

Desempeño fisiológico de semillas de sorgo dulce en respuesta a la aplicación de retardantes de crecimiento

Deisy Lorena Flórez-Gómez¹, John Freddy Rodríguez-Molina², David Napoleón Vargas-Ramírez²,
Luisa Fernanda Sarmiento-Moreno¹, Gustavo Adolfo Rodríguez-Yzquierdo¹, Manuel Alfonso Patiño-Moscoso¹, Karen Viviana Osorio-Guerrero¹*

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA, Sede Central, Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

²Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA, Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera, Cundinamarca, Colombia.

*Autor para correspondencia: kosorio@agrosavia.co

Physiological performance of Sweet *Sorghum* seeds in response to Growth Retardant application

Abstract

One of the agronomic management strategies to reduce plant lodging during the production of quality sweet forage *sorghum* seed is the use of growth retardants; however, its effect on the physiological performance of the seeds is unknown. The objective of this study was to evaluate the physiological quality of sweet forage *sorghum* seeds obtained after the application of growth retardants in the vegetative state of the plant in two cultivation environments. The trials were established in two locations located in the agroecological zones: inter-Andean valleys and Colombian dry Caribbean during the first semester of 2022. The experimental design used was a randomized complete block with three repetitions and six treatments consisting of the application of variable doses of ethephon, mepiquat chloride and trinexapac-ethyl in two stages of development of the plant (1 and 3) plus the control without the application of retardants. The variables of germination percentage, viability by tetrazolium and vigor by accelerated aging, electrical conductivity and cold test were determined. The average values of germination and viability were 64 % and 80 % respectively. The vigor by accelerated aging and the cold test obtained an approximate value of 62 %. The results indicate that there are effects of the environment and its interaction with the retardants without affecting the physiological performance of the seeds. The existing variability in the physiological parameters of *sorghum* seeds is due to adverse environmental conditions towards physiological maturity and harvest.

Keywords: *Sorghum bicolor* L., trinexapac-ethyl, ethephon, mepiquat chloride, vigor, germination.

Resumen

Una de las estrategias de manejo agronómico para disminuir el volcamiento de plantas durante la producción de semilla de calidad de sorgo dulce forrajero es el uso de retardantes de crecimiento; no obstante, se desconoce su efecto sobre el desempeño fisiológico de las semillas. El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad fisiológica de semillas de sorgo dulce forrajero obtenidas posterior a la aplicación de retardantes de crecimiento en estado vegetativo de la planta en dos ambientes de cultivo. Los ensayos se establecieron en dos localidades ubicadas en las zonas agroecológicas: valles interandinos y Caribe seco



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Mateo Dávila

Recibido /
Received:
15/06/2023

Aceptado /
Accepted:
01/05/2024

Publicado en línea /
Published online:
14/05/2024



colombiano, durante el primer semestre de 2022. El diseño experimental de campo utilizado fueron bloques completos al azar con tres repeticiones y seis tratamientos consistentes en la aplicación de dosis variables de etefón, cloruro de mepiquat y trinexapac-etil en dos estados de desarrollo de la planta (1 y 3), más el testigo sin aplicación de retardantes. Se determinaron las variables de porcentaje de germinación, viabilidad por tetrazolio y vigor por envejecimiento acelerado, conductividad eléctrica y prueba de frío. Los valores promedio de germinación y viabilidad fueron del 64 % y 80 % respectivamente. El vigor por envejecimiento acelerado y la prueba de frío obtuvo un valor aproximado de 62 %. Los resultados indican que existen efectos del ambiente y su interacción con los retardantes sin afectar el desempeño fisiológico de las semillas. La variabilidad existente en los parámetros fisiológicos de las semillas de sorgo obedece a las condiciones ambientales adversas hacia la madurez fisiológica y la cosecha.

Palabras clave: *Sorghum bicolor* L., trinexapac-etil, etefón, cloruro de mepiquat, vigor, germinación.

INTRODUCCIÓN

El sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) es un cultivo de gran importancia a nivel mundial, gracias a su adaptación dentro de áreas con poca lluvia o acceso limitado al agua de riego. En su forma natural, es una planta de gran porte que puede crecer más de 1.8 metros de altura. Tiene varios usos, como biocombustible y en alimentación de animales, como aves y ganado, por su alto rendimiento en biomasa y azúcar [1]. En su uso como forraje, representa una excelente alternativa por el contenido de materia seca, por su valor nutritivo y por su potencial para producir más de dos cortes a intervalos de varias semanas, lo que permite su uso en pastoreo, henificado o ensilado, superando incluso a cultivos de uso frecuente como el maíz en rendimiento [2,3].

Cabe resaltar que, a pesar del valor conocido del sorgo dulce, la producción de semilla de este cultivo representa un desafío debido a su altura y a la estructura de la planta. El bajo contenido de fibra en los tallos, que favorece la digestibilidad en los animales y las condiciones climáticas adversas, así como fuertes lluvias y vientos, pueden provocar el volcamiento o acame de las plantas en periodos críticos como el reproductivo (cercano a la cosecha), afectando el rendimiento, la semilla y la calidad fisiológica y sanitaria de esta [4].

La calidad de la semilla se define por un conjunto de cualidades deseables en sus componentes físico, genético, fisiológico y sanitario [5]. Una semilla de buena calidad debe presentar alto grado de pureza genética, ser vigorosa y viable, estar libre de plagas, patógenos y daños mecánicos, tener un tamaño uniforme y una excelente apariencia, y poseer una humedad óptima para garantizar su adecuado almacenamiento [6]. A nivel fisiológico, la calidad se relaciona con varios factores, tales como la cantidad de reservas, la proporción de proteína, el tamaño del embrión y la eficiencia de los sistemas enzimáticos presentes en la semilla [7].

Los atributos de calidad de una semilla a nivel fisiológico se evalúan principalmente de acuerdo con su vigor y germinación, que pueden verse reducidos por condiciones



desfavorables durante el desarrollo del cultivo en campo y en el proceso de almacenamiento de la cosecha [8,9]. La velocidad de germinación y el vigor están relacionados con los procesos respiratorios de los granos; los cuales, aún cosechados, tienen actividad respiratoria y puede producirse de forma aeróbica o anaeróbica, dependiendo de las condiciones donde se encuentre almacenada. Los procesos y la velocidad de respiración se ven altamente afectados por variaciones en la temperatura, el contenido de humedad, el estado fitosanitario de la cosecha y la composición del aire (relación entre gas carbónico y oxígeno), razones por las que se produce pérdida de peso y calentamiento en los granos que, posteriormente, generan un deterioro acelerado de la semilla y ambientes propicios para el desarrollo de hongos y ataque de insectos [10].

Trabajos previos en semillas de sorgo han determinado que los factores que afectan mayormente la germinación son los cambios bruscos de temperatura y humedad relativa, ya que aceleran el metabolismo de la semilla y los procesos de respiración, por lo que la viabilidad y la calidad de esta se deteriora con el paso del tiempo [11,12,13]. Para preservar la calidad de las cosechas es indispensable contar con un buen sistema de almacenamiento que permita conservar los atributos de calidad. Granos con humedades entre 11 % y 13 % tienen procesos respiratorios lentos que favorecen sus procesos de conservación y un lento deterioro [14]. Así mismo, altos contenidos de humedad favorecen la proliferación de hongos que pueden sobrevivir durante mucho tiempo, reduciendo el poder germinativo y el vigor de las semillas, ocasionando que las raíces se pudran y aparezcan otras enfermedades en las plantas [10].

La aplicación de retardantes de crecimiento se ha utilizado como un método para mejorar algunas cualidades del material vegetal. Estudios han demostrado su éxito para incrementar la producción en tomate (*Solanum lycopersicum*) [15], aumentar el porcentaje y velocidad de germinación de badea (*Passiflora quadrangularis*) [16], y promover la ruptura de la latencia en semillas que la presentan, lo que permite la germinación y el crecimiento del embrión [17].

