de arcilla y materia orgánica, elementos que son fundamentales para retener humedad y facilitar el intercambio catiónico. Esta característica provoca que el agua disponible para las plantas se agote con rapidez tras el riego o las precipitaciones, creando un ambiente poco propicio para el desarrollo de los cultivos. La limitada capacidad de estos suelos para retener sustancias también promueve la pérdida de nutrientes vitales por lixiviación, especialmente nitrógeno y potasio, haciendo necesario aumentar la frecuencia de aplicación de fertilizantes y agua para preservar los niveles apropiados de humedad y fertilidad del suelo (Havlin *et al.*, 2014). En el caso del sorgo, aunque este cultivo posee mecanismos fisiológicos que le permiten tolerar periodos moderados de déficit hídrico, la combinación de suelos arenosos y baja retención de agua puede limitar su desarrollo y rendimiento si no se implementan prácticas de manejo orientadas a mejorar las propiedades físicas del suelo. Por ello, el conocimiento de la textura y composición de estos suelos resulta

La principal limitación de los suelos arenosos es su baja retención de agua, lo que puede generar estrés hídrico en las plantas. Esto es particularmente problemático en áreas con precipitaciones irregulares o en climas áridos.

2.8.5.2. Nutrientes del Suelo

Los suelos arenosos tienden a ser pobres en nutrientes debido al bajo contenido de materia orgánica y su limitada capacidad para retener cationes. Esto puede resultar en deficiencias de nutrientes clave como nitrógeno, fósforo y potasio (Gómez *et al.*, 2017).

2.8.6. Estrategias de Manejo de Suelos Arenosos para la Agricultura

El manejo adecuado de los suelos arenosos es crucial para maximizar su productividad. Algunas de las estrategias más efectivas incluyen:

2.8.6.1. Riego Eficiente

Dado que los suelos arenosos drenan rápidamente, es importante implementar sistemas de riego eficiente, como el riego por goteo, que permita un control preciso de la cantidad de agua aplicada (López *et al.*, 2016).

2.8.6.2. Fertilización Controlada

Los suelos arenosos requieren aplicaciones frecuentes de fertilizantes, especialmente aquellos con alta solubilidad, para asegurar que las plantas reciban los nutrientes necesarios para su desarrollo (Martínez *et al.*, 2018).

2.8.6.3 Uso de Materia Orgánica

La compost y estiércol, mejora la capacidad de retención de agua y nutrientes en suelos arenosos. Este tipo de enmiendas también puede mejorar la estructura del suelo, aumentando su capacidad de almacenamiento de agua (Ríos *et al.*, 2019).

2.8.7 Impacto de los Suelos Arenosos en el Cultivo de Sorgo

El sorgo es conocido por su tolerancia a las sequías y su capacidad de adaptarse a condiciones de suelo marginal. El sorgo puede cultivarse con éxito en suelos arenosos, mientras se realice un manejo adecuado:

2.8.7.1 Alternativas para los suelos arenosos

Los suelos arenosos presentan desafíos importantes para la agricultura debido a la deficiente capacidad de retención de agua y nutrientes. Sin embargo, existen varias alternativas y prácticas de manejo que pueden mejorar la calidad y la productividad de estos suelos. A continuación, se describen algunas estrategias y alternativas para

manejar y optimizar la producción en suelos arenosos para el desarrollo del cultivo de sorgo.

2.8.7.2 Sistema radicular

Presenta un sistema radicular altamente desarrollado, caracterizado por una raíz principal profunda y un abundante sistema de raíces laterales, lo que le permite explorar eficientemente grandes volúmenes de suelo. Esta característica resulta fundamental en suelos arenosos, donde el agua se infiltra rápidamente hacia capas profundas, limitando su disponibilidad en el horizonte superficial.

Diversos estudios señalan que el sistema radicular del sorgo puede alcanzar profundidades superiores a 1.5 m, lo que le permite acceder a reservas hídricas subsuperficiales inaccesibles para otros cultivos de menor profundidad radicular (Carranco-Anaya *et al.*, 2011). Además, la plasticidad del crecimiento radicular le permite ajustar la arquitectura de sus raíces en función de la disponibilidad de agua, favoreciendo el alargamiento radicular en condiciones de sequía.

Esta capacidad de exploración profunda del perfil del suelo constituye una ventaja adaptativa clave del sorgo frente al estrés hídrico, particularmente en ambientes áridos y semiáridos, donde la precipitación es escasa y errática.

2.8.7.3 Adaptación a la sequía

El sorgo es reconocido como uno de los cultivos más tolerantes a la sequía, atributo que se explica por una combinación de mecanismos fisiológicos, anatómicos y bioquímicos. En suelos arenosos, caracterizados por una baja capacidad de retención de agua, estas adaptaciones permiten al cultivo mantener su crecimiento y desarrollo bajo condiciones de disponibilidad hídrica limitada.

Entre los principales mecanismos de adaptación se encuentran el cierre estomático temprano, la reducción de la transpiración, la acumulación de solutos osmóticos (como prolina y azúcares solubles) y una elevada eficiencia en el uso del agua. Asimismo, el metabolismo fotosintético tipo C4 contribuye a una mayor eficiencia en la fijación de carbono con menor pérdida de agua por transpiración (Martínez *et al.*, 2018).

Estas estrategias permiten que el sorgo tolere periodos prolongados de déficit hídrico sin comprometer severamente su rendimiento, lo que lo convierte en una alternativa viable para su cultivo en suelos arenosos y regiones con limitaciones hídricas.

2.8.8 Prácticas de conservación para suelos arenosos

Los suelos arenosos presentan susceptibilidad a procesos de degradación, como la erosión hídrica y eólica, la pérdida de elementos nutricionales y la ausencia de la materia orgánica, factores que afectan negativamente su productividad agrícola. Por ello, el uso de prácticas de conservación de suelo resulta esencial para mejorar su estabilidad estructural, capacidad de retención de agua y sostenibilidad productiva a largo plazo.

2.8.8.1 Cultivos de cobertura

Los cultivos de cobertura representan una técnica efectiva para preservar suelos arenosos. Esta práctica agrícola ofrece protección a la superficie del terreno contra el impacto directo de las precipitaciones y los efectos del viento, lo cual disminuye considerablemente la erosión. Al mismo tiempo, estos cultivos ayudan a aumentar la concentración de materia orgánica en las capas superficiales del suelo, mejorando así la unión entre partículas y la habilidad para retener humedad (López et al., 2016).

Por otra parte, los restos vegetales que dejan estos cultivos de cobertura facilitan la penetración del agua en el suelo, reducen la pérdida de humedad por evaporación y estimulan la actividad biológica, creando un ambiente más propicio para el crecimiento del sorgo en zonas donde el agua es escasa.

2.8.8.2 Uso de barreras vegetales

Las barreras vegetales, como setos vivos, franjas forestales o cultivos intercalados, representan una práctica efectiva para la conservación de suelos arenosos, especialmente en regiones expuestas a la erosión eólica. Estas barreras reducen la velocidad del viento a nivel del suelo, disminuyendo el arrastre de partículas finas y la pérdida de suelo fértil.

Además, las barreras vegetales contribuyen a la diversificación del agroecosistema, favorecen la biodiversidad y pueden mejorar el microclima del cultivo al reducir la evaporación y el estrés térmico. En conjunto, estas prácticas fortalecen la resiliencia de los sistemas productivos basados en sorgo en condiciones de suelos arenosos y déficit hídrico.

2.8.8.3 Enmiendas Orgánicas

La incorporación de materia orgánica representa una de las estrategias más eficaces

para optimizar las características de los suelos arenosos. Esta práctica abarca el uso de compost, estiércol, desechos vegetales de cosechas y cultivos de cobertura verde. Las mejoras orgánicas proporcionan múltiples beneficios, especialmente en el aumento de la capacidad de almacén hídrico, ya que contribuye a elevar la retención de agua en este tipo de suelos. Si bien no logra equiparar la capacidad hídrica de los suelos arcillosos, produce una mejora considerable en la disponibilidad de humedad para el crecimiento vegetal (Gómez et al., 2017). Adicionalmente, favorece el incremento de la fertilidad del suelo al mejorar la CIC (capacidad de intercambio catiónico), facilitando una mayor conservación de elementos nutritivos fundamentales como nitrógeno, fósforo y potasio, lo cual beneficia la alimentación de las plantas (Ríos et al., 2019).

La incorporación de componentes orgánicos optimiza la estructura del suelo, promoviendo la creación de agregados que facilitan un manejo más eficiente del aire y el agua (López et al., 2016).

2.8.9. Fertilización

2.8.9.1. Fertilización Controlada

Los suelos arenosos no retienen nutrientes, por lo que es necesario aplicar fertilizantes de manera eficiente.

2.8.9.2. Fertilización a medida

Aplicación de fertilizantes de liberación lenta o controlada para asegurar que los elementos nutricionales estén en disponibilidad para las plantas a lo largo del ciclo de crecimiento, evitando la pérdida por lixiviación (Martínez *et al.*, 2018).

2.8.9.3. Fertilización foliar

Aplicación de fertilizantes foliares directamente sobre el follaje de las plantas, permite una absorción más rápida y eficiente en suelos con baja retención de nutrientes (Gómez *et al.*, 2017).

2.8.9.4. Uso de biofertilizantes

Los biofertilizantes, como las micorrizas y bacterias que fijan nitrógeno, pueden ser una alternativa para mejorar la disposición de nutrientes en suelos arenosos y reducir la dependencia de las plantas al uso de la fertilización química (Carranco-Anaya *et al.*, 2011).

2.9. Técnicas de Conservación del Suelo

El uso de prácticas para conservar suelos es esencial utilizarlo en suelos arenosos para prevenir la erosión y la degradación de la capa superficial. Algunas de las estrategias más comunes incluyen:

2.9.1. Cultivos de cobertura

Utilizar cultivos como trébol, alfalfa o avena para cubrir el suelo, lo protegen de la erosión, mejoran la estructura y aumentan el contenido de materia orgánica (López *et al.*, 2016).

2.9.2. Siembra directa o mínima labranza

La siembra directa reduce la pérdida de humedad y la erosión, al mantener intacta la capa superficial del suelo y sus microorganismos beneficiosos (Arreola *et al.*, 2019).

2.9.3. Uso de barreras vegetales

En áreas con pendiente, la construcción de terrazas o barreras vegetales puede reducir la erosión del suelo arenoso al frenar el escurrimiento del agua (Ríos *et al.*, 2019).

