OPEN ACCESS

ARTÍCULO ORIGINAL

Ingeniería Agrícola 16
enero-diciembre 2026
ISSN 2306-1545, eISSN 2227-8761
Cu-ID: https://cu-id.com/2284/v16e22

Uso de las nanopartículas de hierro (NPs Fe) en la aclimatización de vitroplantas de henequén

Use of iron nanoparticles (Fe NPs) in the acclimatization of henequen vitroplants

Enildo O. Abreu Cruz[1], Yariel González Pérez[1], Ramón Liriano González[1], Maikol Alejandro Menéndez Baños[2], Jovana Pérez Ramos[1], Conrado Camacho Campos[1] y Arlety Rojas Alonso[1]

[1]Universidad de Matanzas, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Autopista a Varadero km 3 ½ Matanzas, Cuba, C.P. 44740, Cuba.
E-mail: yariel.perez@umcc.cu, ramon.liriano@umcc.cu, jovana.perez@umcc.cu, camacho.conrado@gmail.com, arletynoe@gmail.com.cu
[2]Flora y Fauna. Unidad Empresarial de Base (UEB) Conservación Cárdenas Reserva Ecológica Mono Galindo. Cárdenas, Matanzas, Cuba.
E-mail: mayko4000@gmail.com

*Autor para correspondência: Enildo O. Abreu Cruz, e-mail: eabreucruz@gmail.com

RESUMEN: El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el uso de nanopartículas de hierro (NPs Fe) en el proceso de aclimatización de vitroplantas de henequén. El estudio se desarrolló en las áreas del Centro de estudios biotecnológicos (CEBIO) de la Universidad de Matanzas, en casa de cultivo con manejo de la intensidad luminosa [flujo de fotones fotosintéticos (FFF)], a través de diferentes condiciones creadas con el empleo de capas de malla sarán de color negro, además se hicieron manejo de la humedad relativa y del sustrato. En el ensayo se utilizaron plántulas enraizadas provenientes de la fase *in vitro*, las que fueron seleccionadas de acuerdo con su vigor vegetativo y estado fitosanitario. Para evaluar el efecto de las NPs Fe se emplearon tres concentraciones del producto (50, 100 y 150 mg L^{-1}), que constituyeron los tratamientos en estudio, además de un tratamiento control sin la aplicación del nanoproducto. Con estas variantes se montó un experimento, sobre un diseño totalmente aleatorizado conformado con unidades experimentales de 25 plantas en cada caso. Se hicieron dos aplicaciones del nanoproducto y el desarrollo de las plantas fue evaluado en dos momentos diferentes de la fase de aclimatización (35 y 55 días). Se midieron variables morfológicas y fisiológicas de respuesta de las plantas. Los resultados obtenidos reflejaron que no hubo efecto estimulador de este nanoproducto en las condiciones del estudio. Las variables morfofisiológicas evaluadas, reflejaron un comportamiento en la dinámica de desarrollo de las vitroplantas, característico de esta especie para la fase de aclimatización.
Palabras clave: aclimatización, henequén, micropropagación, NPs Fe.

ABSTRACT: The objective of this study was to evaluate the use of iron nanoparticles (Fe NPs) in the acclimatization process of henequen in vitro plants. The study was carried out at the Center for Biotechnology Studies (CEBIO) of the University of Matanzas, in a cultivation house with light intensity management [photosynthetic photon flux (FFF)], through different conditions created with the use of layers of black saran mesh, in addition to managing relative humidity and substrate. The trial used rooted seedlings from the in vitro phase, which were selected according to their vegetative vigor and phytosanitary status. To evaluate the effect of Fe NPs, three concentrations of the product (50, 100, and 150 mg L-1) were used as the treatments under study, in addition to a control treatment without the application of the nanoproduct. With these variants, an experiment was set up using a completely randomized design consisting of 25 plants in each experimental unit. Two applications of the nanoproduct were made, and plant development was evaluated at two different times during the acclimatization phase (35 and 55 days). Morphological and physiological variables of the plant response were measured. The results showed no stimulatory effect of this nanoproduct under the study conditions. The morphophysiological variables evaluated reflected behavior in the developmental dynamics of the vitroplants, characteristic of this species during the acclimatization phase.
Keywords: acclimatization, henequen, micropropagation, Fe NPs.