Los efectos fisiológicos que se pueden producir en las plantas con la aplicación de hormonas vegetales dependerán del mecanismo de interferencia que estas tengan y del lugar donde se sintetizan. A la fecha se conocen cinco grupos de fitohormonas: auxinas, giberelinas, citoquininas, ácido abscísico y etileno; y cada ruta modifica características de importancia en el desarrollo normal de la planta [18]. Una de las características que más se ha buscado modificar con la aplicación de retardantes de crecimiento es la altura, obteniéndose buenos resultados en diferentes especies, ya que, en su mayoría, estos actúan como inhibidores de la biosíntesis de giberelinas, lo que genera alturas inferiores a las que normalmente una planta puede presentar [19].

El volcamiento o acame de las plantas es un fenómeno recurrente en los procesos de producción de semilla. Este puede contrarrestarse con el uso de retardantes de crecimiento, los cuales mejoran la arquitectura de la planta y favorecen la captura de radiación solar y otros recursos ambientales. A la vez, mejoran la partición de foto asimilados, el llenado de la semilla y, consecuentemente, la calidad fisiológica de la misma [20].

Moléculas como el trinexapac-etil y el cloruro de mepiquat, que son parte del grupo de giberelinas, funcionan como una opción tecnológica que inactiva principalmente



el crecimiento del tallo, la elongación de entrenudos y ha demostrado tener un efecto positivo comprobado en algunas plantas en la acumulación de contenido de sacarosa. Un ejemplo es la caña de azúcar medida en kg/azúcar/tonelada de caña cosechada [21]. El etefón o etileno que modifica el metabolismo de las auxinas es usado experimentalmente con fines múltiples como: rompimiento de dormancia, brotaciones, inducción floral, maduración de frutos o semillas [22].

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la calidad fisiológica de semillas de sorgo dulce forrajero obtenidas mediante la aplicación de retardantes de crecimiento en dos ambientes de cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento

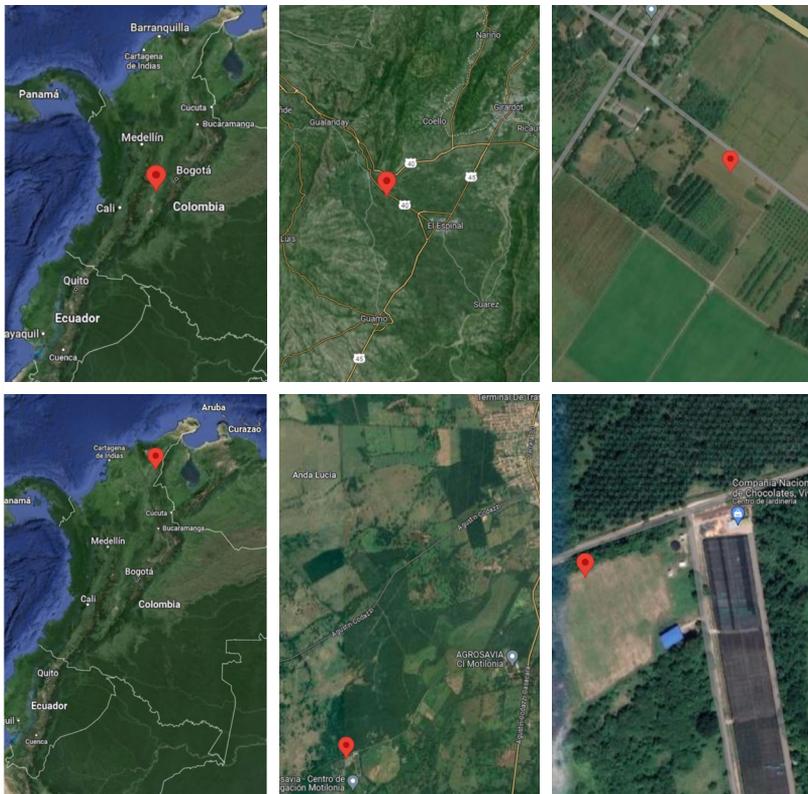


Figura 1. Localización del experimento. Arriba: Centro de Investigación Naitama ubicado en el valle cálido del Alto Magdalena, municipio El Espinal, departamento de Tolima. Abajo: Centro de Investigación Motilonia ubicado en el Caribe seco colombiano, municipio Agustín Codazzi, departamento del César. Imágenes tomadas de Google Maps (s.f.). Ver el mapa en: <https://maps.app.goo.gl/vR2GTE35U5cjoJA9>, <https://maps.app.goo.gl/o7J6Mg6fwMHRbnD9>.



Los ensayos de producción de semilla de sorgo forrajero fueron sembrados en dos localidades contrastantes en centros de investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA]. La primera localidad corresponde al Centro de Investigación Nataima, ubicado en el valle cálido del Alto Magdalena, municipio El Espinal, departamento de Tolima, con ubicación geográfica 04° 11' 18.35" de latitud norte y 74° 57' 32.73" de longitud oeste, a una altitud de 371 msnm y con topografía plana (pendiente menor al 3 %). La segunda localidad corresponde al Centro de Investigación Motilonia, ubicado en el Caribe seco colombiano, en el municipio de Agustín Codazzi, departamento del César, con coordenadas geográficas: 9°59'18" de latitud norte y 73°16'21" de longitud oeste, una altitud de 91 msnm y topografía plana (pendiente menor al 3 %). La localización del experimento se puede ver en la figura 1.

Material vegetal

La variedad de sorgo dulce forrajero Corpoica JYT 18 fue la seleccionada para este estudio, ya que agronómicamente sobresale con rendimientos promedio de 45 t. ha⁻¹ de forraje verde y concentración de sólidos solubles totales que oscilan de 13,0 a 16,7 °brix, lo que la hace una variedad altamente demandada para la suplementación nutricional, sobre todo en la ganadería bovina [23,24,25].

El cultivar fue sembrado considerando una densidad poblacional para producción de semilla de 75.000 plantas ha⁻¹. Además, el plan de fertilización se basó en los requerimientos nutricionales del cultivo y en los análisis químicos del suelo para cada localidad. Por su parte, el control de arvenses, y el manejo fitosanitario del cultivo se llevó a cabo con la implementación de las técnicas de manejo integrado recomendadas para cada localidad y desarrolladas por AGROSAVIA.

Aplicación de retardantes en campo

Los ensayos de campo se establecieron bajo un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones y se evaluaron seis tratamientos. En total se establecieron en cada localidad dieciocho unidades experimentales, las cuales se constituyeron en parcelas de seis surcos de diez metros de largo y con una separación entre surcos de 0,8 m para un área de 48 m². Los tratamientos evaluados consistieron en la aplicación de: T1- Cloruro de mepiquat (100 g i.a. ha⁻¹), T2- Etefón (720 g i.a. ha⁻¹), T3- Etefón (1200 g i.a. ha⁻¹), T4- Cloruro de mepiquat (25 g i.a. ha⁻¹) + Etefón (360 g i.a. ha⁻¹), T5- Trínexapac-etil (200 g i.a. ha⁻¹) y T6 que correspondió al testigo sin aplicación de retardantes de crecimiento. Los productos se aplicaron en los estados de desarrollo vegetativos 1, tres hojas desarrolladas antes del primordio foliar, y 3, diferenciación del ápice de crecimiento durante la diferenciación floral.