2.9.4. Técnicas de Riego Eficiente

El riego eficiente es crucial en suelos arenosos debido a su baja capacidad para retener agua. Las siguientes técnicas pueden ser efectivas como lo es el riego por goteo, este sistema dirige agua directo a las raíces de las plantas, evitando la evaporación y maximizando la eficiencia del agua (Gómez *et al.*, 2017). Otra técnica utilizada es la del mulching (mantillo) la cual consiste en poner una cubierta de material orgánico o inorgánico sobre el suelo, esto ayuda a disminuir la evaporación, mantener la temperatura constante y protegerlo de la erosión.

La siguiente técnica sería la de riego por aspersión, aunque esta técnica es menos eficiente que el riego por goteo y por aspersión, pero que puede ser una alternativa cuando el sistema de goteo no es viable. Es importante ajustar las frecuencias de riego para que no se desperdicié de agua.

2.9.5. Uso de Cultivos Resilientes

El cultivo de especies que toleran las condiciones difíciles de los suelos arenosos es una estrategia importante para optimizar la productividad. Algunas plantas adaptadas a estos suelos incluyen:

2.9.5.1. Sorgo

Este cultivo resiste a la deficiencia de agua y tiene un sistema radicular poco

profundo que no le permite acceder a zonas más profundas en el suelo donde haya disposición de agua (Carranco-Anaya *et al.*, 2011).

2.9.5.2. Cebada y avena

Estas especies también se adaptan bien a suelos arenosos y se utilizan comúnmente en zonas de secano (López *et al.*, 2016).

2.9.5.3. Leguminosas

Las leguminosas como el frijol y el garbanzo son tolerantes a condiciones de suelo degradables y pueden mejorar la disponibilidad de nitrógeno del suelo mediante la fijación biológica del mismo, lo que favorece a la fertilidad del mismo.

2.9.6. Aplicación de Micorrizas y Bacterias Fijadoras de Nitrógeno

El uso de microorganismos benéficos fijadores de nitrógeno son una alternativa que puede mejorar significativamente la nutrición en suelos arenosos. Estas prácticas aumentan la disposición de nutrientes y agua para las plantas y mejorar la estructura del suelo y promover el crecimiento de raíces profundas (Carranco-Anaya *et al.*, 2011).

2.9.7. Usos de polímeros superabsorbentes

Los polímeros superabsorbentes (PSA) han cobrado relevancia en la agricultura como una alternativa tecnológica para mitigar los efectos del estrés hídrico, particularmente en suelos de textura arenosa caracterizados por una baja capacidad de retención de agua y alta lixiviación de nutrientes. Estas condiciones limitan la disponibilidad hídrica para los cultivos y reducen la eficiencia del riego, representando una problemática recurrente en regiones áridas y semiáridas.

Entre los PSA más utilizados en agricultura se encuentra el acrilato de potasio, un polímero sintético con elevada capacidad de absorción y liberación gradual de agua. Este material puede retener grandes volúmenes de agua en su estructura polimérica, actuando como un reservorio hídrico en la zona radicular y liberándola conforme disminuye la humedad del suelo (Huttermann *et al.*, 2009). Su aplicación resulta especialmente relevante en suelos arenosos, donde el agua aplicada por riego o precipitación se pierde rápidamente por percolación profunda.

Diversos estudios han demostrado que la utilización de acrilato de potasio incrementar la humedad del suelo, reduce los riegos y mejorar el desarrollo de los cultivos bajo condiciones de déficit hídrico. Además, al mantener una humedad más estable en el entorno radicular, este polímero favorece el desarrollo del sistema radicular y mejora

la eficacia del agua, factores clave para cultivos tolerantes a la sequía como el sorgo. Otro aspecto relevante del acrilato de potasio es su efecto indirecto sobre la disponibilidad de nutrientes, ya que la retención de agua disminuye la lixiviación de elementos móviles como nitrógeno y potasio, lo que puede traducirse en una mayor eficiencia del fertilizante aplicado (Montesano *et al.*, 2015). Esta característica resulta de especial interés en sistemas productivos donde los costos de fertilización y riego representan una limitante económica para los productores.

En este contexto, el uso de polímeros superabsorbentes, particularmente el acrilato de potasio, se plantea como una estrategia viable para mejorar la humedad en suelos arenosos, optimizar el uso del agua y contribuir a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas bajo condiciones de estrés hídrico.

2.10 Uso del acrilato de potasio

Este producto es un polímero superabsorbente el cual absorbe altas cantidades de agua y las libera gradualmente conforme el cultivo lo requiera.

Según Hernández en el 2016 el acrilato de potasio es utilizado principalmente en forma de poliacrilato de potasio este se emplea en la agricultura como mejorador de suelo y sustrato, especialmente en regiones con déficit hídrico, debido a su capacidad para actuar como hidrogel superabsorbente. Este polímero se mezcla con el suelo o con sustratos agrícolas para retener grandes cantidades de agua y liberarla de manera gradual, lo que permite reducir la frecuencia de riego y mejorar la disponibilidad hídrica para las plantas. Su uso es común en cultivos hortícolas como pepino, jitomate, lechuga y otras hortalizas, tanto en campo abierto como en invernadero, donde contribuye a un crecimiento más uniforme. Asimismo, en sistemas hidropónicos y sustratos combinados con materiales como fibra de coco o turba, el acrilato de potasio incrementa la eficiencia en el uso del agua y fertilizantes, al disminuir la lixiviación de nutrientes y mantenerlos disponibles en la zona radicular. Además, este polímero ayuda a reducir el estrés hídrico, permitiendo que las plantas toleren periodos cortos de sequía, y favorece el establecimiento de plántulas al mantener una humedad constante que estimula el desarrollo inicial de las raíces. En conjunto, su aplicación representa una alternativa viable para la agricultura en zonas áridas y semiáridas, ya que permite optimizar el manejo del agua y fertilizantes, mejorar el crecimiento vegetal y contribuir a una producción agrícola más sostenible.

2.11 Estudios previos en cultivos similares al sorgo

Diversos estudios han evaluado el uso de acrilato de potasio en cultivos con requerimientos y características fisiológicas similares al sorgo, particularmente cereales de metabolismo C4 y C3 establecidos en condiciones de déficit hídrico y suelos de baja retención de humedad.

En maíz (*Zea mays* L.), cultivo con fisiología C4 y alta demanda hídrica durante etapas críticas, se ha documentado que la aplicación de polímeros superabsorbentes mejora significativamente la disponibilidad de agua en sistema de raíces. 2019 reportaron incrementos en la humedad del suelo, mayor desarrollo radicular y aumentos en biomasa aérea en suelos arenosos tratados con PSA, destacando una eficacia en la retención del agua bajo riego deficitario. Resultados similares señalan que los PSA reducen el estrés hídrico durante etapas tempranas del crecimiento.

En trigo (*Triticum aestivum* L.), cultivo ampliamente utilizado como modelo en estudios de estrés hídrico, Zhang *et al.* (2022) demostraron que la aplicación de polímeros superabsorbentes a base de acrilatos incrementó la estabilidad del rendimiento bajo condiciones de sequía moderada, asociándose con una mayor retención de humedad en el suelo y una reducción en la pérdida de agua por percolación profunda. Estos efectos fueron más evidentes en suelos de textura ligera, lo que resalta su potencial aplicación en ambientes con características edáficas similares a las del presente estudio.

Por su parte, en cebada (*Hordeum vulgare* L.), Montesano *et al.* (2015) reportaron que los hidrogeles superabsorbentes mejoran el crecimiento vegetal y la optimización del agua, particularmente cuando se aplicaron en la zona radicular. Los autores destacan que estos materiales permiten amortiguar los efectos de periodos secos, favoreciendo un suministro hídrico más constante para el cultivo.

En mijo perla (*Pennisetum glaucum* L.), cultivo altamente tolerante a la sequía y comparable al sorgo en términos de adaptación a ambientes áridos, Yang *et al.* (2021) observaron que la incorporación de acrilato de potasio incrementó el agua disponible en el suelo y redujo el impacto del estrés hídrico, favoreciendo el crecimiento vegetativo y la eficiencia del agua. Estos resultados refuerzan la pertinencia del uso de PSA en cereales adaptados a climas secos.

De manera general, los estudios previos coinciden en que la aplicación de polímeros

superabsorbentes en cultivos similares al sorgo contribuye a la retención de humedad del suelo, reducir el impacto del estrés hídrico y aumentar la eficiencia en el uso del agua, especialmente en suelos arenosos. Estos antecedentes respaldan la hipótesis de que el acrilato de potasio puede ser una alternativa viable para mejorar el desempeño agronómico del sorgo bajo condiciones de limitada disponibilidad hídrica.

III. HIPÓTESIS

La aplicación de acrilato de potasio en el cultivo de sorgo incrementa la retención de humedad del suelo, reduce la frecuencia de riego y aumenta el rendimiento del cultivo en al menos un 15 % en comparación con un tratamiento sin aplicación.

IV. OBJETIVOS

Objetivo general:

Evaluar el acrilato de potasio para la retención de agua en suelos productores de sorgo (*S. bicolor*) en Ahome, Sinaloa.

Objetivos específicos:

Evaluar cuatro dosis del acrilato de potasio en suelos destinados a la producción de sorgo.

Determinar los efectos del acrilato de potasio sobre las variables de rendimiento del cultivo de sorgo.

Evaluar la viabilidad económica y costo-beneficio del uso del acrilato de potasio en el cultivo de sorgo.

V. JUSTIFICACIÓN

El cultivo de sorgo representa una alternativa estratégica para los sistemas agrícolas de regiones con limitaciones hídricas, debido a su relativa tolerancia al estrés por sequía y su importancia como grano y forraje para la alimentación. En el municipio de Ahome, estado de Sinaloa, la disposición de agua para riego se ha visto comprometida por la variabilidad climática, la disminución en los niveles de almacenamiento de presas y la presión sobre los recursos hídricos, lo que impacta directamente en la productividad agrícola y la estabilidad económica del sector.

Ante este escenario, resulta prioritario implementar estrategias que optimicen el uso del agua y mejoren la retención de humedad en el suelo. El empleo de polímeros superabsorbentes, como el acrilato de potasio, surge como una alternativa tecnológica con potencial para incrementar la disponibilidad hídrica en la rizosfera, reducir las pérdidas por percolación y evaporación, y mitigar el estrés hídrico en etapas fenológicas críticas del cultivo. No obstante, su efectividad depende de factores edáficos y ambientales específicos, por lo que es necesario generar información científica contextualizada a las condiciones locales.

