

Impacto de la Fertilización Orgánica y Mineral en la Actividad Reductasa de tres Variedades de Frijol Pinto Impact of Organic and Mineral Fertilization on the Reductase Activity of Three Pinto Bean Varieties

Ana Rosa Sánchez-Camarillo¹, Myrna Solís-Oba^{1†}, Rubria Marlen Martínez-Casares²,
Aida Solís-Oba², Rigoberto Castro-Rivera¹ y Liliana Hernández-Vázquez²

¹ Instituto Politécnico Nacional; Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla km 1.5, Ex hacienda San Juan Molino. 90700, Tepetitla de Lardizabal, Tlaxcala, México; (A.R.S.C.), (M.S.O.), (R.C.R.).

[†] Autora para correspondencia: myrnasolis_ipn@yahoo.com

² Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud. 04960 Coyoacán, CDMX, México; (R.M.M.C.), (A.S.O.), (L.H.V.).

RESUMEN

Las enzimas son moléculas que catalizan reacciones químicas, en las plantas participan en diferentes procesos para el desarrollo y la defensa contra el estrés biótico y abiótico. En la química verde se han estudiado microorganismos, semillas y plantas como biocatalizadores para obtener productos amigables con el ambiente. Se evaluó el efecto de la fertilización orgánica y mineral en la actividad reductasa de semillas de tres variedades de frijol pinto, San Rafael (SR), Libertad (Lib) y Vaquita (Vaq); la evaluación se efectuó en tres ciclos de cultivo a nivel invernadero, se consideraron tres dosis de fertilizante orgánico (extracto de sargazo comercial), tres dosis de fertilizante mineral y las combinaciones de ambos; se comparó con un testigo sin fertilizar. La actividad reductasa se midió cuantificando en HPLC la producción de hidroximetil benceno mediante la reducción de benzaldehído usando las semillas como fuente de catalizadores. Se encontró que la actividad biocatalítica fue SR>Lib>Vaq; al incrementar la fertilización orgánica incrementó la actividad reductasa, mientras que con la fertilización mineral no se observó efecto. En el segundo ciclo de cultivo hubo estrés biótico por una plaga de araña roja, ocasionando un incremento en la actividad biocatalítica en las tres variedades. Las semillas obtenidas de cultivos fertilizados con extracto de sargazo son una buena fuente de reductasas.

Palabras clave: alcohol bencílico, biocatálisis, enzimas, sargazo.

SUMMARY

Enzymes are molecules that catalyze chemical reactions; in plants, they participate in various processes related to development and defense against biotic and abiotic stress. In green chemistry, microorganisms, seeds, and plants have been studied as biocatalysts to obtain environmentally friendly products. The effect of organic and mineral fertilization on the seed reductase activity of three pinto bean varieties, San Rafael (SR), Libertad (Lib), and Vaquita (Vaq), was evaluated. The evaluation was carried out over three crop cycles under greenhouse conditions. Three doses of organic fertilizer (a commercial sargassum extract), three doses of mineral fertilizer, and combinations of both were considered, along with an unfertilized control. Reductase activity was measured using HPLC by quantifying the production of hydroxymethylbenzene through the reduction of benzaldehyde, with the seeds serving as the reductase source. Biocatalytic activity followed the order SR > Lib > Vaq. Enzymatic activity increased with higher doses of organic fertilization, whereas



Cita recomendada:

Sánchez-Camarillo, A. R., Solís-Oba, M., Martínez-Casares, R. M., Solís-Oba, A., Castro-Rivera, R., & Hernández-Vázquez, L. (2025). Impacto de la Fertilización Orgánica y Mineral en la Actividad Reductasa de tres Variedades de Frijol Pinto. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-10. e2213. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2213>

Recibido: 16 de enero de 2025.

Aceptado: 14 de septiembre de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Octubre de 2025.

Editor de Sección:

Dra. Alejandra Nieto Garibay

Editor Técnico:

Dr. Fermín Pascual Ramírez



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

mineral fertilization had no significant effect. In the second crop cycle, biotic stress caused by a red spider mite infestation resulted in increased biocatalytic activity in all three varieties. Seeds obtained from crops fertilized with sargassum extract are a good source of reductases.

Index words: benzil alcohol, biocatalysis, enzymes, seaweed

INTRODUCCIÓN

Actualmente se han incrementado los estudios en la química verde, donde se busca la obtención de productos mediante procesos ambientalmente amigables. En estos procesos, se han utilizado como catalizadores células de microorganismos (bacterias, virus, hongos), algas y más recientemente plantas (Demmel *et al.*, 2021). Entre las ventajas del uso de estos biocatalizadores están que las reacciones ocurren en medios acuosos, a temperaturas moderadas y presión atmosférica, los subproductos de estas reacciones son biodegradables, se evitan las etapas de purificación enzimática, se pueden aprovechar materiales como son algunos residuos vegetales; se reducen los consumos energéticos y las emisiones contaminantes, así como los requerimientos de catalizadores metálicos (Solís *et al.*, 2019). Entre las plantas y semillas que se han evaluado como biocatalizadores están: cáscaras de naranja, mango y papaya como fuente de lipasas; residuos de uva como fuente de quitinasas (Okino-Delgado, Prado y Fleuri, 2018); semillas de capulín, mamey, pimiento verde, chile, aguacate y frijol, vainas de frijol, nabo, haba, alubia y jinicuil, la cáscara de la papaya y la hoja de cebollino como fuente de reductasas (Solís-Oba, 2017; Solís *et al.*, 2019); extracto de sargazo (Sánchez-Camarillo, Solís, Solís, Martínez y Castro, 2025).