Variables evaluadas

Condiciones ambientales

Durante el periodo de evaluación de los ensayos en campo se registraron diariamente las variables de precipitación y temperatura. Para el cálculo de los excesos y déficit hídricos se utilizó el modelo de balance hídrico propuesto por Allen et al. [26], al igual



que la evapotranspiración real considerando los coeficientes de cultivo (Kc) reportados por el mismo autor. Adicionalmente se empleó la información de las estaciones meteorológicas ubicadas en cada localidad.

Calidad fisiológica

Una vez finalizada la cosecha a los 120 días después de emergencia se realizó el proceso de beneficio de semillas por cada uno de los tratamientos de campo en cada localidad. Seguidamente, se enviaron al laboratorio de producción vegetal, en el área de semillas del C.I. Tibaitatá de AGROSAVIA, que se ubica en el municipio de Mosquera, departamento de Cundinamarca, Colombia. Allí, se establecieron ensayos para determinar la condición fisiológica de cada uno de ellos usando la metodología propuesta por ISTA [27] considerando las siguientes variables:

Germinación: para estimar el poder germinativo, se hicieron montajes de semillas sembradas entre papel con cuatro repeticiones de 50 semillas cada una. El papel anchor fue humedecido con agua destilada considerando una relación de 2.5 veces el peso del sustrato (papel). Los rollos de papel se mantuvieron en un cámara de germinación a 25 °C. A los cuatro días se inició con el primer conteo de plantas normales y a los diez días se finalizó dicho conteo junto con el número de plantas anormales, semillas frescas, duras y muertas; para después calcular su proporción porcentual [28].

Viabilidad: la capacidad del embrión para producir una planta se determinó a través de la prueba de tetrazolio con cuatro repeticiones de 25 semillas cada una. Las semillas se humedecieron entre papel anchor a 20 °C durante 18 horas. Posteriormente se realizó un corte longitudinal a través del embrión y un cuarto del endospermo. Las semillas se ubicaron en cajas de Petri y se realizó su inmersión en una solución de tetrazolio al 1 %. Luego, se introdujeron en un horno a una temperatura de 30 °C por un lapso de tres horas. Una vez transcurrido el tiempo, las semillas se retiraron del horno, se lavaron con agua y se realizó la incisión transversal para facilitar la observación de la tinción. Siguiendo los criterios establecidos por ISTA [27], se determinó el porcentaje de viabilidad con base en la diferenciación de colores en los tejidos.

Envejecimiento acelerado: esta prueba se realizó para determinar el vigor de las semillas, considerando cuatro repeticiones de 50 semillas cada una, por cada uno de los tratamientos. Las semillas se ubicaron en cajas criogénicas que contenían 40 ml de agua y una malla de aluminio sobre la cual se distribuyó la muestra de manera uniforme. Las cajas se sometieron a una temperatura de 42 °C y una humedad relativa superior al 90 % por un periodo de 72 horas. Finalizado el tiempo, se realizó la prueba de germinación siguiendo los lineamientos de la prueba estándar [27].

Prueba de frío: para estimar el vigor por medio de esta prueba se siguieron parámetros similares a los del montaje de la prueba de germinación estándar. Se establecieron cuatro repeticiones de 50 semillas cada una, por cada tratamiento. Los rollos de papel humedecidos se ubicaron en condiciones de temperatura de 10 °C por un lapso de siete días. Cumplido este tiempo, los rollos se colocaron bajo condiciones óptimas para su germinación con una temperatura de 25 °C y se realizaron los conteos determinados en la prueba estandarizada de germinación [29].



Conductividad eléctrica (CE): el vigor se estimó también mediante esta prueba para calcular el grado de deterioro de la semilla, en la cual se utilizaron cuatro repeticiones de 50 semillas cada una, para cada tratamiento. Posterior al registro del peso de las semillas, estas se sumergieron en vasos de plástico con 50 ml de agua destilada y se mantuvieron a una temperatura de 20 °C. Después de 24 horas de imbibición, se retiraron las semillas de los recipientes para medir la CE por medio de un conductímetro. Los cálculos se expresaron en $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ de semillas [27,30].

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron en el programa estadístico R Studio® [31] en donde se comprobaron los supuestos de normalidad, homocedasticidad y no aditividad con las pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett, para luego someter los datos al análisis de varianza. Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5 %. Para explicar la variación en la respuesta de la variedad en el bloque se empleó el siguiente modelo estadístico lineal: $Y_{ijk} = \mu + R_i + L_j + (RL)_{ij} + \beta k(\cdot) + \varepsilon_{ijk}$, donde Y_{ijk} es igual al resultado promedio de las variables del i -ésimo retardante obtenido en la j -ésima localidad y k -ésima repetición; μ equivale a la media general de las variables; R_i semeja el efecto del i -ésimo retardante; L_j es el efecto de la j -ésima localidad; $(RL)_{ij}$ indica la interacción entre el i -ésimo retardante de crecimiento y la j -ésima localidad, $\beta k(\cdot)$ corresponde al efecto del bloque en la k -ésima repetición y en la j -ésima localidad y ε_{ijk} indica el efecto aleatorio del error experimental relacionado al i -ésimo retardante en la j -ésima localidad y k -ésima repetición, de acuerdo con el modelo lineal aditivo. Se realizó, adicionalmente, un análisis multivariado por componentes principales, analizando las variables de calidad fisiológica de semillas y las condiciones ambientales de producción en las dos localidades estudiadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones ambientales

En la figura 2 se pueden observar los balances hídricos que se presentaron durante el ciclo productivo por localidad y, de forma complementaria, en la figura 3 se reflejan las precipitaciones y temperaturas medias diarias de cada ambiente. Se puede detallar que, en general, las dos localidades tuvieron mayor prevalencia de déficit que de exceso de agua, requerimientos que fueron suplidos de acuerdo con las necesidades hídricas de las plantas. No obstante, las altas precipitaciones registradas en la localidad del C.I. Motilonia entre la madurez fisiológica y la cosecha durante el mes de septiembre, suscitaron el volcamiento o acame de las plantas, afectando considerablemente el desempeño fisiológico de las semillas, puesto que las estructuras florales quedan altamente expuestas a daños por humedad, poca captura fotosintética y daños sanitarios [32]. En tal sentido, durante la madurez fisiológica, la semilla alcanza la mayor calidad en términos de viabilidad y vigor; en este momento la semilla se separa fisiológicamente de la planta y es ahí cuando comienza a depender de sí misma, es decir, que en la producción de semillas las condiciones ambientales adversas de excesos hídricos hacia el final del ciclo del cultivo comprometen la calidad final de la semilla obtenida y conllevan a su rápido deterioro y a la disminución de su



calidad fisiológica. Esta información es coherente con los hallazgos de Pecina-Becerril et al. [33], quienes documentaron que las precipitaciones irregulares y poco frecuentes antes de la cosecha de semilla de sorgo en campo afectan directamente el vigor y la tasa de germinación.