La presente investigación evalúa el comportamiento del acrilato de potasio en suelos productores de sorgo en Ahome, para determinar su potencial como retenedor de agua y su impacto en variables agronómicas del cultivo. Desde una perspectiva científica y tecnológica, el estudio permitirá fundamentar decisiones relacionadas con el manejo hídrico sostenible, promoviendo prácticas agrícolas más eficientes y resilientes. Asimismo, los resultados servirán de base en futuras investigaciones orientadas a fortalecer la sostenibilidad productiva en zonas agrícolas con restricciones de agua, contribuyendo al desarrollo y a la conservación de los recursos naturales en la región.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Ubicación del experimento

El desarrollo del proyecto se llevó acabo de enero a junio de 2024 en el lote denominado “Las 100”, perteneciente a la agrícola La Quinta Produce, ubicado en municipio de Ahome, Sinaloa ($25^{\circ}50'15.3''$ N; $109^{\circ}13'34.9''$ W). La región presenta un clima con temperatura media anual aproximada de 26°C y precipitación promedio anual de 580 mm, concentrada principalmente en verano (INEGI, 2023). Estas condiciones son representativas de zonas con limitaciones hídricas, lo que justifica la evaluación de alternativas que mejoren la retención de agua en el suelo.



Figura 6. Muestra la ubicación del sitio experimental dentro del municipio de Ahome, Sinaloa, caracterizado por suelos de textura ligera y limitada disponibilidad hídrica.

6.2. Análisis físico-químico del suelo

Antes de establecer el bioensayo, se llevó a cabo un análisis de suelo con la finalidad de determinar las condiciones físico-químicas iniciales del área experimental (Cuadro 2). Para ello, se recolectaron 12 muestras compuestas mediante un muestreo en zigzag, considerando una profundidad de 0 a 20 cm. Posteriormente, las muestras fueron enviadas al laboratorio Asagri S.A. de C.V., ubicado en Los Mochis, Ahome, Sinaloa, donde se evaluaron parámetros como textura, pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC) y disponibilidad de nutrientes. Las determinaciones se realizaron siguiendo los procedimientos establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Cuadro 2. caracterización físico-química del suelo del sitio experimental

PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO							
No. Control	C.C. %					pmp %	
1912	22.35					13.29	

BASES DE CAMBIO (% SATURACION)							
No. Control	K	Ca	Mg	Na	Al	H	CIC cmolc/kg
1912	13.94	65.83	17.12	3.11	ND	ND	14.78
% Sugerido	5-7	65-75	10-20	0-5			

RELACIONES DE BASES DE CAMBIO				
No. Control	Ca/Mg	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/K
1912	3.84	1.23	5.95	4.72
Rango Medio	2-6	2-3	15-25	10-15

El suelo presentó textura arenosa, baja materia orgánica y limitada capacidad de retención de humedad, condiciones que justifican la aplicación de polímeros superabsorbentes.

6.3. Diseño experimental y unidades experimentales

Se utilizó un diseño experimental fue un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) (Figura 7). Con cuatro repeticiones, lo que dio un total de 16 unidades experimentales. Cada unidad experimental ocupó una superficie de 15 m² (Solís *et al.*, 2020). delimitada con banderas de colores, para el testigo se colocaron banderas de color rojo, para la dosis baja se utilizaron banderas de color naranja, para la dosis media se utilizaron banderas de color azul y para la dosis alta fueron de color verde. Se dejó un surco de separación entre unidades experimentales y un metro de separación entre bloques, abarcando un área total de 240 m², la cual fue medida con cinta métrica (García *et al.*, 2019).



Figura 7. Plano y diseño de la zona de estudio.

6.4. Establecimiento del cultivo

La siembra se realizó el 3 de enero de 2024 utilizando una sembradora de precisión marca Monosem. Se utilizó la variedad Pioneer 85G10, de ciclo intermedio.

La siembra se efectuó con una densidad de 24 plantas por metro lo que corresponde a un espaciamiento aproximado de 4.2 cm entre plantas y 75 cm entre surcos, de acuerdo con las recomendaciones técnicas para la región, con el objetivo de asegurar un adecuado establecimiento del cultivo y un óptimo aprovechamiento de los recursos disponibles.

6.5. Tratamientos y aplicación del acrilato de potasio

Se evaluaron tres dosis de acrilato de potasio aplicadas de forma sólida en el suelo: 50, 100 y 150 g por metro lineal, además de un tratamiento testigo sin aplicación. El polímero se aplicó manualmente a una profundidad de 15 cm, previo al primer riego del cultivo, el producto fue distribuido uniformemente sobre el surco (Figura 8), con el propósito de facilitar su hidratación y promover la activación de sus componentes biológicos (López y Hernández, 2018).



A. Medición de área experimental.



B. Aplicación de acrilato de potasio.



C. Unidad experimental de dosis media.



D. Unidad experimental de dosis alta.

Figura 8. Aplicación del acrilato de potasio.

6.6 Manejo del riego

Debido a la limitada disponibilidad de agua almacenada en las presas de la región durante el ciclo agrícola, el cultivo recibió únicamente un riego de auxilio por gravedad (figura 9), aplicado el 10 de abril de 2024, el cual coincidió con una etapa crítica del desarrollo del cultivo. Esta estrategia permitió condiciones de estrés hídrico, representativas de la problemática regional. Se aplicó un riego uniforme en todas las unidades experimentales, utilizando una lámina de agua cercana a 50 mm, con el fin de minimizar variaciones entre tratamientos y asegurar la confiabilidad y validez de los resultados obtenidos.



Figura 9. Método de riego por gravedad (Flores *et al.*, 2014).

6.7. Medición del contenido de agua del suelo y calibración del TDR

El contenido volumétrico de agua (VWC) del suelo se midió utilizando un sensor TDR (HS2 HydroSense II) (Figura 10), realizando las lecturas a una profundidad de 15 cm. Cada tercer día durante 45 días empezando la toma de lectura con un porcentaje de capacidad de capo de 22.3% hasta llegar a un PMP de 13.2%. Previo al inicio del experimento, el equipo fue calibrado en campo, comparando las lecturas del sensor con las condiciones reales de humedad del suelo, con el objetivo de asegurar la precisión de las mediciones (Rodríguez & Martínez, 2021).

El análisis inicial del suelo mostró un VWC en condiciones secas de 13.2%, mientras que después del riego se registró un VWC en condiciones húmedas de 22.3%, valores que sirvieron como referencia para el seguimiento del comportamiento de la humedad del suelo durante el desarrollo del experimento.



Figura 10. Medición de contenido volumétrico (Sifuentes *et al.*, 2016).

6.8. Manejo agronómico del cultivo

El manejo agronómico del cultivo se llevó a cabo siguiendo las prácticas convencionales recomendadas para la región de estudio. La fertilización se estableció de acuerdo con los requerimientos nutricionales del sorgo y las características físico-químicas del suelo. Se suministró una dosis total de 120 kg ha⁻¹ de nitrógeno, utilizando urea (46 % N) y solución UAN 32 como fuentes de este nutriente.

Al momento de la siembra se aplicaron 40 kg ha⁻¹ de nitrógeno, equivalentes a 87 kg ha⁻¹ de urea. Posteriormente, durante la etapa de crecimiento vegetativo, se complementó la fertilización con 80 kg ha⁻¹ de nitrógeno, correspondientes a 250 kg ha⁻¹ (190 L ha⁻¹) de UAN 32. Esta estrategia tuvo como finalidad asegurar una adecuada disponibilidad de nitrógeno durante las fases de mayor demanda fisiológica del cultivo.

A lo largo del ciclo de producción no se registraron incidencias relevantes de plagas o enfermedades que requirieran control fitosanitario. No obstante, se efectuó el control manual de aves, principalmente del chanate (*Quiscalus mexicanus*), mediante técnicas de ahuyentamiento, con el propósito de reducir los daños ocasionados al cultivo.

6.9. Medición de variables agronómicas

Las variables agronómicas se evaluaron durante el ciclo del cultivo. La altura de planta se midió al momento de la cosecha utilizando una cinta métrica marca Truper (Figura 11), tomando como referencia la distancia desde la base del tallo hasta el ápice de la panoja (Santacoloma *et al.*, 2016). Para esta variable se seleccionaron 10 plantas al azar por cada unidad experimental (Solís *et al.*, 2020). Sumando un total de 160 plantas evaluadas en todo el experimento.

Asimismo, se realizó la medición individual de las panojas, registrando tanto su longitud como su peso, con el fin de evaluar el efecto de los tratamientos sobre los componentes del rendimiento del cultivo.



Figura 11. Medición de altura de planta (Santacoloma *et al.*, 2016).

6.10 Cosecha y determinación del rendimiento

La cosecha se realizó el 17 de junio de 2024, cuando el cultivo alcanzó la madurez fisiológica. La cosecha se realizó manualmente, tanto en las plantas previamente seleccionadas para evaluación como en la totalidad de las unidades experimentales. Las panojas recolectadas de las plantas seleccionadas fueron pesadas de manera

individual utilizando una báscula digital marca Ohaus. Posteriormente, se determinó el contenido de humedad del grano mediante un medidor de humedad Dickey-John, con el fin de estandarizar las mediciones y garantizar la precisión en la estimación del rendimiento.

Cada unidad experimental fue cosechada manualmente y el material obtenido se almacenó en bolsas negras debidamente identificadas por tratamiento y repetición (figura 12). Posteriormente, las panojas fueron desgranadas y el grano obtenido se pesó utilizando una báscula de la marca Rice Lake. Con base en el peso del grano obtenido en cada unidad experimental, el rendimiento se extrapoló a kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}) considerando el área útil de cada unidad experimental (Gómez & Gómez, 1984), con el fin de expresar los resultados en unidades comparables a escala agrícola.



Figura 12. Cosecha del cultivo de sorgo.

6.11 Análisis estadístico

Los datos obtenidos durante el experimento fueron procesados y analizados utilizando el software estadístico SAS versión 9.4, considerando la estructura experimental de un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA). Se evaluaron los valores promedio del contenido de humedad del suelo y su variación a través del tiempo después de cada riego, con la finalidad de determinar el efecto de las diferentes dosis de acrilato de potasio sobre la capacidad de retención de agua del suelo.

De igual manera, se analizaron las variables agronómicas altura de planta, peso específico del grano, contenido de humedad y rendimiento, con el propósito de identificar posibles diferencias entre los tratamientos evaluados. Antes de realizar el análisis de varianza, se comprobó que los datos cumplieran con los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk.