Las reductasas son una clase de enzimas, se encuentran ampliamente distribuidas en las plantas, se han reportado en *Prunus persica*, *Arabidopsis thaliana*, *Glycyrrhiza glabra*, *Apium graveolens*, *Zea mays*, *Avena fatua*, *Vigna radiata* (Sengupta, Naik y Reddy, 2015), *Daucus carota*, *Lens culinaris* y diferentes variedades de frijoles (*Phaseolus vulgaris* L.) (Solís *et al.*, 2019) *Prunus pérsica* y *Xerophyta viscosa* (Kanayama *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2013); en tabaco (Huo *et al.*, 2018) y *Ximenia american* (Carvalho *et al.*, 2018). Las reductasas desempeñan funciones importantes en la fotosíntesis, crecimiento, desarrollo y defensa de las plantas ante estrés biótico y abiótico, actúan en la detoxificación de aldehídos citotóxicos, reduciendo el daño oxidativo, incrementando el desarrollo de las plantas y su supervivencia bajo condiciones de estrés (Sengupta *et al.*, 2015; Yu *et al.*, 2020). Otras ventajas adicionales que ofrecen este tipo de enzimas son su alta estereoselectividad, regio y enantioselectividad (Russo, Luján, Fraaije y Poelarends, 2024), lo cual es de suma importancia en industrias como la farmacéutica y de cosméticos. Al mismo tiempo reducen el número de pasos críticos en la producción de muchos compuestos difíciles de sintetizar por métodos tradicionales; además, ofrecen una alternativa sostenible minimizando el impacto ambiental, mejorando la eficiencia (Russo *et al.*, 2024). Las reductasas se han utilizado como biocatalizadores en la síntesis de diversos fármacos (Sheldon, 2024).

Una aplicación de las reductasas es en la biorreducción de aldehídos o cetonas para la preparación de alcoholes; éstos son de gran utilidad en síntesis orgánica, así como en la industria química, cosmética y agroquímica (Zhang *et al.*, 2024). Por ejemplo, el alcohol bencílico es un compuesto muy importante a nivel industrial, se emplea en las industrias químicas de cosméticos, farmacéutica y alimentaria. La producción industrial del alcohol bencílico se realiza mediante la hidrogenación del benzaldehído; este proceso se lleva a cabo con catalizadores u óxidos metálicos (Bhanushali, Kainthla, Keri y Mallana, 2016); en este proceso se producen subproductos tóxicos y la disposición de los disolventes y los catalizadores es un problema ambiental. Como alternativa, la reacción de transformación de benzaldehído a alcohol bencílico catalizada por semillas se ha estudiado por diversos autores, como Demmel *et al.* (2021) quienes evaluaron la reacción biocatalizada por las semillas de *Bauhinia variegata* L. y Solís *et al.* (2019), quienes estudiaron el potencial de semillas de frijol pinto, flor de mayo, ayocote, negro y bayo para la obtención del alcohol bencílico mediante la bioreducción de benzaldehído, con porcentajes de conversión mayores al 90 por ciento.

Si bien hay reportes donde han evaluado el uso de diversos materiales vegetales como fuentes de biocatalizadores, hay escasos reportes donde se haya evaluado cómo influye la fertilización en la producción y actividad enzimática. El objetivo del presente trabajo fue evaluar si la fertilización orgánica, mineral u orgánica-mineral, en tres ciclos de cultivo de tres variedades de frijol, tiene efecto en la producción de reductasas para la obtención de hidroximetil benceno (alcohol bencílico) mediante la reducción catalizada del fenilmetanal (benzaldehído).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Las semillas de frijol utilizadas fueron tres variedades de frijol pinto: San Rafael (INIFAP-Durango), Libertad (INIFAP-Guanajuato) y Vaquita (frijol comercial nativo de Tlaxcala).

Los fertilizantes orgánicos usados fueron Algaenzims y Maxximus y la fertilización mineral fue con urea (UR) y superfosfato triple de calcio (STC).

Cultivo de Frijol

Los cultivos se llevaron a cabo en el Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional ubicado en Tlaxcala, México, en las coordenadas a 19° 16' 54.5" N, 98° 21' 57.8" O, y a una altitud de 2260 m. Los cultivos se hicieron en 3 ciclos de abril a agosto de 2021, 2022 y 2023 en un invernadero, tipo cenital, con paredes de polietileno calibre 800, con dimensiones de 12 m × 9 m. Las semillas se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 5%, se enjuagaron con agua destilada, se colocaron en charolas de germinación y a los 7 días se trasplantaron a macetas conteniendo 4 kg de suelo. Las propiedades del suelo empleado fueron: pH = 7.7, el contenido de materia orgánica fue de 3.68%, 142 mg kg⁻¹ de N-NO₃, 46.5 mg kg⁻¹ de P y 2132 mg kg⁻¹ de K, y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue de 18.8 meq 100⁻¹ g. Los análisis del suelo se realizaron en la empresa Fertilab. Las macetas se distribuyeron a una densidad de 6 macetas por metro cuadrado.

Se estableció un diseño factorial 3×3×3, donde se utilizaron 3 variedades de frijol (San Rafael, Libertad y Vaquita); 3 concentraciones de fertilizante orgánico con base en sargazo (S1, S2 y S3), de acuerdo con las especificaciones del producto; 3 dosis de fertilizante mineral (M1, M2 y M3) y las combinaciones de fertilizante orgánico-mineral (S1M1, S1M2, S1M3, S2M1, S2M2, S2M3, S3M1, S3M2 y S3M3), el Cuadro 1 muestra las cantidades de fertilizante aplicadas y la aportación de N y P con cada fertilización. Como controles se estableció un testigo sin fertilizar, se consideraron 4 repeticiones por tratamiento. En los ciclos 2021 y 2022 la fertilización orgánica se hizo con Algaenzims con una sola aplicación a los 45 días después del trasplante. En el ciclo 2023 la fertilización orgánica fue con Maxximus con aplicación a la siembra y en prefloración. En todos los casos la aplicación de fertilizante inorgánico fue en una sola ocasión al inicio del ciclo de cultivo. Al final del ciclo de cultivo se cosecharon las semillas para evaluar su actividad biocatalítica mediante la conversión de benzaldehído en alcohol bencílico.