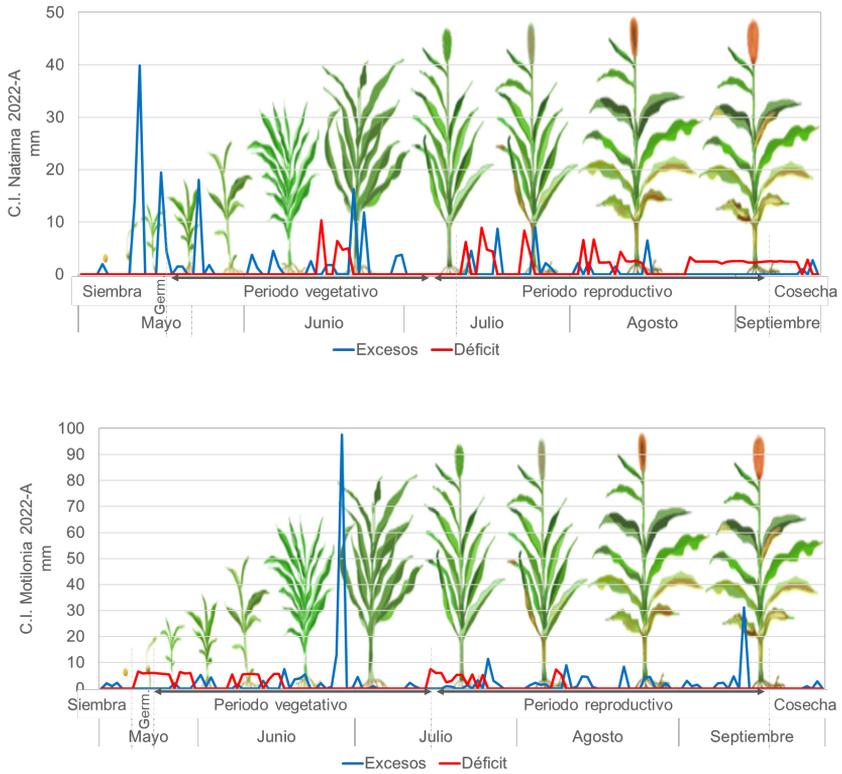


Figura 2. Balance hídrico del ensayo de retardantes de crecimiento de sorgo en el C.I. Nataima y el C.I. Motilonia durante ciclo fenológico del cultivo en el primer semestre del 2022

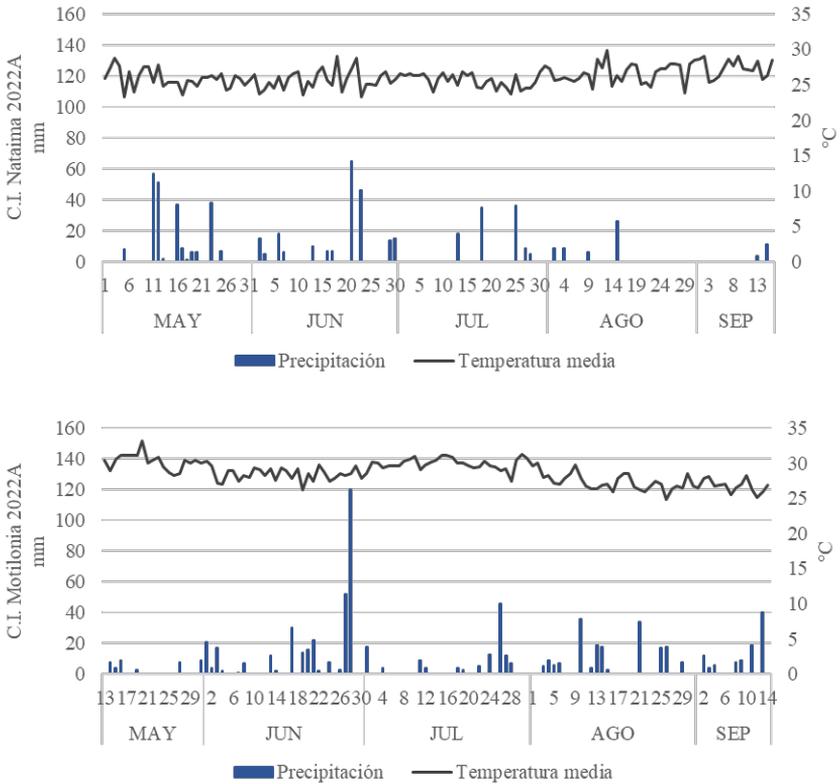


Figura 3. Precipitaciones y temperaturas medias registras en el ensayo de retardantes de crecimiento de sorgo en el C.I. Nataima y el C.I. Motilonia durante el primer semestre del 2022

Por otro lado, se evidencia que los excesos de humedad durante las etapas tempranas del cultivo, especialmente durante la fase de crecimiento vegetativo, no son limitantes para la calidad de la semilla y el desarrollo de esta. Al contrario, los excesos de precipitación en fases fenológicas críticas, como floración, madurez fisiológica y el periodo previo a la cosecha representan factores de riesgo para la acumulación de carbohidratos estructurales [3], así como también alteraciones en la calidad fisiológica y sanitaria de la semilla [34].

Las condiciones ambientales en las dos localidades, con excepción de los eventos de exceso de precipitación al final del ciclo para el caso del C.I. Motilonia, fueron adecuadas para el desarrollo del cultivo de sorgo en cuanto a requerimientos hídricos y de temperatura. Al respecto, Bueno [35] reporta que el sorgo forrajero necesita lluvias moderadas, de un mínimo de 400 a 450 mm y un óptimo de 600 a 700 mm. En las dos localidades de experimentación se obtuvieron precipitaciones dentro del rango sugerido 796 y 596,8 mm en C.I. Motilonia y C.I. Nataima, respectivamente. En cuanto a la temperatura media, el óptimo se encuentra alrededor de los 27° C y la temperatura de ambas localidades osciló dentro del rango referido para el cultivo.



Calidad fisiológica de las semillas

Entre los factores que afectan la calidad fisiológica de la semilla se encuentran la composición genética, las condiciones ambientales durante el desarrollo de la semilla y las condiciones de almacenamiento [28,36].

En todas las variables de desempeño fisiológico evaluadas y medidas en los términos de viabilidad y vigor, se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas para las fuentes de variación, la localidad y la interacción entre ambiente y tratamientos (tablas 1 y 2); lo cual sugiere que las diferencias obtenidas, estuvieron determinadas en gran medida por el lugar de producción de la semilla y sus condiciones ambientales, así como por la respuesta del ambiente al tipo de regulador y la dosis utilizada. De acuerdo con los resultados de la comparación de medias de cada localidad, se encontró que el C.I. Nataima tuvo un mejor comportamiento fisiológico en todas las variables evaluadas en comparación al C.I. Motilonia, lo cual se esperaba en vista de las precipitaciones que se presentaron al final del ciclo productivo en esta localidad del Caribe seco.

Tabla 1. Cuadros medios del análisis de varianza para las variables de la prueba de germinación estándar y la viabilidad en sorgo forrajero JJT-18 durante el primer semestre del 2022 en dos localidades evaluadas.

Fuente de variación	GL	Germinación (%)	Plántulas anormales (%)	Semillas muertas (%)	Viabilidad (%)
Localidad (L)	1	3154.69***	90.25**	2384.69***	568.03***
Tratamiento (R)	5	25.65 ^{ns}	43.16***	11.89 ^{ns}	57.36*
L x R	5	126.36***	15.12 ^{ns}	136.43***	140.43***
Error	24	20.83	7.14	7.97	21.86
CV (%)		7.09	20.6	12.95	5.87
Mean		64.42	12.97	21.81	79.69

GL: Grados de libertad; CV: Coeficiente de variación; ***, **, *: diferencias significativas (p<0,001), (p<0,01), y (p<0,05), respectivamente; NS: No significativo

Tabla 2. Cuadros medios del análisis de varianza para las variables relacionadas con el vigor de la semilla en sorgo forrajero JJT-18 durante el primer semestre del 2022 en dos localidades evaluadas.