Cuando el análisis estadístico mostró diferencias significativas entre tratamientos, se efectuó una comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), lo que permitió identificar de manera precisa cuáles tratamientos presentaron respuestas estadísticamente diferentes.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Efecto de los tratamientos con hidrogel sobre la humedad del suelo

La Figura 13 muestra los promedios de porcentaje de humedad de suelo obtenidos para cada uno de los tratamientos evaluados con diferentes concentraciones de hidrogel superabsorbente (0, 50, 100 y 150 g/m). El tratamiento control (0 g/m) presentó un porcentaje medio de humedad de 14.19 %, mientras que los tratamientos con adición de hidrogel mostraron mayores porcentajes de humedad: 15.81 % (Baja 50 g/m), 16.41 % (Media 100 g/m) y 17.61 % (Alta 150 g/m) (Figura 8).

Los análisis de los resultados indicaron un incremento progresivo en el porcentaje de humedad del suelo con el aumento de la dosis de hidrogel. La comparación entre tratamientos mediante análisis estadístico (ANOVA) mostró diferencias significativas entre el tratamiento control y los tratamientos con hidrogel a dosis media y alta ($p < 0.05$). La mayor retención de humedad se observó en el tratamiento con 150 g/m de hidrogel, con un incremento de humedad de aproximadamente 24% respecto al control.

Los resultados obtenidos en este experimento muestran que la aplicación de hidrogel superabsorbente incrementó significativamente el contenido de humedad del suelo en comparación con el control sin adición de polímero. Este efecto de mayor retención hídrica con el uso de polímeros hidroabsorbentes se ha reportado ampliamente en estudios previos, donde se documenta que los hidrogeles mejoran la capacidad del suelo para retener agua debido a su alta afinidad por el agua y su capacidad de expandirse y formar una red que atrapa moléculas de agua (Flores *et al.*, 2022).

La progresiva mejora en la retención de humedad con dosis crecientes de hidrogel coincide con los hallazgos de Hernández *et al.* (2020), quienes demostraron que la incorporación de polímeros superabsorbentes al suelo agrícola incrementa significativamente la humedad volumétrica del suelo en comparación con suelos no enmendados, especialmente bajo condiciones de déficit hídrico. Este efecto es atribuible a la alta capacidad de absorción de agua del hidrogel, que puede llegar a ser varias veces su peso en agua, contribuyendo así a mantener una disponibilidad hídrica prolongada.

Estudios similares han reportado que la eficiencia del hidrogel para retener agua depende de la concentración aplicada y del tipo de suelo. Por ejemplo, Ahmed *et al.* (2021) encontraron que la adición de polímeros superabsorbentes mejoró significativamente la retención de humedad y redujo la pérdida de agua por percolación en suelos arenosos, favoreciendo una mejor disponibilidad de agua para las plantas. Estos resultados están en consonancia con los observados en el presente estudio, donde el tratamiento con mayor dosis de hidrogel (150 g/m) presentó el porcentaje de humedad más alto, lo que sugiere una relación dosis-respuesta entre la cantidad de polímero y la retención de agua.

La mejora en la humedad del suelo observada con el uso de hidrogel puede deberse a varios mecanismos. Primero, los hidrogeles son macromoléculas hidrofílicas capaces de absorber y retener grandes cantidades de agua dentro de su estructura polimérica, liberándola gradualmente al suelo según las necesidades del cultivo (Khan *et al.*, 2020). Esta liberación lenta reduce las fluctuaciones bruscas de humedad y puede contribuir a un régimen hídrico más estable en el perfil del suelo. Además, la presencia de hidrogel puede mejorar la estructura del suelo y aumentar su porosidad efectiva, lo que también favorece la retención de agua disponible.

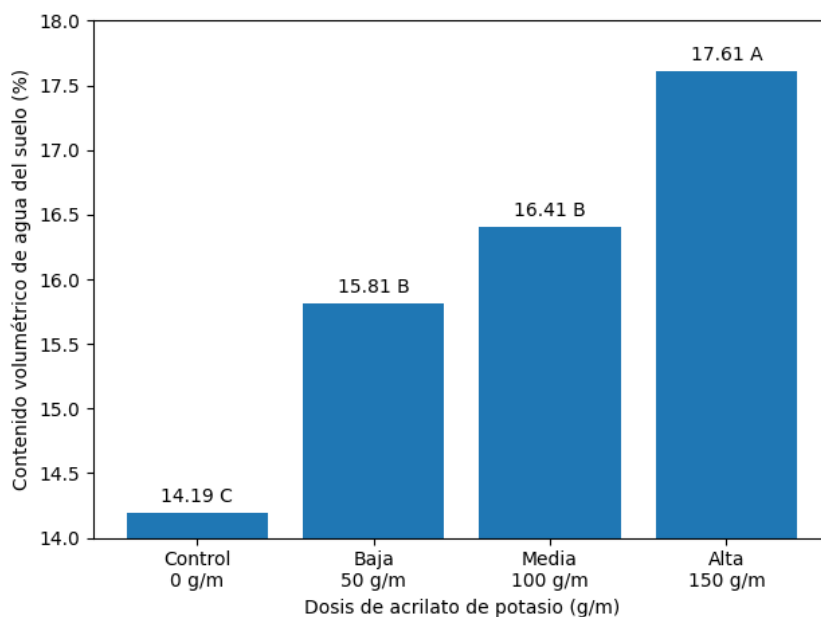


Figura 13. Contenido volumétrico de agua (%) en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de hidrogel.

7.2. Variables agronómicas

Los tratamientos con diferentes dosis de hidrogel mostraron variaciones significativas en los días transcurridos después del riego (Cuadro 3.). El tratamiento control (0 g/m) registró un promedio de 16.5 días, mientras que los tratamientos con hidrogel presentaron valores mayores: 25.5 días (Baja 50 g/m), 26.5 días (Media 100 g/m) y 36 días (Alta 150 g/m). La prueba de comparaciones múltiples (Tukey, $p \leq 0.05$) indicó que el tratamiento con dosis alta de hidrogel fue estadísticamente superior a los demás, y tanto los tratamientos bajan como media difirieron del control, pero no entre sí.

Los resultados sugieren que la incorporación de hidrogel al suelo prolonga significativamente el tiempo transcurrido después del riego antes de que el suelo vuelva a requerir agua adicional. Este patrón concuerda con investigaciones previas que han demostrado que los hidrogeles pueden extender la disponibilidad de agua almacenada en el suelo, aumentando el intervalo entre eventos de riego y reduciendo la frecuencia de aplicación de agua (Ahmed *et al.*, 2021).

La mayor prolongación del intervalo de riego observada en el tratamiento con 150 g/m de hidrogel se asocia directamente con la mayor capacidad de retención de agua del polímero, el cual actúa como un reservorio que libera agua de forma gradual conforme la planta la requiere (Figura 14). Este efecto ha sido documentado en diferentes cultivos, donde la adición del polímero incrementa el tiempo que el agua permanece disponible en el perfil del suelo, retrasando la necesidad de riego adicional (Nguyen *et al.*, 2019).

La prolongación de los días después del riego observada en este experimento es consistente con los reportes de Khan *et al.* (2020), quienes encontraron que la aplicación de hidrogel combinada con nutrientes incrementó significativamente la eficiencia del uso del agua y permitió mayores intervalos entre riegos en cultivos de trigo bajo estrés hídrico. Este hallazgo indica que los polímeros superabsorbentes no solo mejoran la retención estática de humedad, sino que también tienen efectos agronómicos funcionales sobre la dinámica del agua en el suelo.

Además, estudios realizados señalan que el uso de hidrogel puede disminuir la frecuencia de riego sin perjudicar la disponibilidad de agua para la planta, lo cual puede

traducirse en ventajas de manejo de recursos hídricos, especialmente en sistemas con limitaciones de suministro.

El aumento en los días transcurridos después del riego con el uso de hidrogel indica una mayor eficiencia del uso del agua, lo que tiene implicaciones directas tanto en la productividad como en la sostenibilidad agrícola. En regiones áridas o semiáridas, donde la disponibilidad de agua es crítica, el uso de polímeros superabsorbentes puede permitir extender intervalos de riego, ahorrar agua y reducir costos operativos, sin comprometer la disponibilidad hídrica para el cultivo.

Cuadro 3. Promedio de días transcurridos después del riego en función de la dosis de hidrogel

Tratamiento	Días después del riego (media)	Grupo estadístico (Tukey, $p \leq 0.05$)
Control (0 g/m)	16.5	C
Baja (50 g/m)	25.5	B
Media (100g/m)	26.5	B
Alta (150 g/m)	36.0	A

Nota. Valores representan medias por tratamiento. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

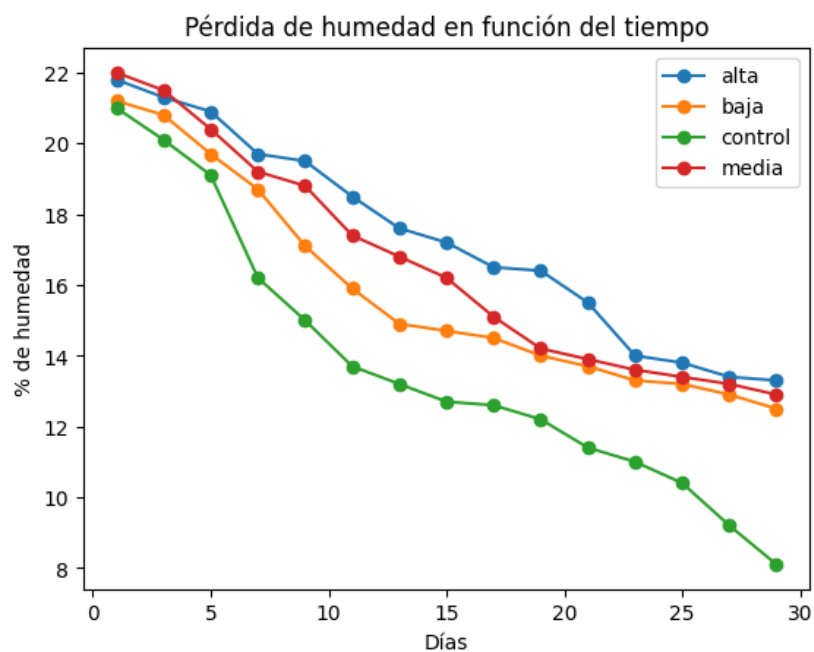


Figura 14. Dinámica de la pérdida de humedad del suelo en función del tiempo bajo diferentes dosis de hidrogel.