Cuadro 1. Fertilizaciones empleadas para el cultivo de frijol en cada tratamiento y cantidad de N y P aportada.
Table 1. Fertilizers used for the bean crop in each treatment, and N and P amount added.

Tratamiento	Fertilización orgánica			Fertilización mineral			Total	
	FO mililitros	N mg	P mg	UR/STC g kg ⁻¹	N mg	P mg	N	P
C-	0	0	0	0	0	0	0	0
M1	0	0	0	0.950/1.357	437.0	624.2	437.0	624.2
M2	0	0	0	1.075/1.487	494.5	684.0	494.5	684.0
M3	0	0	0	1.212/1.625	557.5	747.5	557.5	747.5
S1	0.33	4.7	4.8	0	0	0	4.7	4.8
S2	0.66	9.5	9.7	0	0	0	9.57	9.7
S3	1.00	14.5	14.8	0	0	0	14.5	14.8
S1/M1	0.33	4.7	4.8	0.950/1.357	437.0	624.2	441.7	629.1
S1/M2	0.33	4.7	4.8	1.075/1.487	494.5	684.0	499.2	688.9
S1/M3	0.33	4.7	4.8	1.212/1.625	557.5	747.5	562.3	752.3
S2/M1	0.66	9.5	9.7	0.950/1.357	437.0	624.2	446.5	633.9
S2/M2	0.66	9.5	9.7	1.075/1.487	494.5	684.0	504.0	693.7
S2/M3	0.66	9.5	9.7	1.212/1.625	557.5	747.5	567.0	757.2
S3/M1	1.00	14.5	14.8	0.950/1.357	437.0	624.2	451.5	639.0
S3/M2	1.00	14.5	14.8	1.075/1.487	494.5	684.0	509.0	698.8
S3/M3	1.00	14.5	14.8	1.212/1.625	557.5	747.5	572.0	762.3

Actividad Biocatalítica

Las semillas de frijol cosechadas se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio al 5%, se enjuagaron con agua destilada, se dejaron secar, posteriormente se pulverizaron en un molino para café modelo 80374 (Hamilton beach®, EUA); se tamizaron con malla #20, el polvo (3 g) se mezcló con solución buffer HEPES (12 ml, 0.15 M, pH 8.1) la mezcla se agitó por 1 h, se centrifugó a 5000 rpm, por 15 min a 5 °C (Eppendorf ThermoMixer®C, Alemania) los sobrenadantes (extracto acuoso) se utilizaron como fuente de enzima.

A 1 ml del extracto acuoso de semillas de frijol se agregaron 1.5 µl de benzaldehído disuelto en 48.5 µl de isopropanol, se agitó mecánicamente a 25 °C en incubadora SI-1200 (Enviro Genie®, EUA) transcurridas 19 h se extrajo con éter etílico (2 × 0.5 ml) se centrifugó a 13000 rpm/5 °C/5min (Eppendorf ThermoMixer®C, Alemania), se secó con sulfato de sodio anhidro (Na₂SO₄) y finalmente el % de conversión de benzaldehído a alcohol bencílico (Figura 1) se determinó por cromatografía de gases (CG). Los experimentos se realizaron por triplicado.

Para la determinación del % de conversión: Se usó un cromatógrafo de gases HP 6890 (Agilent®, EUA), equipado con una columna HP-5 (30 m × 0.25 mm, 0.25 µm), se utilizó como gas acarreador N₂, temperatura del inyector y detector a 250 °C, temperatura del horno 130 °C y velocidad de flujo de 0.8 ml min⁻¹. (Solís-Oba *et al.*, 2017).

En el segundo ciclo de cultivo se observó una plaga de araña roja, por lo que se aplicó a todas las plantas una solución de jabón al 2% cada tercer día durante dos semanas. En los otros dos ciclos no hubo presencia de ninguna plaga.

Análisis Estadístico

Los resultados se analizaron mediante análisis de Anova y Tukey ($p < 0.05$) para determinar el efecto entre las fertilizaciones y se hizo un análisis factorial. Se utilizó el software JMP versión 13 (SAS Institute Inc, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primer ciclo de Cultivo

Las Figuras 2a, 2b y 2c muestran el % de conversión de benzaldehído a alcohol bencílico con las semillas de frijol obtenidas del ciclo 2021 para las tres variedades de frijol, las Figuras 3a, 3b y 3c corresponden al ciclo 2022 y las Figuras 4a, 4b y 4c a las del ciclo 2023. Se observa que hubo un efecto diferente para cada variedad y para cada ciclo de cultivo. Hubo tratamientos donde se obtuvo mayor actividad biocatalítica que en el testigo sin fertilizar y con la fertilización mineral.

De la Figura 2 se observa que con las semillas de San Rafael (SR) hubo mayor actividad biocatalítica comparada con Libertad (Lib) y Vaquita (Vaq). Además, se observa que el % de conversión de benzaldehído a alcohol bencílico con las semillas de frijol San Rafael obtuvo los valores más altos aplicando el nivel más alto de fertilizante orgánico (S3) con o sin la adición de fertilizante mineral, en todos se obtuvo un porcentaje mayor al 95%, estos superaron en 9 al 11% al tratamiento con la mayor cantidad de fertilizante mineral (M3) y en 41 al 43% al testigo sin fertilizar (T). También se observa que en los tratamientos donde sólo se aplicó S o M, la biocatálisis incrementó al aumentar la fertilización (M3>M2>M1 y S3>S2>S1).