Fuente de variación	GL	Envejecimiento acelerado (%)	Prueba de frío (%)	Conductividad eléctrica (%)
Localidad (L)	1	245.44**	2773.78***	1722.25***
Tratamiento (R)	5	40.87 ^{ns}	29.98 ^{ns}	36.98***
L x R	5	116.778*	120.98*	14.85*
Error	24	30.39	43.67	3.97
CV (%)		8.82	10.94	6.66
Mean		62.5	60.39	29.92

GL: Grados de libertad; CV: Coeficiente de variación; ***, **, *: diferencias significativas (p<0,001), (p<0,01), y (p<0,05), respectivamente; NS: No significativo



Viabilidad de las semillas

Referente a la evaluación de germinación, las semillas provenientes de las dos localidades no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, pero sí entre las localidades evaluadas y la interacción. La semilla de los tratamientos evaluados en el C.I. Nataima presentó los valores de germinación más altos en comparación con los del C.I. Motilonia y un coeficiente de variación del 4.3 % y dos grupos de significancia estadística, en donde la aplicación de etefón a su máxima dosis y la mezcla de etefón con cloruro de mepiquat presentaron las menores germinaciones con 68 % y 68.3 % respectivamente, frente al testigo, que tuvo la mayor germinación: 81.3 %. Respecto a la semilla proveniente de los ensayos establecidos en el C.I. Motilonia, el testigo obtuvo la menor germinación, con 50 % en comparación con el tratamiento de etefón de máxima dosis que presentó el mayor porcentaje germinativo: 62 %. Por su parte, el coeficiente de variación en este ambiente fue de 10.1 % (como se ve en la tabla 3).

Tabla 3. Comparación de medias para las variables de germinación de la semilla cosechada durante el primer semestre del 2022 en el C.I. Nataima y el C.I. Motilonia.

Localidad	Tratamiento	Germinación (%)	Plántulas anormales (%)	Semillas muertas (%)
C.I. Nataima	T1	81.0 A	8.0 C	11.0 B
	T2	73.0 AB	10.0 BC	17.0 A
	T3	68.0 B	13.0 AB	19.0 A
	T4	68.3 B	17.0 A	14.7 AB
	T5	73.3 AB	12.3 ABC	14.4 AB
	Testigo	81.5 A	9.5 BC	9.0 B
	C.V. (%)	4.3	17.8	16.42
	Desv. Estándar	5.75	3.75	4.53
C.I. Motilonia	T1	54.0 A	10.0 A	36.0 A
	T2	59.0 A	18.0 A	23.0 B
	T3	62.0 A	14.0 A	24.0 B
	T4	55.0 A	16.0 A	29.0 AB
	T5	51.0 A	15.0 A	34.0 A
	Testigo	50.0 A	15.0 A	35.0 A
	C.V. (%)	11.6	24.59	19.15
	Desv. Estándar	6.4	3.63	5.83

*Medias con letras iguales en sentido vertical no son estadísticamente diferentes con $P < 0.05$ (prueba de Tukey).

La germinación de genotipos de sorgo ha sido reportada como afectada por altas precipitaciones durante la etapa de llenado de grano y madurez fisiológica [33]. Es importante destacar que los porcentajes de germinación de la semilla procedente del C.I. Nataima se encontraron cercanos al 80 %, valor mínimo reglamentario para la comercialización de semilla certificada en la normatividad nacional de Colombia [37], mientras que los del C.I. Motilonia no alcanzaron este umbral mencionado.



La viabilidad de las semillas obtenidas presentó diferencias altamente significativas por la interacción del ambiente de producción más que por la acción de los tratamientos, siendo mayor en las semillas producidas en el C.I. Nataima, debido a las condiciones de baja humedad durante las etapas de madurez fisiológica y de cosecha (tabla 4). En contraste, en el C.I. Motilonia se presentaron lluvias continuas y alta humedad relativa al final del ciclo productivo, lo que pudo inferir en la obtención de menores valores de viabilidad reportados para esta localidad.

Tabla 4. Comparación de medias para las variables de viabilidad y vigor de la semilla cosechada durante el primer semestre del 2022 en el C.I. Nataima y el C.I. Motilonia.

Localidad	Tratamiento	Viabilidad (%)	Envejecimiento acelerado (%)	Prueba de frío (%)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$)
C.I. Nataima	T1	86.7 A	71.0 A	72.3 A	23.1 A
	T2	76.0 B	55.7 A	64.7 A	24.4 A
	T3	88.0 A	62.0 A	71.0 A	23.2 A
	T4	81.0 AB	65.3 A	66.0 A	23.2 A
	T5	88.0 A	65.7 A	70.3 A	25.2 A
	Testigo	82.3 AB	71.0 A	70.7 A	21.2 A
	C.V. (%)	4.3	10	7.4	6.7
	Desv. Estándar	5.28	7.52	4.9	1.99
C.I. Motilonia	T1	65.0 B	59.0 A	40.0 A	36.4 A
	T2	84.0 A	61.7 A	57.0 A	37.5 A
	T3	76.0 AB	65.0 A	52.3 A	34.6 A
	T4	75.7 AB	63.7 A	57.0 A	34.0 A
	T5	80.7 AB	54.0 A	49.3 A	45.0 A
	Testigo	73.0 AB	56.0 A	54.0 A	36.2 A
	C.V. (%)	8	7.8	13.8	6.6
	Desv. Estándar	7.8	5.71	9.06	4.18

*Medias con letras iguales en sentido vertical no son estadísticamente diferentes con $P < 0.05$ (prueba de Tukey).

Según Copeland y McDonald [28], variaciones contrastantes en las condiciones climáticas pueden causar el deterioro de las semillas, así como disminuir su viabilidad y vigor. Esta afirmación concuerda con la variación en la germinación y la viabilidad de las semillas de ambas localidades, la cual pudo verse afectada de igual manera por las altas precipitaciones que se presentaron durante la etapa previa a la cosecha en donde se produce la madurez de la semilla, ocasionando altos contenidos de humedad que conllevan a la reducción en la calidad y el deterioro de esta.

Además de la selección del tiempo de cosecha, el grado de madurez de la semilla de sorgo es uno de los factores que se relaciona en gran medida con su germinación y vigor. Por consiguiente, la semilla de cosecha tardía, como aquella que no está completamente desarrollada y cuyo embrión es inmaduro, contribuyen al proceso de senescencia,



dada la inhibición de enzimas que son responsables de la movilización de reservas de almacenamiento que aseguran la germinación y el crecimiento de las plántulas [38].

Vigor de las semillas

Los resultados obtenidos durante las evaluaciones del vigor de las semillas de cada tratamiento y sometidas a condiciones de estrés no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, pero sí entre las localidades: $p < 0,01$ y $p < 0,001$ para las pruebas de envejecimiento acelerado y prueba de frío, respectivamente. Estas evaluaciones sugieren que las semillas procedentes del C.I. Nataima tendrían un mejor comportamiento en campo frente a condiciones adversas en comparación con las semillas producidas en el C.I. Motilonia. Además, se evidenció con estas pruebas que las semillas sometidas a estos tratamientos y bajo estas condiciones tienen menor tolerancia a condiciones de almacenamiento inadecuadas o exposiciones prolongadas a situaciones de estrés.

En contraste con las pruebas anteriores, la conductividad eléctrica mostró diferencias significativas entre tratamientos, localidades e interacción ($p < 0,001$). Los valores medios para la localidad del C.I. Nataima fue de $23.4 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ en comparación con los del C.I. Motilonia que oscilan en promedio de $37.3 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$. Las diferencias encontradas, pueden deberse a que esta prueba es altamente sensible y permite evaluar la integridad de las membranas celulares de la semilla, teniendo en cuenta que son las últimas estructuras en formarse durante la fase del desarrollo en la madurez fisiológica y las primeras en deteriorarse, lo cual genera datos contrastantes y por lo tanto diferenciadores.

El momento oportuno de cosecha es el factor más determinante en la calidad de semillas de sorgo; es así que el exceso de lluvias hacia el final del ciclo del cultivo lleva a la cosecha de semillas con alta humedad, desencadenando una respuesta fisiológica perjudicial que afecta drásticamente la integridad de las membranas celulares de las mismas [39].