Los tratamientos con hidrogel superabsorbente mostraron efectos notables en el peso de panoja (g) comparados con el control (Cuadro 4). El tratamiento control (0 g/m) registró el menor peso de panoja (21.6 g), mientras que las dosis incrementales de hidrogel generaron aumentos progresivos en el peso: 41.68 g en Baja (50 g/m), 49.83 g en Media (100 g/m), y 58.89 g en Alta (150 g/m). La aplicación de la dosis más alta resultó en la mayor masa de panoja, y las letras de comparación múltiple (ANOVA con Tukey, $p \leq 0.05$) indicaron diferencias significativas entre el tratamiento alto y los demás, sugiriendo un efecto dependiente de la dosis.

Los resultados demuestran que la aplicación de hidrogel superabsorbente incrementa el peso de panoja, lo cual se traduce en una mejora de un atributo de rendimiento importante. Este efecto puede atribuirse a la capacidad del hidrogel de mejorar la disponibilidad de agua en el suelo durante etapas críticas del desarrollo, lo que favorece procesos fisiológicos relacionados con el llenado de granos y acumulación de biomasa en la panoja.

La literatura respalda estos hallazgos. Por ejemplo, Waly *et al.* (2015) reportaron que el uso de hidrogel en arroz incrementó el número de granos por panícula y produjo panículas más pesadas comparadas con el testigo sin hidrogel, lo que reflejó mejoras significativas en los atributos de rendimiento de la planta cuando se mitigó el estrés

hídrico mediante polímeros superabsorbentes.

Asimismo, resultados recientes señalan que los polímeros superabsorbentes pueden mejorar la retención de agua en la zona radicular y promover una liberación más sostenida del agua disponible, facilitando un mejor crecimiento y asignación de biomasa al grano o estructura reproductiva (Magalhães *et al.*, citado en turn0search1). Un meta-análisis global sobre el efecto de los SAP en rendimiento agrícola concluyó que la inclusión de estos polímeros suele incrementar la productividad de los cultivos y la eficiencia del uso del agua, con mejoras promedio de rendimiento en múltiples sistemas agrícolas, aunque la magnitud del efecto depende de factores edáficos y de manejo (Agricultural Water Management, 2023)

Desde la perspectiva fisiológica, una mayor disponibilidad de agua durante los periodos críticos de llenado de grano reduce el estrés por déficit hídrico y permite una mayor translocación de foto asimilados hacia las estructuras de almacenamiento (como la panoja), resultando así en un mayor peso de panoja promedio. Esto es consistente con las mejoras de contenido de agua útil y de fotosíntesis observadas en estudios donde los SAP aumentaron la eficiencia de uso del agua y la acumulación de materia seca en cultivos bajo condiciones hídricas restringidas.

El aumento en el peso de panoja con dosis mayores de hidrogel sugiere que esta práctica puede ser una estrategia efectiva para mejorar los componentes de rendimiento en cultivos donde la panoja es un órgano decisivo para la productividad final, especialmente en sistemas con limitaciones hídricas. Esto podría traducirse en mejores rendimientos comerciales, mayor eficiencia del uso del agua y una reducción en la sensibilidad del cultivo a periodos de déficit hídrico.

Cuadro 4. Efecto de las dosis de acrilato de potasio sobre el peso de panoja

Tratamiento (dosis)	Peso de panoja (g)	Grupo estadístico (Tukey, $p \leq 0.05$)
Control (0 g/m)	21.6	B
Baja (50 g/m)	41.68	A
Media (100 g/m)	49.83	A
Alta (150 g/m)	58.89	A

Nota. Medias seguidas por letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

La altura de planta evaluada al final del ciclo del cultivo no mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados ($p > 0.05$). El tratamiento control (0 g/m) registró una altura promedio de 72.10 cm, mientras que la dosis baja (50 g/m), media (100 g/m) y alta (150 g/m) presentaron valores promedio de 73.71 cm, 85.85 cm y 89.72 cm. A pesar de observarse una tendencia numérica al incremento de la altura conforme aumentó la dosis del hidrogel superabsorbente, el análisis estadístico indicó que estas diferencias no fueron significativas, por lo que todos los tratamientos pertenecieron al mismo grupo estadístico según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

La ausencia de diferencias significativas en la altura de planta sugiere que la aplicación del hidrogel superabsorbente no tuvo un efecto determinante sobre este parámetro morfológico bajo las condiciones del presente estudio. Aunque se observó una tendencia al aumento de la altura en las dosis media y alta, esta respuesta no fue suficiente para generar una separación estadística entre tratamientos.

Resultados similares han sido reportados en otros estudios, donde la aplicación de polímeros superabsorbentes no siempre produce incrementos significativos en la altura de planta, especialmente cuando las condiciones de humedad del suelo no son limitantes o cuando el cultivo no experimenta un estrés hídrico severo (Fang *et al.*, 2020). En estos casos, el efecto de los hidrogeles suele manifestarse con mayor claridad en variables relacionadas con el rendimiento o la eficiencia en el uso del agua, más que en parámetros de crecimiento vegetativo como la altura.

Asimismo, revisiones recientes indican que la respuesta de la altura de planta a la aplicación de hidrogel depende de factores como el tipo de suelo, la disponibilidad inicial de agua, la especie cultivada y la dosis aplicada. En suelos con adecuada retención de humedad, los beneficios del polímero sobre el crecimiento vegetativo pueden ser limitados o estadísticamente no significativos (Islam *et al.*, 2011; Montesano *et al.*, 2015).

Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio sugieren que, bajo las condiciones evaluadas, el hidrogel superabsorbente no influyó significativamente en la altura de planta, aunque podría contribuir indirectamente a otros componentes del

crecimiento o del rendimiento, como se ha observado en variables productivas evaluadas en otras secciones de este trabajo.

7.3 Rendimiento del cultivo de sorgo

El peso de parcela cosechada mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tabla 4). El tratamiento control (0 g/m) presentó el menor peso promedio de parcela con 5.55 kg, ubicándose en el grupo estadístico C. En contraste, los tratamientos con dosis baja (50 g/m) y media (100 g/m) registraron valores intermedios de 7.17 kg y 7.42 kg, respectivamente, ambos clasificados en el grupo B, sin diferencias significativas entre ellos. El mayor peso de parcela cosechada se observó en la dosis alta (150 g/m), con un promedio de 8.87 kg, correspondiente al grupo estadístico A

La conversión de los pesos de parcela a rendimiento estimado por hectárea se realizó mediante la ecuación:

$$Y = \frac{PM}{AM} \times 10\,000$$

donde Y es el rendimiento estimado en kg ha^{-1} , PM el peso medido en kg y AM el área muestreada, que en este estudio fue de 15 m^2 por unidad experimental conforme a metodologías comúnmente empleadas en ensayos agronómicos (Gómez & Gómez, 1984; CIMMYT, 2013).

Con base en esta conversión, los rendimientos estimados fueron de $3,700 \text{ kg ha}^{-1}$ para el tratamiento control, $4,780 \text{ kg ha}^{-1}$ para la dosis baja, $4,947 \text{ kg ha}^{-1}$ para la dosis media y $5,913 \text{ kg ha}^{-1}$ para la dosis alta, observándose un incremento progresivo del rendimiento conforme aumentó la dosis aplicada.

El aumento significativo en el peso de parcela cosechada y en el rendimiento estimado por hectárea en respuesta a las dosis aplicadas concuerda con lo reportado por diversos autores, quienes señalan que una adecuada disponibilidad de insumos favorece la acumulación de biomasa y la eficiencia productiva del cultivo (Taiz *et al.*, 2015; Marschner, 2012).

La superioridad estadística del tratamiento con 150 g/m indica que esta dosis promovió condiciones favorables para el desarrollo fisiológico del cultivo, reflejándose en mayores rendimientos. Resultados similares han sido documentados por Mengel y

Kirkby (2001), quienes reportan que el suministro adecuado de nutrientes o estimulantes incrementa la fotosíntesis, el crecimiento vegetativo y el rendimiento final. Los tratamientos con dosis baja y media, aunque superiores al control, no mostraron diferencias significativas entre sí, lo cual sugiere que, bajo las condiciones del presente estudio, el umbral de respuesta óptima del cultivo se alcanza a dosis más elevadas. Este comportamiento ha sido descrito previamente en estudios agronómicos donde la respuesta productiva tiende a estabilizarse en dosis intermedias antes de incrementarse significativamente a dosis mayores (Fageria, 2009).

Asimismo, la relación observada entre el incremento en altura de planta y el aumento del rendimiento coincide con lo señalado por Loomis y Connor (1992), quienes establecen que un mayor crecimiento vegetativo suele estar asociado con una mayor capacidad de interceptación de radiación y, por ende, con un mayor rendimiento, siempre que no exista competencia excesiva o estrés ambiental.

Cuadro 5. Peso de parcela cosechada y rendimiento estimado por hectárea en función de la dosis aplicada

Tratamiento	Dosis (g/m)	Peso de parcela (kg)	Rendimiento estimado (kg ha ⁻¹)	Grupo estadístico
Control	0	5.55	3,700	C
Baja	50	7.17	4,780	B
Media	100	7.42	4,947	B
Alta	150	8.87	5,913	A

Nota: Valores con la misma letra no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

7.4. Efecto de las dosis del tratamiento sobre el contenido de humedad del grano

El análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de humedad de grano indicó diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$), lo que evidencia que la aplicación de las diferentes dosis del tratamiento tuvo un efecto directo sobre el contenido de humedad al momento de la cosecha (Figura 15).

El tratamiento Control (0 g/m) presentó el menor porcentaje de humedad de grano, con un valor promedio de 12.60 %, el cual fue estadísticamente inferior al resto de los

tratamientos evaluados. Por otro lado, los tratamientos con dosis Baja (50 g/m), Media (100 g/m) y Alta (150 g/m) mostraron valores promedio de 13.92 %, 14.07 % y 14.17 %, respectivamente, sin diferencias estadísticas significativas entre ellos, agrupándose en la misma categoría estadística (A), de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$).

El incremento observado en el porcentaje de humedad de grano conforme aumentó la dosis del tratamiento sugiere una mayor disponibilidad y retención de agua durante el llenado del grano, lo que pudo favorecer una hidratación más prolongada del cultivo en las etapas finales del ciclo productivo.

Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que la aplicación del tratamiento influyó significativamente en el porcentaje de humedad del grano, particularmente cuando se comparan las dosis aplicadas con el tratamiento control. El menor contenido de humedad observado en el control puede atribuirse a una menor capacidad de retención de agua en el suelo, lo cual limita la disponibilidad hídrica durante las fases críticas del llenado de grano.

Diversos estudios han documentado que el uso de polímeros superabsorbentes, como los acrilatos de potasio, mejora la capacidad de retención de humedad del suelo, reduce las pérdidas por evaporación y favorece una liberación gradual de agua hacia el sistema radical del cultivo (Akhter *et al.*, 2004; Guilherme *et al.*, 2015). Este efecto explica el incremento significativo en el porcentaje de humedad de grano observado en los tratamientos con dosis baja, media y alta.