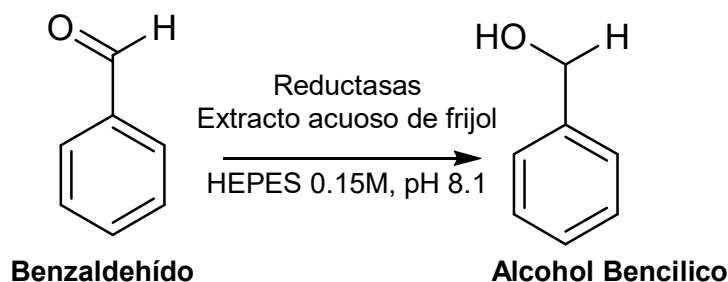


Figura 1. Reacción de reducción de benzaldehído a alcohol bencílico.
Figure 1. Benzaldehyde to benzyl alcohol reduction reaction.

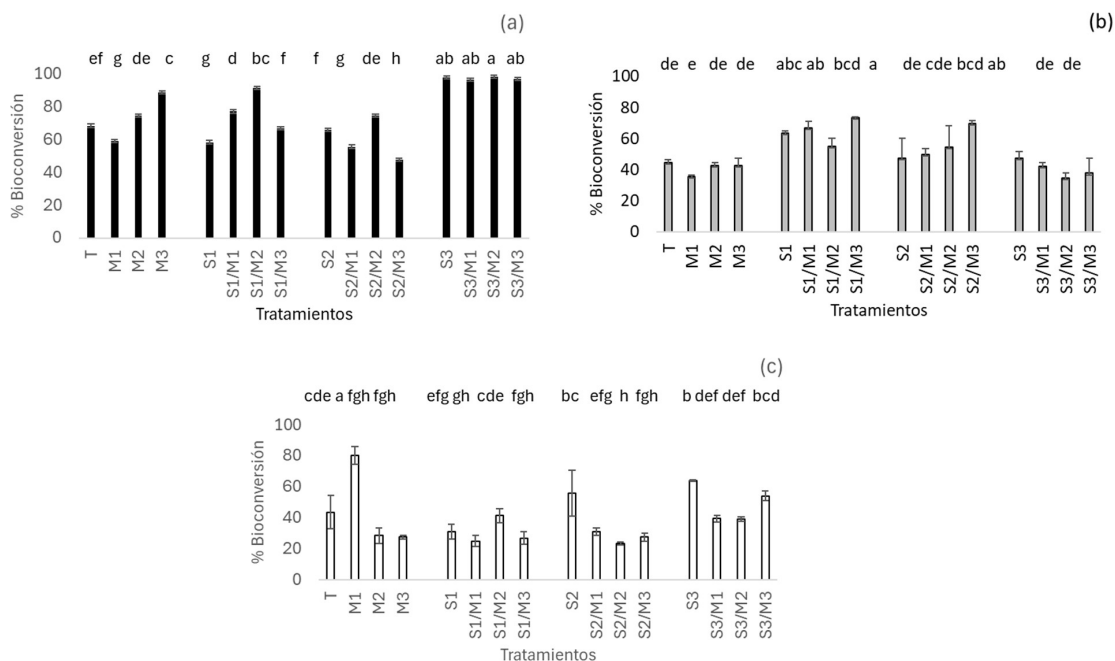


Figura 2. Porcentaje de bioconversión de benzaldehído a alcohol bencilico utilizando semillas del ciclo 2021: San Rafael (a), Libertad (b) y Vaquita (c). Las barras representan la desviación estándar para n=3, las etiquetas sobre las columnas indican análisis Tukey ($p < 0.05$).

Figure 2. Percentage of benzaldehyde to benzyl alcohol bioconversion using seeds from cycle 2021: San Rafael (a), Libertad (b), and Vaquita (c). Bars represent the standard deviation n=3, letters over means the Tukey ($p < 0.05$).

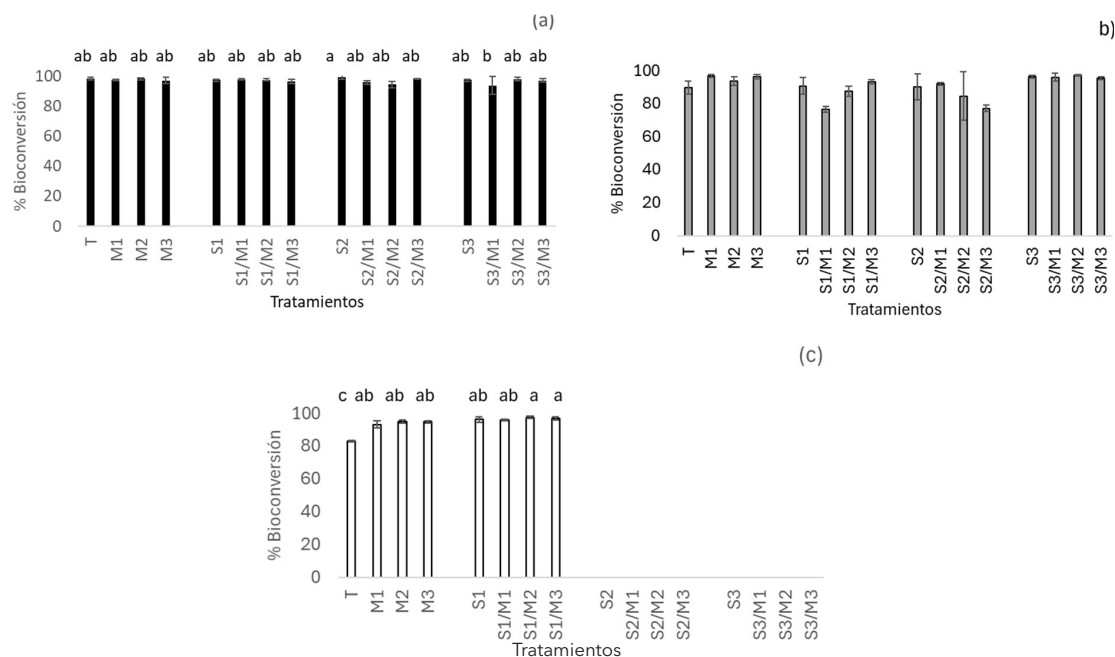


Figura 3. Porcentaje de bioconversión de benzaldehído a alcohol bencilico utilizando semillas del ciclo 2022: San Rafael (a), Libertad (b) y Vaquita (c). Las barras representan la desviación estándar para n=3, las etiquetas sobre las columnas indican análisis Tukey ($p < 0.05$).