Los resultados encontrados, tanto en viabilidad como en vigor de la semilla, fueron similares a los obtenidos por Ochieng [40] al evaluar la calidad fisiológica de semillas de sorgo en dos localidades. Se encontraron diferencias en función de la procedencia de la semilla, siendo superior la de la localidad con menor régimen de lluvias; datos acordes a los resultados de la localidad del C.I. Nataima. La viabilidad puede verse afectada por diversas circunstancias durante la etapa de producción, como ataque de plagas, la eficiencia en las estructuras vegetativas para interceptación de luz y la transferencia de nutrientes al grano [41]. Por otro lado, durante la poscosecha, el desempeño fisiológico puede ser menor debido al secado rápido a altas temperaturas y el almacenamiento inadecuado [42,43].

Un lote de semillas con un alto vigor se caracteriza por una buena germinación y un rápido crecimiento de las plántulas [44]. La disminución del vigor es consecuencia del deterioro de las semillas a causa de factores adversos como cosechas tardías o excesos de lluvias durante la madurez y la cosecha [43]. En este sentido, el deterioro en gramíneas inicia en las células de la radícula y se extiende hacia el escutelo [45], afectando las membranas de las mitocondrias y la producción de energía de las células, lo que se traduce en una baja calidad fisiológica de la semilla [46]. La pérdida de viabilidad es el último indicador de deterioro antes de la muerte de la semilla [47].



Análisis de componentes principales

Los resultados del análisis de componentes principales se presentan en la figura 4. En el *biplot*, los puntos representan cada una de las muestras de 50 semillas y los vectores representan las variables de calidad fisiológica y las condiciones ambientales medidas durante la etapa de madurez fisiológica. Las muestras de las dos localidades de estudio se agrupan en diferentes regiones, lo que indica que la semilla cosechada exhibe una variabilidad en la calidad fisiológica que puede estar relacionada con las variables ambientales medidas en este estudio.

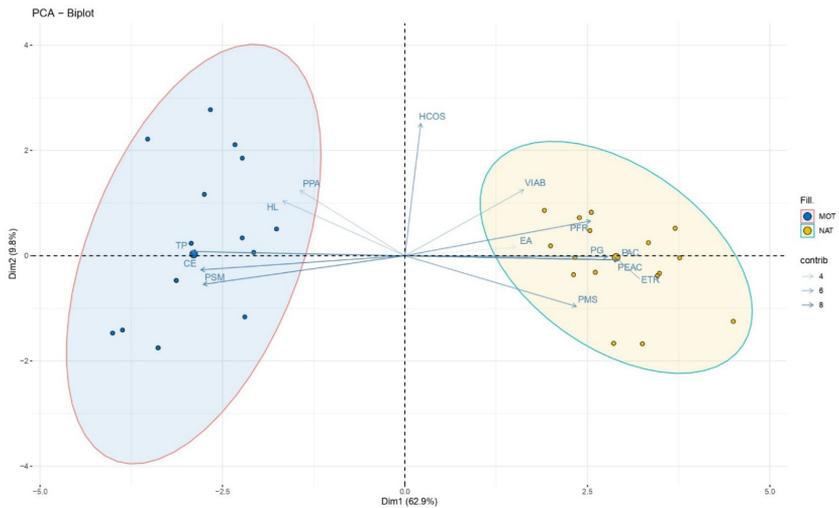


Figura 4. Análisis de componentes principales de variables fisiológicas y ambientales analizadas de la semilla cosechada durante el primer semestre del 2022 en el C.I. Nataima y el C.I. Motilonia.

El primer eje principal del *biplot* explica el 62.9 % de la variabilidad en los datos y está fuertemente correlacionado con las variables de viabilidad (VIAB), prueba de frío (PFR), envejecimiento acelerado (EA), porcentaje de germinación (PG), porcentaje de plantas anormales (PPA), humedad en laboratorio (HL), conductividad eléctrica (CE), porcentaje de semillas muertas (PSM), variables ambientales como evapotranspiración (ETR), temperatura (TP) y precipitación durante la etapa de madurez fisiológica (PAC y PEAC). El segundo eje principal explica el 9.8 % de la variabilidad en los datos y está correlacionado con el contenido de humedad de la semilla al momento de la cosecha (HC).

Las variables fisiológicas PMS, VIAB, PFR, EA y PG están correlacionadas positivamente con las variables ambientales PAC, PEAC y ETR. Lo anterior indica que el número de semillas germinadas y viables, incluso después de ser sometidas a condiciones de estrés, aumenta cuando la precipitación acumulada durante la etapa de madurez fisiológica es menor y disminuye cuando la temperatura promedio durante la etapa de madurez fisiológica es mayor. Por su parte, Ellis y Yadav [48] reportan una disminución en la longevidad de la semilla por un aumento de la lluvia durante el desarrollo de esta, la cual



puede ser reversible. De igual modo, Msongaleli [49] concluye que variedades mejoradas de sorgo presentan atributos de calidad deficientes de semilla cuando las plantas se someten a condiciones de estrés hídrico.

Así mismo, la correlación positiva entre las variables fisiológicas PPA, HL, CE y PSM con la variable ambiental TP parece indicar que una mayor temperatura durante la etapa de maduración fisiológica y un mayor contenido de humedad de la semilla afectan negativamente la calidad fisiológica de estas. En este sentido, es posible inferir que, cuando hay suficiente humedad para que el cultivo de sorgo complete su ciclo, una precipitación adecuada en la etapa de madurez fisiológica, pero una menor temperatura y un menor contenido de humedad en postcosecha, son esenciales para obtener una mejor calidad de la semilla expresada en una mayor viabilidad y longevidad.

CONCLUSIONES

Las aplicaciones de retardantes de crecimiento en la producción de semilla de sorgo dulce forrajero no afectaron la germinación de las semillas provenientes de los tratamientos evaluados en ambas localidades. La respuesta del comportamiento fisiológico de la semilla se determinó, en gran medida, por las condiciones ambientales de alta precipitación que predominaron durante todo el desarrollo del cultivo. Se presentaron mayores precipitaciones en etapas de madurez del grano, lo que comprometió, en forma significativa, la respuesta fisiológica de las semillas. Por lo mismo, es propicio tener en cuenta las fechas de siembra adecuadas para mitigar posibles efectos por precipitaciones altas hacia el periodo de madurez y cosecha. Finalmente, se concluyó que altas humedades en la semilla llevan a un deterioro acelerado de las mismas.

La evaluación de germinación es la prueba más representativa y con validez normativa para la comercialización de semillas. Sin embargo, la prueba de conductividad eléctrica ofrece información de la composición interna de la semilla, lo que permite tomar decisiones para el manejo en campo y el almacenamiento de estas por periodos de tiempo más prolongados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), a los Centros de Investigación Nataima, Motilonia y Tibaitatá y, en especial, a su Dirección de Vinculación y al Departamento de Semillas por su participación y financiación en el marco del proyecto “Conservación y producción de semilla y material vegetal de calidad para las Ofertas Tecnológicas corporativas de AGROSAVIA con el fin de activar procesos de escalamiento y vinculación comercial (Fase III)”.



CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Flórez-Gómez, D. F. diseñó los experimentos, participó en el montaje de las pruebas de laboratorio y en la captura de datos, realizó el análisis estadístico, interpretó los resultados, contribuyó a la redacción y en la revisión final del manuscrito. Rodríguez-Molina, J. F. participó en el montaje de las pruebas de laboratorio y captura de datos, interpretó los resultados y contribuyó a la redacción del manuscrito. Vargas-Ramírez, D. N. participó en el montaje de las pruebas de laboratorio y contribuyó a la redacción del manuscrito. Sarmiento-Moreno, L. F. participó en el montaje de las pruebas de laboratorio y contribuyó a la redacción del manuscrito. Rodríguez-Yzquierdo, G. A. interpretó los resultados y contribuyó a la redacción del manuscrito y la revisión final del mismo. Patiño-Moscoso, M. A. participó en el montaje de las pruebas de laboratorio, interpretó los resultados y contribuyó a la redacción del manuscrito y la revisión final del mismo. Osorio-Guerrero, K. V. participó en el montaje de las pruebas de laboratorio, interpretó los resultados y contribuyó a la redacción del manuscrito, ajustes y revisión final del mismo.