El hecho de que no se hayan detectado diferencias estadísticas entre las dosis de 50, 100 y 150 g/m sugiere que, a partir de la dosis baja, se alcanza un umbral de saturación hídrica funcional, donde incrementos adicionales en la dosis no se traducen en aumentos proporcionales en la humedad del grano. Resultados similares señalan que dosis elevadas de polímeros no siempre generan beneficios adicionales, especialmente en suelos con textura media a fina.

Desde el punto de vista agronómico, un mayor contenido de humedad en grano al momento de la cosecha puede asociarse con una mejor actividad fisiológica durante el llenado, mayor translocación de asimilados y menor estrés hídrico terminal. Sin embargo, valores excesivamente altos pueden incrementar los costos de secado y el

riesgo de deterioro postcosecha, por lo que es fundamental identificar una dosis óptima que maximice el rendimiento sin afectar la calidad del grano.

En este contexto, los resultados del presente estudio indican que la dosis baja (50 g/m) fue suficiente para incrementar significativamente la humedad de grano respecto al control, sin diferencias estadísticas con las dosis mayores, lo que la posiciona como una alternativa técnica y económicamente viable. Esta observación coincide con lo reportado por INIFAP (2017), donde se destaca la importancia de un manejo eficiente del agua para optimizar la productividad y calidad del grano en cultivos extensivos bajo condiciones de disponibilidad hídrica limitada.

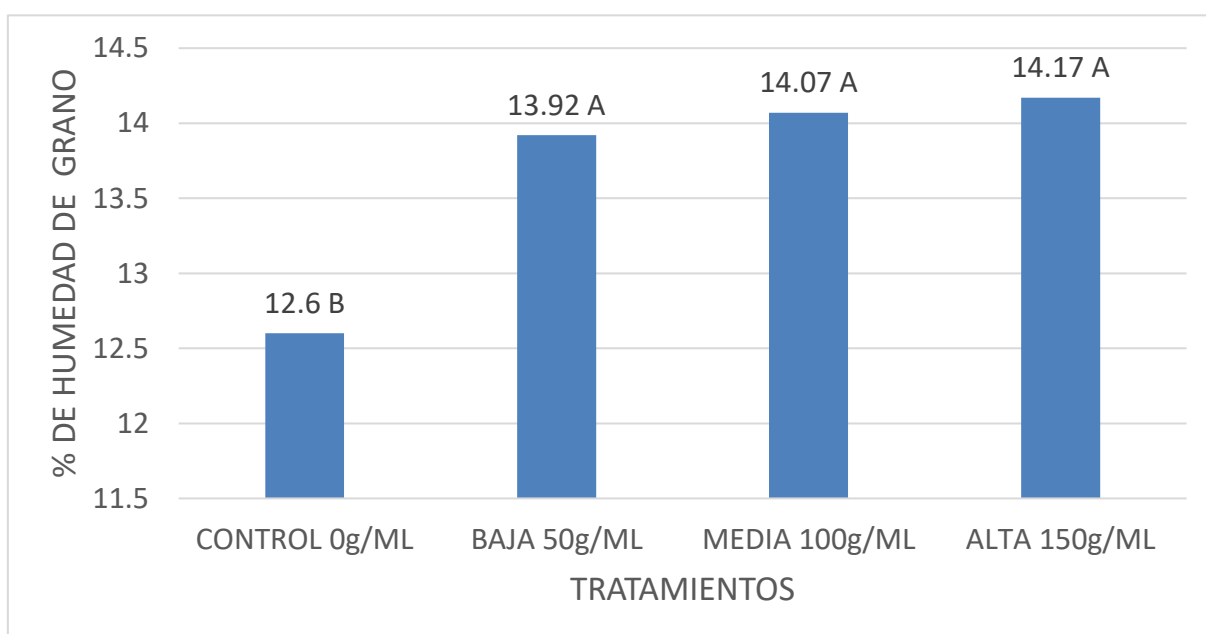


Figura 15. Promedios de porcentaje de humedad de grano.

7.5. Efecto de las dosis del tratamiento sobre el peso específico del grano

El peso específico del grano mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$), de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey (Figura 16). El tratamiento Control (0 g/m) presentó el menor valor promedio de peso específico, con 71.1, clasificándose en un grupo estadístico diferente (letra B) respecto a los tratamientos con aplicación del producto.

Por el contrario, los tratamientos dosis baja (50 g/m), media (100 g/m) y alta (150 g/m)

registraron valores superiores y estadísticamente similares entre sí (letra A), con promedios de 72.6, 72.5 y 72.77, respectivamente (Figura 16). El mayor valor se observó en la dosis alta, lo que representa un incremento aproximado del 2.4 % respecto al tratamiento control.

Estos resultados evidencian que la aplicación del producto tuvo un efecto positivo sobre el peso específico del grano, mejorando su calidad física en comparación con el manejo sin aplicación.

El incremento del peso específico del grano en los tratamientos con aplicación puede atribuirse a una mejor acumulación de materia seca y mayor llenado del grano, lo cual está estrechamente relacionado con un adecuado suministro de agua y nutrientes durante el periodo de llenado (Blum, 2011; Taiz *et al.*, 2017). El peso específico es considerado un indicador importante de la calidad comercial del grano, ya que refleja su densidad, sanidad y grado de madurez fisiológica (FAO, 2018).

Diversos estudios han señalado que prácticas de manejo que mejoran la disponibilidad hídrica y nutricional favorecen la translocación de asimilados hacia el grano, incrementando su densidad y peso volumétrico (Roozeboom *et al.*, 2019; INIFAP, 2017). En sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), el peso específico se asocia positivamente con el rendimiento y la eficiencia fisiológica del cultivo, especialmente bajo condiciones de estrés moderado.

La ausencia de diferencias significativas entre las dosis baja, media y alta sugiere que a partir de la dosis de 50 g/m se alcanza un umbral de respuesta fisiológica, donde incrementos adicionales del producto no generan mejoras sustanciales en el peso específico. Este comportamiento ha sido reportado previamente en estudios donde la respuesta del cultivo tiende a estabilizarse una vez cubiertas las demandas fisiológicas básicas (Marschner, 2012).

En contraste, el menor valor observado en el tratamiento control puede estar relacionado con limitaciones en la disponibilidad de recursos durante el llenado del grano, lo cual afecta negativamente la compactación del endospermo y reduce la densidad del grano (Fageria *et al.*, 2011).

En conjunto, los resultados confirman que la aplicación del producto contribuye a mejorar la calidad física del grano de sorgo, reflejada en un mayor peso específico, lo

cual puede traducirse en ventajas tanto agronómicas como comerciales.

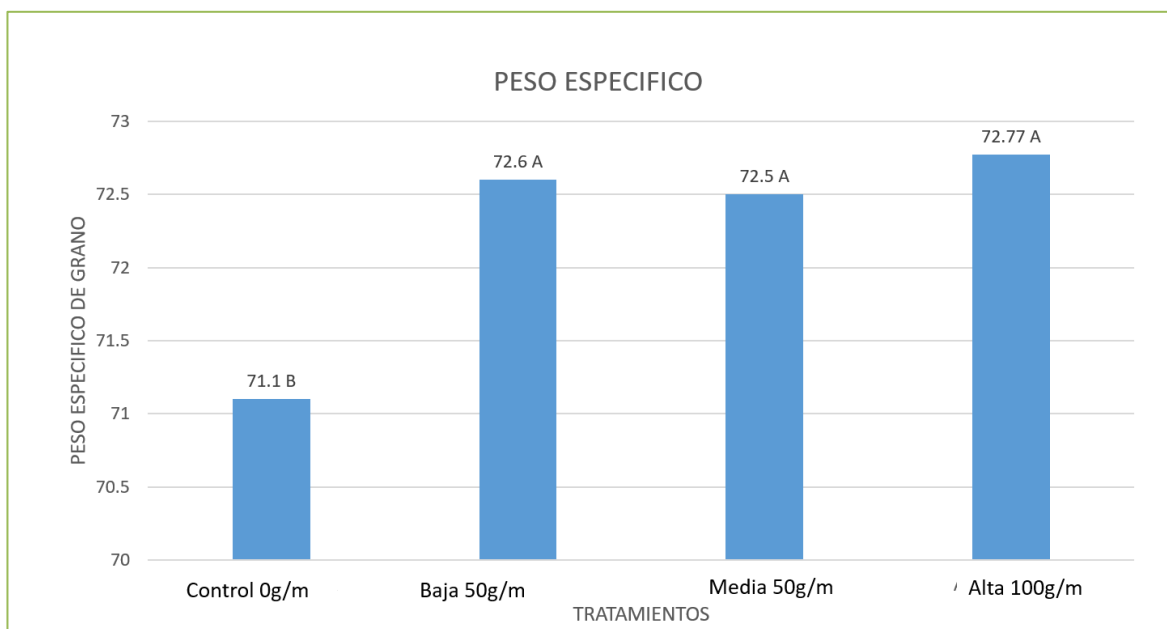


Figura 16. Promedios de peso específico de grano de sorgo.

7.6. análisis costo beneficio del uso del acrilato de potasio en el cultivo de sorgo

La aplicación de hidrogel en el cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) generó un incremento progresivo en el rendimiento del grano conforme aumentó la dosis aplicada por metro lineal. El tratamiento control presentó un rendimiento estimado de 3,700 kg ha⁻¹, mientras que las dosis baja, media y alta alcanzaron 4,780, 4,947 y 5,913 kg ha⁻¹, respectivamente. Este comportamiento evidencia un efecto positivo del hidrogel sobre la productividad del cultivo, asociado principalmente a una mayor disponibilidad hídrica durante el ciclo agrícola.

Sin embargo, al incorporar el análisis económico, se observó que ninguna de las dosis evaluadas resultó rentable, debido al elevado costo del hidrogel por hectárea derivado de su aplicación continua a lo largo de los surcos. La relación beneficio/costo fue inferior a la unidad en todos los tratamientos, lo que indica que el incremento en el rendimiento no fue suficiente para compensar el gasto adicional generado por el

insumo durante un solo ciclo de cultivo.