Figure 3. Percentage bioconversion of benzaldehyde to benzyl alcohol using seeds from the 2022 cycle: San Rafael (a), Libertad (b), and Vaquita (c). The bars represent the standard deviation for n = 3; the labels above the columns indicate Tukey analysis ($p < 0.05$).

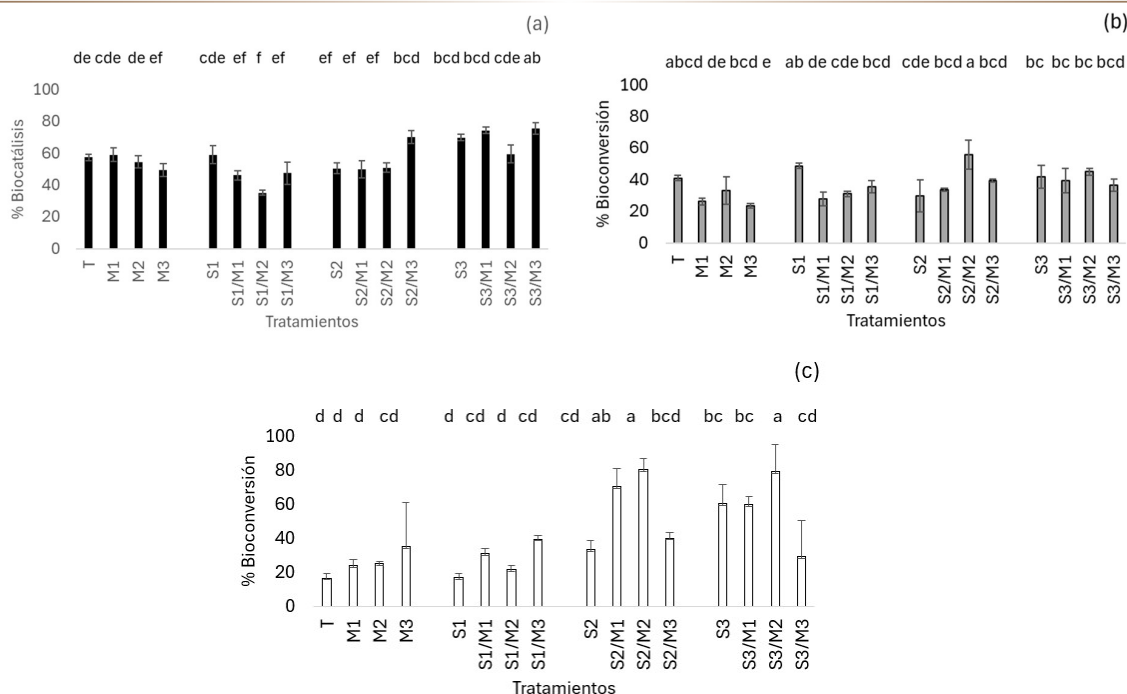


Figura 4. Porcentaje de bioconversión de benzaldehído a alcohol bencílico utilizando semillas del ciclo 2023: San Rafael (a), Libertad (b) y Vaquita (c). Las barras representan la desviación estándar para $n=3$, las etiquetas sobre las columnas indican análisis Tukey ($p < 0.05$).

Figure 4. Percentage bioconversion of benzaldehyde to benzyl alcohol using seeds from the 2023 cycle: San Rafael (a), Libertad (b), and Vaquita (c). The bars represent the standard deviation for $n = 3$; the labels above the columns indicate Tukey analysis ($p < 0.05$).

Para Libertad (Figura 2b), las mayores actividades biocatalíticas se presentaron en las fertilizaciones con el nivel bajo de sargazo (S1), con o sin la adición de fertilizante mineral, así como en S2/M2 y S2/M3; todos estos fueron entre el 22 y el 64% mayores que T y entre el 22 y 78% mayores que M3. La fertilización con los niveles altos de sargazo (S3) no fue tan benéfica como con S1 y S2. Con M1 se obtuvieron valores menores que T.

En el caso de vaquita, la actividad biocatalítica más alta se obtuvo con M1, S2 y S3, estas fueron 84, 28 y 46% mayores que T respectivamente y 190, 101 y 131 mayores que M3 respectivamente. En general, las fertilizaciones con S3 con o sin la adición de M fueron mayores que con S1 y S2. Con las dosis media y alta de M (M2 y M3) se obtuvieron menores actividades biocatalíticas que con T. En la fertilización únicamente con sargazo, incrementó la actividad biocatalítica al incrementar la concentración de dicho fertilizante (S3>S2>S1). Con M2 y M3 se obtuvieron valores menores a T.

Segundo Ciclo de Cultivo

En el segundo ciclo de cultivo se presentó una plaga de araña roja que afectó principalmente a Vaquita, ya que las plantas donde se aplicó la fertilización con S2 y S3 con y sin M no tuvieron frutos, ya que por la plaga se abortaron las flores. Comparando las respectivas gráficas por variedad en los 3 ciclos, se observa que en el ciclo 2 se obtuvieron mayores actividades enzimáticas.

En el caso de San Rafael no hubo diferencias estadísticas entre tratamientos. En Libertad solo en los tratamientos S1/M1 y S2/M3 se reportaron menores porcentajes de biocatálisis, los demás fueron estadísticamente iguales al testigo y a las fertilizaciones minerales. En Vaquita solo el testigo mostró menores actividades biocatalíticas que los demás, quienes fueron estadísticamente iguales entre sí.