CONFLICTO DE INTERÉS

El manuscrito fue elaborado y revisado por todos los autores, quienes declaran la ausencia de cualquier conflicto que pueda poner en riesgo la validez de los resultados presentados.

REFERENCIAS

- [1] Getachew, G., Putnam, D. H., De Ben, C. M. y De Peters, E. J. (2016). Potencial del sorgo como alternativa al forraje de maíz. *American Journal of Plant Sciences*, 7, 1106-1121. doi: <https://doi.org/10.4236/ajps.2016.77106>
- [2] Nava, C., Rosales, R., Jiménez, R., Carrete, F., Domínguez, P. y Murillo, M. (2017). Rendimiento y valor nutricional de tres variedades de sorgo dulce cultivadas en cuatro ambientes de Durango. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 8(2). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242017000200147
- [3] Pérez, A., Quero, A., Escalante, J., Rodríguez, M., Garduño, S. y Miranda, L. (2018). Fenología, biomasa y análisis de crecimiento de cultivares de sorgo forrajero en valles altos. *Agronomía Costarricense*, 42(2), 107-117. doi: <https://doi.org/10.15517/rac.v42i2.33782>
- [4] Kamran, M., Ahmed, I., Wang, H., Wu, X., Xu, J., Liu, T., Ding, R. y Han, Q. (2018). La aplicación de cloruro de mepiquat aumenta la resistencia al acame del maíz al mejorar la resistencia física del tallo y la biosíntesis de lignina. *Investigación de cultivos extensivos*, 224, 148-159. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429018301114>
- [5] Farrás, T. (2018). Calidad de semilla: qué implica y cómo determinarla. *Plan agropecuario*, (166), 64-65. https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/180_2775.pdf
- [6] Bacarrillo, M. G. (2008). *Calidad fisiológica de semilla de sorgo Almun producida bajo diferentes niveles de fertilización*. Universidad Autónoma Agraria.
- [7] Montes, N., González, V. A. y Mendoza, L. (2016). Calidad fisiológica de la semilla de sorgo sometido a defoliación y déficit hídrico. *Agronomía Mesoamericana*, 6, 140. doi: <https://doi.org/10.15517/am.v6i0.24820>
- [8] Miller, B. (1993). La historia de las pruebas de vigor de las semillas. *Stjournal*, 17(2), 93-100. https://stjournal.org/wp-content/uploads/2015/07/92-100-ST_V17N2-1993.pdf
- [9] Le Coënt, P., Larinde, M., Guei, R., Wobil, J., Fajardo, J., Pandey, S. y Osborn, T. (2011). *Semillas en emergencias: manual técnico*. Estudio FAO producción y protección vegetal. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/29be0477-eb32-4a34-a341-9b75b5ffe577/content>
- [10] Food and Agricultural Organization. (1993). *Manual de manejo postcosecha de granos a nivel rural*. FAO. <https://www.fao.org/4/x5027s/x5027S01.htm#insectos>
- [11] Alfaro, J. L. (2010). *Evaluación de tres sistemas de almacenamiento de semilla de sorgo (Sorghum bicolor) variedad Sureño, en Zamorano* [Tesis de pregrado, Escuela Agrícola Panamericana]. Biblioteca digital Escuela Agrícola Panamericana. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/7e1a83af-65e6-4c62-a685-26604ed2dbac/content>
- [12] Erazo, A. (2004). *Deterioro de calidad física y viabilidad de semillas de maíz (Zea mays), frijol (Phaseolus vulgaris), y sorgo (Sorghum bicolor) durante su almacenamiento en Zamorano* [Tesis de pregrado, Escuela Agrícola Panamericana]. Biblioteca digital Escuela Agrícola Panamericana. <http://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2381/1/AGI-2004-T018.pdf>
- [13] López, M. (2017). *Evaluación de tres métodos de almacenamiento y su efecto en la calidad de semilla de sorgo (Sorghum bicolor) variedad Sureño*. [Tesis de pregrado, Escuela Agrícola Panamericana]. Biblioteca digital Escuela Agrícola Panamericana. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/1a258ea9-676e-4f26-983a-b962f6724a72/content>
- [14] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). *Almacenamiento y conservación de granos y semillas*. SAGARPA.
- [15] Ramos-Fernández, J., Ayala-Garay, O. J., Pérez-Grajales, M., Sánchez-del Castillo, F. y Magdaleno-Villar, J. J. (2019). Efecto del paclobutrazol sobre el crecimiento de la planta, rendimiento y calidad del fruto en tomate. *Bioagro*, 33(1), 59-64. doi: <https://doi.org/10.51372/bioagro331.8>
- [16] Carranza, C., Castellanos, G., Deaza, D. y Miranda, D. (2016). Efecto de la aplicación de reguladores de crecimiento sobre la germinación de semillas de badea (*Passiflora quadrangularis* L.) en condiciones de invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(2), 284-291. doi: <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i2.5791>