El incremento observado en el rendimiento del sorgo sugiere que el hidrogel actuó eficazmente como un polímero superabsorbente, mejorando la retención de humedad en el suelo y reduciendo la frecuencia y severidad del estrés hídrico durante etapas críticas del desarrollo del cultivo. Este comportamiento es congruente con lo reportado por Ahmed *et al.* (2021), quienes documentaron que la aplicación de polímeros incrementa la disponibilidad de agua en la rizosfera, favoreciendo el crecimiento y rendimiento de los cultivos bajo condiciones de déficit hídrico

Asimismo, el efecto positivo del hidrogel se reflejó en variables relacionadas con la dinámica hídrica del suelo, como los días transcurridos después del riego y el peso de la panoja, los cuales mostraron tendencias favorables conforme aumentó la dosis aplicada. Estos resultados concuerdan con lo señalado por Liu *et al.* (2022), quienes reportaron que los hidrogeles pueden prolongar la disponibilidad de agua en el perfil del suelo, mejorando la eficiencia del uso del agua y la productividad del cultivo

Desde el punto de vista fisiológico, una mayor disponibilidad de agua en la rizosfera favorece procesos fundamentales como la absorción de nutrientes, la expansión celular y la actividad fotosintética, lo que se traduce en un mayor llenado de grano y, por ende, en un incremento del rendimiento. En este sentido, los resultados obtenidos confirman que el hidrogel puede considerarse una herramienta agronómica eficaz para mitigar el estrés hídrico, particularmente en ambientes áridos y semiáridos, donde la disponibilidad de agua constituye el principal factor limitante de la producción agrícola. A pesar de los beneficios productivos observados, el análisis costo–beneficio evidenció que el principal factor limitante del uso del hidrogel fue su alto costo inicial, especialmente cuando se aplica de manera uniforme a lo largo de toda la superficie cultivada. No obstante, es importante destacar que este análisis se realizó considerando únicamente un ciclo agrícola, lo cual representa una limitación metodológica relevante.

Diversos estudios han señalado que muchos polímeros superabsorbentes presentan una vida útil de varios ciclos agrícolas, manteniendo su capacidad de absorción y liberación gradual de agua durante dos o más temporadas (Ibrahim, 2019). En este contexto, la evaluación de la residualidad del hidrogel en el suelo se vuelve un aspecto

fundamental para determinar su verdadera viabilidad económica Si el hidrogel aplicado conserva su funcionalidad hídrica en ciclos subsecuentes, el costo del insumo podría amortizarse en el tiempo, reduciendo significativamente el costo anual por hectárea y modificando de manera sustancial la relación beneficio/costo. Por lo tanto, la falta de rentabilidad observada en el presente estudio no invalida el uso del hidrogel, sino que pone de manifiesto la necesidad de realizar evaluaciones a mediano y largo plazo, considerando su permanencia en el suelo, su estabilidad físico-química y su impacto acumulativo sobre la productividad del cultivo.

Otro aspecto relevante es que el presente análisis se basó en una aplicación generalizada del hidrogel, lo cual incrementa considerablemente el costo total del sistema de producción. Sin embargo, desde una perspectiva de manejo agronómico, el hidrogel no necesariamente debe aplicarse de forma uniforme, sino de manera estratégica en zonas con menor capacidad de retención de humedad, como suelos arenosos, áreas con pendiente, zonas compactadas o sectores del lote con bajo contenido de materia orgánica.

A pesar del incremento en el rendimiento, ninguna de las dosis evaluadas resultó rentable en un solo ciclo agrícola, debido al elevado costo del hidrogel aplicado de manera continua a lo largo del surco. Sin embargo, la posible residualidad del polímero y su aplicación localizada podrían mejorar la rentabilidad en ciclos subsecuentes Kaisang *et al.* (2020).

Cuadro 6. Efecto del hidrogel sobre el rendimiento y la rentabilidad del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench)

Tratamiento	Dosis (g/m)	Hidro-gel (kg ha ⁻¹)	Costo hidro-gel (\$ ha ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Ingre-so bruto (\$ ha ⁻¹)	Beneficio neto (\$ ha ⁻¹)*	Relación B/C
Control	0	0	0	3.70	14,060	14,060	—
Dosis baja	50	666.7	101,333	4.78	18,164	–83,169	0.18
Dosis media	100	1,333.3	202,667	4.95	18,801	–183,866	0.09
Dosis alta	150	2,000.0	304,000	5.91	22,458	–281,542	0.07

VIII CONCLUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos en el presente estudio, se concluye que la aplicación de acrilato de potasio en el cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) influyó positivamente en la retención de humedad del suelo, lo que permitió prolongar la disponibilidad de agua para el cultivo bajo las condiciones edafoclimáticas evaluadas. Este efecto se atribuye a la capacidad del polímero para absorber y retener agua, reduciendo las pérdidas por percolación en suelos de textura arenosa.

La mayor disponibilidad hídrica en el suelo se reflejó en un mejor desempeño de variables asociadas al rendimiento del cultivo, particularmente en el peso de panoja, el peso específico del grano y el rendimiento estimado por hectárea, mientras que variables de crecimiento vegetativo como la altura de planta no presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Estos resultados indican que el efecto del acrilato de potasio se manifiesta principalmente durante las etapas reproductivas del cultivo, favoreciendo el llenado de grano más que el crecimiento en altura.

En relación con las dosis evaluadas, se observó que la aplicación del acrilato de potasio generó respuestas positivas desde la dosis más baja, sin diferencias estadísticas consistentes entre las dosis superiores, lo que sugiere la existencia de un umbral de respuesta a partir del cual incrementos adicionales en la dosis no se traducen en beneficios agronómicos proporcionales.

Con base en lo anterior, los resultados permiten aceptar la hipótesis planteada, ya que la utilización de acrilato de potasio incrementó la retención de humedad del suelo y favoreció el rendimiento del cultivo de sorgo en comparación con el tratamiento sin aplicación.

Desde el punto de vista económico, el análisis costo-beneficio indicó que la aplicación del acrilato de potasio no resultó rentable en un solo ciclo agrícola, debido al elevado costo del insumo en relación con el incremento en el rendimiento obtenido. No obstante, se considera que su posible efecto residual en el suelo, así como estrategias de aplicación localizada o su uso en condiciones de estrés hídrico severo, podrían mejorar su viabilidad económica en sistemas de producción específicos.

Finalmente, se concluye que el acrilato de potasio representa una alternativa tecnológica complementaria para mejorar la eficiencia en el uso del agua en el cultivo

de sorgo, particularmente en suelos con baja capacidad de retención hídrica; sin embargo, su adopción debe evaluarse cuidadosamente considerando las condiciones locales de suelo, clima y rentabilidad de sistemas productivos locales de suelo, clima y rentabilidad del sistema productivo.

IX LITERATURA CITADA

- Abedi-Koupai, J., Sohrab, F., & Swarbrick, G. (2008). Evaluation of hydrogel application on soil water retention characteristics. *Journal of Plant Nutrition*, 31(2), 317–331. <https://doi.org/10.1080/01904160701853928>
- Ahmed, E. M., El-Naggar, A. W., & Ahmed, R. R. (2021). Evaluation of superabsorbent polymer application on soil properties and plant growth under deficit irrigation. *SN Applied Sciences*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04129-7>
- Akhter, J., Mahmood, K., Malik, K. A., Mardan, A., Ahmad, M., & Iqbal, M. M. (2004). Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea. *Plant, Soil and Environment*, 50(10), 463–469.
- Arreola, C., Martínez, P., & Ríos, M. (2019). Impacto de las técnicas de riego eficiente y conservación del suelo en suelos arenosos. *Revista de Ingeniería Agrícola*, 10(1), 99–112.
- Arreola, R., González, M., & Martínez, L. (2019). Manejo de suelos arenosos para la producción de sorgo en áreas semiáridas. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 32(3), 105–116.
- Barrera, R., González, P., & Álvarez, J. (2020). Limitaciones del cultivo de sorgo en zonas áridas y semiáridas de América Latina. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26(1), 45–58.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson Education.
- Blum, A. (2014). Genomics for drought resistance—Getting down to earth. *Functional Plant Biology*, 41(11), 1191–1198. <https://doi.org/10.1071/FP14018>
- Carranco-Anaya, J. A., Ávila-Marioni, A., & Ramírez, E. (2011). Características de

- planta y productividad de sorgo con inoculación de *Rhizophagus intraradices* en condiciones de secano y riego. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 455–465.
- Carranco-Anaya, R., González, D., & Rodríguez, L. (2011). Uso de biofertilizantes para mejorar la disponibilidad de nutrientes en suelos arenosos. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 45(6), 299–310.
- Carvalho, I. R., Silva, P. S., & Costa, R. C. (2017). Adaptabilidad del sorgo en zonas semiáridas de Brasil: Caracterización de variedades de sorgo grano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41(2), 1–12.
- Ceballos, M., González, E., & Martínez, J. (2018). Uso de sorgo forrajero en América Latina: Adaptación y rendimiento en zonas áridas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(3), 205–216.
- CIMMYT. (2013). *Manual de métodos de investigación en maíz y trigo*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. <https://www.cimmyt.org>
- Cox, S. D., Lopez, H. L., & Ramirez, M. D. (2019). Variabilidad genética y rendimiento de las variedades de sorgo grano en condiciones de sequía. *Agricultura Sostenible*, 5(1), 18–29.
- El-Rehim, H. A., Hegazy, E. A., & Abd El-Mohdy, H. L. (2004). Radiation synthesis of hydrogels to enhance sandy soils water retention and increase performance of the agricultural process. *Journal of Applied Polymer Science*, 93(3), 1360–1371. <https://doi.org/10.1002/app.20576>
- FAO. (2021). *The state of the world's biodiversity for food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/ca3129en/CA3129EN.pdf>
- Fageria, N. K. (2009). *The use of nutrients in crop plants*. CRC Press.
- Fang, Y., Cen, R., Feng, W., Liu, J., Qu, Z., & Miao, Q. (2020). Effects of super-absorbent polymer on soil remediation and crop growth in arid and semi-arid areas. *Sustainability*, 12(18), 7825.

<https://doi.org/10.3390/su12187825>

Flores-Magdaleno, H., Mancilla-Villa, O. R., Mejía-Saénz, E., & Olmedo-Bolívar, J. (2022). Efecto de hidrogeles en la humedad del suelo y eficiencia del uso del agua en cultivos agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 457–469.

<https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2784>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *Sorghum*. FAO. <https://www.fao.org/crops/sorghum/en/>

García, E. (2010). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5.^a ed.). Instituto de Geografía, UNAM.

García-Moreno, A., Cano-Ríos, P., Quiroga-Garza, H. M., Espinoza-Arellano, J. de J., Muñoz-Soto, R., & Reyes-Carrillo, J. L. (2024). Acrilato de potasio para reducir el uso de agua en tomate de invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(4), e3336.