La araña roja (*Tetranychus urticae*) es considerada de las plagas más importantes, afecta a más de 150 especies vegetales, entre ellos al frijol, provoca colapso y muerte celular, produce manchas cloróticas en las hojas y disminuye la tasa de transpiración y la actividad fotosintética de la planta, se ha reportado que esta plaga daña frutos, con lo cual reduce su valor comercial y genera importantes pérdidas económicas (Farouk y Osman, 2011; Descamps, Quinet, Baijot, Jacquemart, 2018). Durante el ciclo 2022 se observó que, para las tres variedades evaluadas, fue mayor la actividad reductasa que en 2021 y 2023; este efecto puede estar asociado precisamente a la presencia de dicha plaga. Las plantas están expuestas a una variedad de situaciones de estrés

biótico y abiótico, por lo cual han desarrollado varios mecanismos, incluyendo la producción de enzimas como respuesta al estrés. Por ejemplo, se ha observado que la inducción de la resistencia de las plantas a patógenos se ha asociado con algunas enzimas, como la β -1,3-glucanasa, fenilalanina amonililasa, peroxidasa, chitinasa, quitosanasa y polifenol oxidasa (Appu, Ramalingam, Sathiyarayanan y Huang, 2021). Las reductasas participan ante situaciones de estrés biótico y abiótico mediante diferentes mecanismos; la detoxificación de aldehídos y especies reactivas de oxígeno, interacciones planta-microbio y la adquisición de Fe del suelo (Oliveira et al., 2016; Guan, Yu y Wang, 2023); lo que permite asociar un aumento de reductasas con la presencia de factores de estrés biótico, como en este caso asociados a la plaga de araña.

Tercer Ciclo de Cultivo

En el tercer ciclo hubo diferencias entre los tratamientos. Para San Rafael los mayores valores los mostraron S3/M1, S3/M3, S2/M3 y S3; estos superaron entre el 22 y el 31% a T y entre el 41 y el 52% a M3. En general, la actividad fue mayor aplicando S3 con o sin la combinación con fertilizante mineral que con S1 o S2, al igual que se observó en el ciclo 1. Con M2 y M3 se obtuvieron valores menores a T. En Libertad los valores mayores de actividad se encontraron en S1 y S2/M2, estos fueron 18 y 36% mayores que T respectivamente y 108 y 139 mayores que M3 respectivamente; en general, el efecto fue similar a San Rafael, donde se aplicó S3 con y sin mineral mostraron entre los valores más altos que donde se empleó S1 o S2. Con M1 y M3 se obtuvieron valores menores a T. Para Vaquita el comportamiento fue diferente, con T se obtuvieron los valores más bajos, los mayores fueron S2/M1, S2/M2, S3, S3/M1 y S3/M2; estos superaron entre el 263 y el 383% a T y entre el 69 y el 127 % a M3.

El Cuadro 2 muestra el análisis factorial de la actividad biocatalítica en los 3 ciclos de cultivo. Se observa que la variedad influyó de manera importante, de tal forma que la mayor actividad se presentó en las semillas de frijol San Rafael en los tres ciclos de cultivo; mientras que la actividad en Lib fue mayor que en Vaq en 2021 y en Vaq fue mayor que en Lib en el ciclo 2023. El % de biocatálisis promedio que se cuantificó en las semillas de San Rafael fue del 77%, para Lib el promedio fue de 59.5% y para Vaq fue de 58.5 por ciento.

Cuadro 2. Análisis factorial de la biocatálisis de semillas de frijol San Rafael, Libertad y Vaquita con diferentes fertilizaciones
Table 2. Factorial analysis of the biocatalysis of San Rafael, Libertad and Vaquita bean seeds with different fertilizations

Factor		2021	2022	2023	Promedios
Variedad	Vaq	40.1 Bc	94.3 Ab	41.2 Bb	58.5
	Lib	50.5 Bb	91 Ac	37 Cc	59.5
	SR	76.3 Ba	97 Aa	58.9 Ca	77.4
Fertilización Orgánica	S0	53.1 Bc	94.6 Aa	39.7 Cc	62.5
	S1	56.5 Bc	93.8 Aa	36.7 Cc	62.3
	S2	50.3 Bd	91.6 Aa	50.4 Bb	64.1
	S3	62.5 Ba	94.4 Aa	56 Ca	71
Fertilización Mineral	M0	57.4 Ba	93.9 Aa	46.4 Ca	65.9
	M1	55 Ba	93.7 Aa	45.2 Ca	64.6
	M2	55 Ba	94.4 Aa	47.7 Ca	65.7
	M3	55.1 Ba	94.4 Aa	43.6 Ca	64.4
Promedios		55.6	93.9	45.7	-
Interacciones	Variedad	***	***	***	-
	Orgánico	***	NS	***	-
	Mineral	NS	NS	NS	-
	V*O	***	***	***	-
	V*M	***	NS	***	-
	O*M	***	***	***	-
	V*O*M	***	***	***	-

Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencia estadística en renglones, letras minúsculas iguales indican que no hay diferencia estadística en columnas ($p < 0.05$). NS indica que no es significativo y *** indica que el factor es altamente significativo ($p < 0.05$)

Equal capital letters indicate no statistical difference across rows; equal lowercase letters indicate no statistical difference across columns ($p < 0.05$). NS indicates not significant, and *** indicates highly significant ($p < 0.05$).

La tasa de conversión de benzaldehído a alcohol bencílico usando semillas como fuente de enzimas se ha reportado por otros autores. Solís-Oba *et al.* (2017) informaron que con las semillas de capulín y mamey alcanzaron 86 y 77% de conversión respectivamente. Carvalho *et al.* (2018) reportaron una conversión >99% con granos de *Ximania americana*; Demmel *et al.* (2021) encontraron que las semillas de *Bauhinia variegata* L. catalizaron la producción de alcohol bencílico en un 95% de conversión. Solís *et al.*, (2019) indicaron que el porcentaje de conversión fue diferente dependiendo de las semillas utilizadas, para las semillas de frijoles pinto, flor de mayo, bayo y negro, el porcentaje de conversión fue 100%. Para las semillas de pasto canario fue 73%, cebada 64%, lenteja 53%, avena 51%, trigo 28%, pimienta 23%, chile papelón 17% y aguacate 14%. En el segundo ciclo se presentó mayor actividad respecto a los ciclos 2021 y 2023. La fertilización orgánica sí influyó en la actividad biocatalítica, ésta fue mayor con la dosis más alta. La fertilización mineral no tuvo efecto en la actividad, con todos los niveles se obtuvieron estadísticamente los mismos resultados.