- [17] Amador, K., Díaz, J., Loza, S. y Egla, B. (2003). Efecto de diferentes reguladores de crecimiento vegetal sobre la germinación de semillas y desarrollo de plántulas de dos especies de *Ferocactus* (Cactaceae). *Journal of Hubei Agricultural College*, 23(35), 161-163. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5651148#:~:text=Se%20evalu%C3%B3%20el%20efecto%20de%20la%20adici%C3%B3n%20de,las%20especies%20Ferocactus%20histrix%20y%20F.%20latispinus%20%28Cactaceae%29>
- [18] Lluna, R. (2006). Hormonas vegetales: crecimiento y desarrollo de la planta. *Revista horticultura*, 196(2), 22-27. http://www.horticom.com/revistasonline/horticultura/rh196_2/22_27.pdf
- [19] Sánchez, B. F. (2003). Obtención de plantas ornamentales compactas, mediante la aplicación de Paclobutrazol y podas de formación En: V.G. Almaguer, L. Colinas, M. Flores, A. Mora, L. Vidal, R. González, S. Ayala y M. Mejía (Eds.), *X Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas, IX Congreso Nacional y II Internacional de Horticultura Ornamental*.
- [20] De Souza, L. T., Espíndula, M. C., Rocha, V. S., Dias, D. C. F. dos S. y de Souza, M. A. (2010). Growth retardants in wheat and its effect in physiological quality of seeds. *Ciencia Rural*, 40(6), 1431-1434. doi: <https://doi.org/10.1590/s0103-84782010000600031>
- [21] Espinoza, G., Ramos, F., Coronado, M., Flores, R., Veleche, J., Aguirre, I., Camey, O., Montepeque, R., Sanchez, L., Javier, A., López, A., Escobar, G., Fajardo, P., Duarte, R., Arevalo, M. y Santos, R. (2020). *Efectividad de trinexapac etil 25 ec + boro 17% (b2o3) en el incremento de azúcar aplicado como madurante en caña de azúcar (Saccharum spp.)*. CENGICANA: Memorias presentación resultados de investigación ZAFRA 2019-2020. <https://cengicana.org/files/202007231146463.pdf>
- [22] Costa-Silva, E., Torquato-Tavares, A., Alves-Ferreira, T., Reyes, Pascual-Reyes, I., Guimarães-Alves, F. y Nascimento, Ildon. (2020). Dosis y número de aplicaciones de etefón en la reversión sexual de flores de calabacita. *Revista Chapingo, Serie horticultura*, 26(1), 5-14. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2019.06.011>
- [23] Corporación colombiana de investigación agropecuaria. (2020). *Sorgo dulce para forraje Corpoica JJT-18*. AGROSAVIA. <https://www.agrosavia.co/productos-y-servicios/oferta-tecnol%C3%B3gica/l%C3%ADnea-pecuaria/ganader%C3%ADa-y-especies-menores/material-reproductivo-vegetal-semillas/302-sorgo-dulce-corpoica-jjt-18>
- [24] Bernal, J. H., Rincón, A., Guevara, E., Hernández, R. y Flórez, H. (2014). Sorgo forrajero Corpoica JJT-18: boletín técnico. CORPOICA. https://www.researchgate.net/publication/322809434_Sorgo_forrajero_Corpoica_JJT-18
- [25] Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2013). *Resolución 4245 del 11 de octubre de 2013 "por la cual se ordena el Registro de la variedad de sorgo forrajero CORPOICA JJT-18 de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA, en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del ICA"*. Instituto Colombiano Agropecuario.
- [26] Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Riego y Drenaje*, 56. https://www.researchgate.net/publication/312841499_Evapotranspiracion_del_cultivo_Guias_para_la_determinacion_de_los_requerimientos_de_agua_de_los_cultivos
- [27] International Seed Testing Association [ISTA]. (2018). *Introducción a las reglas de ISTA*. Asociación Internacional de Pruebas de Semillas.
- [28] Copeland, L. O. y McDonald, M. (2001). *Principles of Seed Science and Technology*. Springer US. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1619-4>
- [29] Valadez-Gutiérrez, J., Mendoza-Onofre, L. E., Córdova-Télez, L., Vaquera-Huerta, H., Mendoza-Castillo, M. del C. y García-de los Santos, G. (2007). Tamaños de semilla, sustancias vigorizantes y pruebas de vigor en sorgos tolerantes al frío. *Agrociencia*, 41(2), 169-179. https://www.researchgate.net/publication/242580120_TAMANOS_DE_SEMILLA_SUBSTANCIAS_VIGORIZANTES_Y_PRUEBAS_DE_VIGOR_EN_SORGOS_TOLERANTES_AL_FRIO_SEED_SIZES_INVIGORIZATION_SUBSTANCES_AND_VIGOR_TESTS_IN_COLD_TOLERANT_SORGHUMS
- [30] Barros, S., Silva, M. A., Soares, I. M. y Queiróz, M. A. (1999). Correlação entre testes de vigor em sementes de maxixe. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 34(6), 1075-1080. doi: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x1999000600020>
- [31] R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- [32] Hussen, A. (2021). Impacto del método de almacenamiento de granos en la calidad del grano de sorgo en Etiopía: una revisión. *Journal of Current Research in Food Science*, 2(1), 40-45. <https://www.foodresearchjournal.com/>

- [33] Pecina-Becerril, A., Yáñez-López, R., Quijano-Carranza, J. A., Bujanos-Muñiz, R., Andrio-Enriquez, E. y Pecina-Quintero, V. (2021). Producción y calidad de la semilla de sorgo en el Centro de México bajo polinización controlada. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(1), e2079. doi: https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2079
- [34] Egli, D. B. (2017). *Seed Biology and Yield of Grain Crops*. CABI Books. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/book/10.1079/9781780647708.0000>
- [35] Bueno, G., Cordovés, M. y Delgado, G. (2009). Sorgo dulce: sus potencialidades productivas. *Revista ICIDCA. Sobre sus derivados de la caña de azúcar*, 43(3), 15-21. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120660003.pdf>
- [36] Oliveira, K. R., Sampaio, F. R., Siqueira, G. S., Galvão, Í. M., Bennett, S. J., Gratão, P. L. y Barbosa, R. M. (2021). Physiological quality of soybean seeds grown under different low altitude field environments and storage time. *Plant, Soil and Environment*, 67, 92-98. doi: <https://doi.org/10.17221/512/2020-PSE>
- [37] Instituto Colombiano Agropecuario. (2015). *Resolución No. 003168 del 07 de septiembre de 2015 "Por medio de la cual se reglamenta y controla la producción, importación y exportación de semillas producto del mejoramiento genético para la comercialización y siembra en el país, así como el registro de las unidades de evaluación agronómica y/o unidades de investigación en fitomejoramiento y se dictan otras disposiciones"*. ICA. <https://www.ica.gov.co/getattachment/4e8c3698-8fcb-4e42-80e7-a6c7acde9bf8/2015R3168.aspx>
- [38] Olawamide, D. O., Fayeun, L. S. y Abubakar, S. K. (2020). Effect of Time of Harvest on Seed Quality and Carbohydrate Content of Grain Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] in the Rainforest Agro-Ecology of Nigeria. *Nigerian Journal of Seed Science*, 4(2), 32-43. <https://www.researchgate.net/publication/349251312>
- [39] Ratnavathi, C. V. y Komala, V. V. (2016). Sorghum Grain Quality. *Sorghum Biochemistry: An Industrial Perspective*, pp. 1-61. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803157-5.00001-0>
- [40] Ochieng L. A., Mathenge P. W. y R, Muasya. (2013). Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] seed quality as affected by variety, harvesting stage and fertilizer application in Bomet County of Kenya. *Afric. J. of Food, Agric., Nutri. and Dev.* 13(4), 7905-7926. [https://www.semanticscholar.org/paper/Sorghum-%5BSorghum-bicolor-\(L.\)-Moench%5D-seed-quality-Ochieng-Mathenge/0cfce4c41481ae8374b7eb5479506c444df9790a](https://www.semanticscholar.org/paper/Sorghum-%5BSorghum-bicolor-(L.)-Moench%5D-seed-quality-Ochieng-Mathenge/0cfce4c41481ae8374b7eb5479506c444df9790a)
- [41] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). *Materiales para capacitación en semillas*. FAO
- [42] Salazar, S. A., y Delgado, E. A. B. (2018). Viabilidad de semillas de *Glycine max* (L.) utilizando la prueba de tetrazolío. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), 89-98. https://www.researchgate.net/publication/326927376_Viabilidad_de_semillas_de_Glycine_max_L_Utilizando_la_prueba_de_tetrazolío
- [43] Carvajal, C., Márquez, M., Gutiérrez, B., González, V. A., Arellano, J. y Ávila, M. (2017). Aspectos de fisiología, deterioro y calidad en semilla de soya. *Revista Alcance*, 73, 76-92.
- [44] Navarro, M., Febles, G., & Herrera, R. S. (2015). Vigor: essential element for seed quality. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 49(4), 447-458. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193045908003.pdf>
- [45] Krzyzanowski, F. C., França-Neto, J. de B. y Dias, D. C. F. dos S. (2022). *Deterioración y vigor de la semilla*. Londrina PR: Embrapa Circular técnica 191.
- [46] Marcos-Filho, J. (2015). *Fisiología de semillas de plantas cultivadas*. Londrina: ABRATES.
- [47] Delouche, J. C. y Baskin, C. (1973). Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seed lots. *Seed Science and Technology*, 1, 427-552. <https://www.semanticscholar.org/paper/Accelerated-Aging-Techniques-for-Predicting-the-of-Delouche-Baskin/9f445224edda6941fcfc0a65e1710c50e7de2e>
- [48] Ellis, R. y Yadav, G. (2016). El efecto de la lluvia simulada durante el desarrollo y maduración de la semilla de trigo en la longevidad de la semilla posterior es reversible. *Seed Science Research*, 26(1), 67-76. doi: <https://doi.org/10.1017/S0960258515000392>
- [49] Msongaleli, B. M., Tumbo, S. D., Kihupi, N. I., y Rwehumbiza, F. B. (2017). Desempeño de variedades de sorgo bajo lluvias variables en Tanzania central. *International Scholarly Research Notices*, 2017, 2506946. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/2506946>