<https://doi.org/10.29312/remexca.v15i4.3336>

Gehring, J. M., & Lewis, A. J. (2007). Effect of hydrogel on wilting and moisture stress of bedding plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 105(4), 511–513.

<https://doi.org/10.21273/JASHS.105.4.511>

Gisbert Blanquer, J. M., Ibáñez Asensio, S., & Moreno Ramón, H. (2025). Textura del suelo. Universitat Politècnica de València, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Departamento de Producción Vegetal. <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/a367acbb-fb5f-46ac-90ae-277978ca6faf/content>

Gómez, A., Ortega, F., & Carrillo, S. (2020). Desempeño de variedades de sorgo forrajero en suelos marginales de Argentina. *Agroindustria Latinoamericana*, 23(4), 79–90.

Gómez, A., Pérez, F., & Martínez, J. (2017). Impacto de las enmiendas orgánicas en la retención de agua y fertilidad del suelo arenoso. *Revista de Agricultura Sostenible*, 12(3), 145–158.

- Gómez, E., Romero, J., & Sánchez, F. (2017). Nutrientes y manejo de suelos arenosos en la producción agrícola. *Agromía Mexicana*, 44(1), 58–69.
- Gómez, K. A., & Gómez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- González, M., Díaz, L., & Castro, F. (2018). Factores climáticos que afectan el crecimiento y rendimiento del sorgo en condiciones semiáridas. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 30(2), 77–85.
- González, M., Díaz, L., & Castro, F. (2019). Estrategias de manejo integrado de plagas en el cultivo de sorgo. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 30(3), 67–78.
- Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F. T., Rubira, A. F., & Muniz, E. C. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal*, 72, 365–385. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017>
- Hady, O. A., Abo-Sedera, S. A., & El-Shahawy, M. I. (2016). Effect of superabsorbent polymers on soil properties and plant growth under water stress conditions. *International Journal of Agricultural Research*, 11(2), 55–64. <https://doi.org/10.3923/ijar.2016.55.64>
- Harlan, J. R., & de Wet, J. M. J. (1972). A simplified classification of cultivated sorghum. *Crop Science*, 12(2), 172–176. <https://doi.org/10.2135/cropsci1972.0011183X001200020005x>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management (8th ed.). Pearson.
- Hernández-Hernández, R. M., López-Santos, A., Vázquez-Vázquez, C., & Salgado-García, S. (2020). Uso de polímeros superabsorbentes para mejorar la retención de humedad en suelos agrícolas. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 847–856. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.694>
- Huttermann, A., Oriquiriza, L. J. B., & Agaba, H. (2009). Application of superabsorbent polymers for improving the ecological chemistry of degraded or disturbed soils.

- Clean – Soil, Air, Water*, 37(7), 517–526.
<https://doi.org/10.1002/clen.200900048>
- INEGI. (2023). *Información geográfica de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
<https://www.inegi.org.mx>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2014). *Tecnología para la producción de sorgo bajo riego*. INIFAP, Campo Experimental Río Bravo.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2015). *Guía técnica para la producción de sorgo grano en México*. INIFAP.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/168312/Guia_tecnica_sorgo_grano.pdf
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2019). *Manejo del agua y fertilización en cultivos de granos básicos*. INIFAP.
- Ibrahim, H. M. (2019). Long-term effects of superabsorbent polymer hydrogels on soil water retention and yield. *Applied Sciences*, 9(12), 2536.
<https://doi.org/10.3390/app9122536>
- Kaisang, A., Li, Q., & Shen, S. (2020). Economic assessment of soil amendments on crop productivity across seasons. *Agricultural Water Management*, 230, 106591.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106591>
- Khan, M. N., Khan, M., Fahad, S., Adnan, M., Shah, A. N., Ullah, H., Alrumman, S. A. (2020). Improving growth, physiology and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) with integrated use of superabsorbent polymers and nitrogen fertilizer under water-deficit conditions. *Chemical Engineering Journal*, 394, 124870.
<https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.124870>
- Liu, X., Wang, Z., & Han, F. (2022). Strategic application of superabsorbent polymers to improve water use efficiency in heterogeneous soils. *Agricultural Water Management*, 261, 108260.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108260>

- Liu, Y., Xie, Y., & Zhang, H. (2019). Producción de biomasa y conversión de etanol a partir de sorgo: una evaluación para la producción sostenible de biocombustibles. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1644–1655.
- Loomis, R. S., & Connor, D. J. (1992). *Crop ecology: Productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press.
- López, F., Hernández, D., & Arreola, C. (2016). Técnicas de conservación del suelo en zonas áridas y semiáridas. *Agroecología y Producción*, 20(1), 65–75.
- López, R., & Hernández, P. (2018). Métodos de aplicación de polímeros superabsorbentes en la agricultura. *Journal of Agricultural Research*, 45(2), 67–79.
- López, R., Castro, G., & Álvarez, F. (2016). Uso eficiente del agua en suelos arenosos para el cultivo de sorgo. *Revista de Investigación Agrícola*, 29(2), 45–53.
- López, R., Márquez, J., & García, F. (2017). Condiciones de cultivo y manejo del sorgo en zonas áridas. *Agronomía Mexicana*, 43(1), 50–61.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Martínez, E., García, L., & Rodríguez, C. (2016). Efecto de la materia orgánica en el rendimiento del sorgo en suelos marginales. *Revista Mexicana de Ciencias del Suelo*, 23(4), 56–67.
- Martínez, E., García, L., & Rodríguez, C. (2018). Efectos de la deficiencia de nutrientes en el rendimiento del sorgo. *Revista Mexicana de Ciencias del Suelo*, 23(4), 56–67.
- Martínez, F., & Gómez, L. (2022). Técnicas de riego y manejo del agua en cultivos de sorgo. *Agronomía Mesoamericana*, 33(1), 23–35. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.47612>
- Martínez, F., González, J., & Pérez, E. (2017). Estudio de la variabilidad morfológica de *Sorghum bicolor* en condiciones de riego y secano. *Agrociencia*, 51(2), 97–109.
- Martínez, J., Pérez, L., & Salazar, V. (2018). La nutrición del sorgo en suelos de baja

- fertilidad. *Revista Mexicana de Ciencias del Suelo*, 23(5), 98–112.
- Martínez, P., Ramírez, R., & Ávila, A. (2018). Estrategias de fertilización controlada en suelos arenosos para mejorar la eficiencia del uso de nutrientes. *Revista de Investigación Agrícola*, 29(2), 115–128.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). *Principles of plant nutrition* (5th ed.). Kluwer Academic Publishers.
- Montesano, F. F., Parente, A., Santamaria, P., Sannino, A., & Serio, F. (2015). Biodegradable superabsorbent hydrogel increases water retention properties of growing media and plant growth. *Agricultural Water Management*, 152, 21–29.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.020>
- Nguyen, H. T., Tran, N. N., & Bui, X. T. (2019). Effect of superabsorbent polymer amendment on soil water retention and plant growth: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 212, 106552.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.106552>
- Pinheiro, A. G., Bastos de Souza, L. S., Mançoba da Rosa Ferraz Jardim, A., Araújo Júnior, G. do N., Pereira Alves, C., Alves de Souza, C. A., Cordeiro Leite, R. M., & Freire da Silva, T. G. (2021). *Lacunas de produtividades e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira: Revisão*. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(4), 2403–2426.
<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>
- Pérez, A., Saucedo, O., Iglesias, J., Wencomo, H. B., Reyes, F., Oquendo, G., & Milián, I. (2010). Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Pastos y Forrajes*, 33(1), 4–26.
- Ramírez, J., Sánchez, M., & Pérez, C. (2018). El género *Sorghum* y su importancia en la agricultura tropical. *Revista de Investigación Agrícola*, 12(1), 23–36.
- Ramos, G., Herrera, A., & Díaz, M. (2017). Impacto de las heladas en la producción de sorgo en zonas frías. *Agricultura y Clima*, 12(2), 94–104.
- Ranum, P., Peña-Rosas, J. P., & Garcia-Casal, M. N. (2020). El sorgo como alimento básico: valor nutricional y beneficios. *Boletín de Alimentación y Nutrición*, 41(1),

9–14.

- Ríos, M., Gómez, A., & López, P. (2019). Mejoramiento de la estructura del suelo y la fertilidad en suelos arenosos a través de enmiendas orgánicas. *Journal of Soil Science*, 34(4), 211–224.
- Ríos, M., Ramírez, E., & Jiménez, A. (2019). Manejo de riego en suelos arenosos para el cultivo de sorgo en zonas secas. *Agricultura y Clima*, 12(4), 76–88.
- Servicio de información agroalimentaria y pesquera, México (SIAP). 2024. Producción agrícola anual. Consulta, septiembre del 2025. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>.
- Silva, E. A., Zapata, F., & Lima, L. (2020). Sorgo dulce: Potencial para la producción de biocombustibles y jarabe en Brasil. *Revista Latinoamericana de Energía Renovable*, 7(2), 101–115.
- Smith, C. W., & Frederiksen, R. A. (2000). *Sorghum: Origin, history, technology, and production*. John Wiley & Sons.
- Solís-López, F. G., Méndez-Pérez, J. C., Huevo-Lemus, Y. C., Rodríguez-Urrutia, E. A., & Solano-Melara, N. S. (2020). Evaluación de cuatro dosis de poliacrilato de potasio en el desarrollo de la planta de café (*Coffea arabica* L.) y en la conservación de humedad disponible para la planta en el suelo. *Agrociencia*, 54(6), 765–780. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10950508>
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Texas A&M University. (2022). *Economic impact of sorghum production in the United States*. Texas A&M University. <https://agriflifeextension.tamu.edu>
- Vega, S., Morales, A., & López, E. (2015). La familia Poaceae y sus aplicaciones en la agricultura sostenible. *Agroecología*, 21(1), 41–55.
- World Flora Online Consortium. (2026). *Sorghum bicolor* (L.) Moench. In *World Flora Online*. Retrieved January 13, 2026, from

<http://www.worldfloraonline.org/taxon/wfo-0000900184>

Zapata, F., Costa, R., & Ribeiro, J. (2019). Potencial del sorgo dulce para la producción de etanol: Perspectivas en el mercado brasileño de biocombustibles. *Revista de Energía y Agricultura*, 6(1), 15–27.

Zhang, M., Wang, H., Yang, Z., Wang, L., & Chen, W. (2015). Effects of superabsorbent polymers on the physical and chemical properties of soil following different wetting and drying cycles. *PLOS ONE*, 10(11), e0141543.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141543>

embargo, su adopción debe evaluarse cuidadosamente considerando las condiciones locales de suelo, clima y rentabilidad de sistemas productivos.