Estos resultados concuerdan con estudios previos que indican que la actividad enzimática depende de la fertilización; sin embargo, este efecto depende del tipo de fertilizante, la especie de planta y las condiciones ambientales (Rącz *et al.*, 2021; Sharma, Gurjar, Kumar, Kumar y Dabaria, 2023). Nasar *et al.*, (2022) reportaron que la fertilización con N y Fe incrementó la actividad de las enzimas fotosintéticas, entre ellas, nitrato reductasas, nitrito reductasas y glutamato sintasas. Beyyavas, Ramazanoglu, Sakin, Cevheri y Seyrek (2023) reportaron que la aplicación con FeSO_4 incrementó significativamente la actividad de las enzimas ureasas, deshidrogenasas y catalasas. Ashwini, Potdar, Nirmalnath, Kumar y Patil (2021) encontraron una alta correlación de la actividad enzimática del suelo con la cantidad de N, P y K en un cultivo de algodón.

CONCLUSIONES

Las semillas de frijol pueden emplearse como fuente de reductasas para la bioconversión de reacciones de interés, como es la obtención de alcohol bencílico a partir de benzaldehído. La actividad reductasa fue afectada por la variedad de frijol, el ciclo de cultivo y el tipo de fertilización. El sargazo se ha utilizado como fertilizante por su alto contenido de materia orgánica y fitohormonas, asimismo, su uso incrementó la producción de enzimas reductasas. La fertilización únicamente con sargazo en su nivel más alto (S3) tuvo un efecto positivo en San Rafael y en Vaquita, en el ciclo 2021 con S3 se obtuvo 11 y 131% respectivamente mayor actividad que con la fertilización más alta de mineral (M3) y de 42 y 46% superior al testigo, respectivamente. En el ciclo 2023 estos incrementos fueron de 41 y 71% respectivamente comparado con M3. Para Libertad con el nivel más bajo se sargazo (S1) se obtuvo 49 y 108% mayor conversión que con M3 y de 42 y 18% más que con el testigo, en los ciclos 2021 y 2023 respectivamente. En general, la fertilización mineral no tuvo un incremento significativo en la actividad reductasa, como lo tuvo con la fertilización orgánica. La variedad San Rafael presentó las mayores tasas de conversión en los tres ciclos de cultivo, seguida por Libertad y Vaquita. Adicionalmente, se observó que el estrés biótico por la presencia de la araña roja, influyó de manera importante en la actividad reductasa incrementando la bioconversión de benzaldehído a alcohol bencílico en las tres variedades de frijol.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

Toda la información generada y analizada durante este estudio se incluye en la presente publicación.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses

FINANCIACIÓN

El presente Proyecto fue financiado por las Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional, mediante el proyecto SIP 20220594.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, M.S.O., y R.C.R.; metodología, A.R.S.C.; validación, A.S.O.; análisis formal, RMMC; investigación, M.M.S.O., R.M.M.C.; recursos, M.S.O.; curación de datos, R.C.R., L.H.V.; escritura: preparación del borrador original, A.R.S.C., R.M.M.C., y M.S.O.; escritura: revisión y edición, A.S.O.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado-IPN por el apoyo financiado por el proyecto SIP 20220594. Al CONAHCYT por el otorgamiento de la beca de Doctorado para la primera autora. A la Dra. Gisela Aguilar Benítez por la donación de las semillas usadas en el presente estudio.

LITERATURA CITADA

- Appu, M., Ramalingam, P., Sathiyarayanan, A., & Huang, J. (2021). An overview of plant defense-related enzymes responses to biotic stresses. *Plant Gene*, 27, 100302. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2021.100302>
- Ashwini, T. R., Potdar, M. P., Nirmalnath, J. P., Kumar, A. B. N. & Patil, P. L. (2021). Soil enzyme activity as influenced by bt cotton genotypes and optical sensor-based nitrogen management practices. *Biochemical & Cellular Archives*, 21(2), 5037-5042.
- Bhanushali, J. T., Kainthla, I., Ker, R. S., & Nagaraja, B. M. (2016). Catalytic hydrogenation of benzaldehyde for selective synthesis of benzyl alcohol: a review. *Chemistry Select*, 1(13), 3839-3853.
- Beyyavas, V., Ramazanoglu, E., Sakin, E., Cevheri, C. İ., & Seyrek, A. (2023). Responses of some soil enzymes and cotton plant to foliar application of ferrous sulfate in a calcareous alkaline soil. *Journal of Plant Nutrition*, 46(14), 3421-3434. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2205878>
- Carvalho, da S. R. A., Marques, De M. B., Frota, de F. I., Garcia, do N. P. G., Lemos, T. L. G., & Queiroz, M. F. (2018). Enzymatic chemical transformations of aldehydes, ketones, esters and alcohols using plant fragments as the only biocatalyst: *Ximenia americana* grains *Molecular Catalysis*, 445, 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2017.11.033>
- Demmel, G. I., Bordon, D. L., Vázquez, A. M., Decarlini, M. F., Díaz, P. M., Rossi, L. I., & Aimar, M. L. (2021). Whole seeds of *Bauhinia variegata* L. (Fabaceae) as an efficient biocatalyst for benzyl alcohol preparations from benzaldehydes, *Biocatalysis and Biotransformation*, 41(2), 93-107. <https://doi.org/10.1080/10242422.2021.1956910>
- Descamps, C., Quinet, M., Baijot, A., & Jacquemart, A. L. (2018). Temperature and water stress affect plant-pollinator interactions in *Borago officinalis* (Boraginaceae). *Ecology and Evolution*, 8, 3443-3456. <https://doi.org/10.1002/ece3.3914>
- Farouk, S., & Osman, M. A. (2011). The effect of plant defense elicitors on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) growth and yield in absence or presence of spider mite (*Tetranychus urticae* Koch) infestation. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 7(3), 5-22.
- Guan, X., Yu, L., & Wang, A. (2023). Genome-wide identification and characterization of aldo-keto reductase (AKR) gene family in response to abiotic stresses in *Solanum lycopersicum*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(2), 1272. <https://doi.org/10.3390/ijms24021272>
- Huo, J., Du, B., Sun, S., He, S., Zhao, N., Liu, Q., & Zhai, H. (2018). A novel aldo-keto reductase gene, IbAKR, from sweet potato confers higher tolerance to cadmium stress in tobacco. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 5(2), 206-213. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2018225>
- Kanayama, Y., Mizutani, R., Yaguchi, S., Hojo, A., Ikeda, H., Nishiyama, M., & Kanahama, K. (2014). Characterization of an uncharacterized aldo-keto reductase gene from peach and its role in abiotic stress tolerance. *Phytochemistry*, 104, 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.04.008>
- Kumar, D., Singh, P., Yusuf, M. A., Upadhyaya, C. P., Roy, S. D., Hohn, T., & Sarin, N. B. (2013). The Xerophyta viscosa aldose reductase (ALDRXV4) confers enhanced drought and salinity tolerance to transgenic tobacco plants by scavenging methylglyoxal and reducing the membrane damage. *Molecular Biotechnology*, 54(2), 292-303. <https://doi.org/10.1007/s12033-012-9567-y>
- Nasar, J., Wang, G. Y., Ahmad, S., Muhammad, I., Zeeshan, M., Gitari, H., ... & Hasan, M. E. (2022). Nitrogen fertilization coupled with iron foliar application improves the photosynthetic characteristics, photosynthetic nitrogen use efficiency, and the related enzymes of maize crops under different planting patterns. *Frontiers in Plant Science*, 13, 988055. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.988055>
- Okino-Delgado, C. H., Prado, D. Z., & Fleuri, L. F. (2018). Brazilian fruit processing wastes as a source of lipase and other biotechnological products: A review. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90, 2927-2943. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820180095>
- Oliveira, de G. P., Dos Santos, M. L., de Sousa, S. M., Koch, K. E., Yunes, J. A., Aparicio, R., & Murakami, M. T. (2016). A comparative structural analysis reveals distinctive features of co-factor binding and substrate specificity in plant aldo-keto reductases. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 474(4), 696-701. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.05.011>
- Rácz, D., Szőke, L., Tóth, B., Kovács, B., Horváth, É., Zagy, P., ... & Széles, A. (2021). Examination of the productivity and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to nitrapyrin and foliar fertilizer treatments. *Plants*, 10(11), 2426. <https://doi.org/10.3390/plants10112426>
- Russo, S., Luján, A. P., Fraaije, M. W., & Poelarends, G. J. (2024). Synthesis of pharmaceutically relevant arylamines enabled by a nitroreductase from *Bacillus tequilensis*. *ChemBioChem*, 25(10), e202300846. <https://doi.org/10.1002/cbic.202300846>
- Sánchez-Camarillo, A. R., Solís-Oba, M. M., Solís-Oba, A., Martínez-Casares, R. M., & Castro-Rivera, R. (2025). Influencia del Extracto de Sargazo y del Fertilizante Mineral en el Rendimiento de Frijol Pinto (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. San Rafael. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2155>
- Sengupta, D., Naik, D., & Reddy, A. R. (2015). Plant aldo-keto reductases (AKRs) as multi-tasking soldiers involved in diverse plant metabolic processes and stress defense: A structure-function update. *Journal of Plant Physiology*, 179, 40-55. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.03.004>
- Sharma, P. K., Gurjar, R., Kumar, M., Kumar, D., & Dabaria, A. (2023). Combined effect of nitrogen and phosphorus fertilizer on the activity of the nitrate reductase enzyme in different wheat cultivars. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(1), 196-204. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i11667>

- Sheldon, R. A. (2024). Green chemistry and biocatalysis: Engineering a sustainable future. *Catalysis Today*, 431, 114571. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.114571>
- Solís, A., Martínez, R. M., Cervantes, F., Pérez, H. I., Manjarrez, N., & Solís, M. (2019). Reduction of substituted benzaldehydes, acetophenone and 2-acetylpyridine using bean seeds as crude reductase enzymes. *Biocatalysis and Biotransformation*, 37(2), 152-157. <https://doi.org/10.1080/10242422.2018.1510492>
- Solís-Oba, A., Martínez-Pérez, R. M., Cervantes-Domínguez, F., Pérez-Méndez, H. I., Solís-Oba, M., & Manjarrez-Álvarez, N. (2017). Biocatalytic reduction of benzaldehyde using vegetable wastes as enzyme sources. *Acta Universitaria*, 27(4), 13-18. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1284>
- SAS Institute Inc (2016). *JMP® User's Guide, version 13*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Yu, J., Li, Y., Qin, Z., Guo, S., Li, Y., Miao, Y., ... & Dai, S. (2020). Plant chloroplast stress response: insights from thiol redox proteomics. *Antioxidants & Redox Signaling*, 33(1), 35-57. <https://doi.org/10.1089/ars.2019.7823>
- Zhang, W., Shao, Z. Q., Wang, Z. X., Ye, Y. F., Li, S. F., & Wang, Y. J. (2024). Advances in aldo-keto reductases immobilization for biocatalytic synthesis of chiral alcohols. *International Journal of Biological Macromolecules*, 274, 133264. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133264>