INTRODUCCIÓN

El henequén es una especie que se ubica dentro del género *agave*, esta planta es originaria del estado de Yucatán en México, productora de fibra, especialmente para la fabricación de sogas y cordeles. En Cuba, fue introducido alrededor de 1850, siendo Matanzas la provincia de mayor desarrollo con vistas a su industrialización, constituyendo la fuente de fibras vegetales duras más importante para la industria (Ministerio de Agricultura (Minag-Cuba, 2012), lo que conllevó a su desarrollo integral y la comercialización de las fibras en el mercado internacional.

Recibido: 06/01/2026
Aceptado: 12/06/2026
Contribución de los autores: Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.
Contribución de los autores: Conceptualización: Enildo Abreu, Yariel González, Ramón Liriano. **Curación de datos:** Maikol Menéndez, Conrado Camacho, Arlety Rojas. **Análisis formal:** Enildo Abreu, Yariel González, Ramón Liriano, Jovana Pérez. **Investigación:** Enildo Abreu, Yariel González, Ramón Liriano, Jovana Pérez, Maikol Menéndez, Arlety Rojas. **Metodología:** Enildo Abreu, Yariel González: Enildo Abreu, Yariel González, Conrado Camacho. **Redacción - borrador original:** Enildo Abreu, Jovana Pérez, Maikol Menéndez, Conrado Camacho, Arlety Rojas. **Redacción - revisión y edición:** Enildo Abreu, Yariel González, Ramón Liriano, Conrado Camacho.
La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a fines de identificación, no existe ningún compromiso promocional relacionado con los mismos, ni para los autores ni para el editor.

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

La propagación del henequén tradicionalmente se realiza de manera vegetativa, por medio de retoños, producidos por los rizomas, y por medio de los bulbilos que son yemas aéreas encontradas en el escapo floral.

En el cultivo del henequén, se han establecido tecnologías para la propagación a escala de laboratorio (Abreu, 2009; Fontes, 2017; González, 2001 & Sankoumba Fadiga, 2014). Cada uno de estos autores han establecido criterios del proceso de micropropagación indistintamente en las diferentes etapas para optimizar y hacer más eficiente la tecnología, no obstante, la fase de aclimatización sigue siendo una etapa crítica para esta tecnología por el estrés a que son sometidas estas plantas cuando son trasladas de un ambiente *in vitro* a las condiciones *ex vitro* de las casas de cultivo o invernaderos, lo que puede provocar alta mortalidad o un lento desarrollo de las mismas, si no se hace un manejo cuidadoso en estas condiciones. En relación con este criterio la posibilidad de buscar alternativas para optimizar la fase de aclimatización sigue siendo un empeño de los investigadores.

Las nanopartículas son nanomateriales reconocidos por tener efectos positivos en la morfología, crecimiento y germinación de plantas y semillas, así como favorecer la formación y alargamiento de raíces y brotes, sin embargo, también pueden tener efectos no deseados como de toxicidad o de inhibición, para su uso se requiere la experimentación exhaustiva para establecer la concentración adecuada, el tamaño y la forma de aplicación (Torres et al., 2016). Lo que no ha sido estudiado en el cultivo del henequén

En este contexto el empleo de las nanoparticulas de hierro puede ser una vía alternativa a evaluar en el proceso de aclimatización de vitroplantas de henequén para lograr un proceso que aporte mayores beneficios, por lo que, a partir de lo antes expuesto, se propone como objetivo evaluar el efecto estimulador de las NPs Fe en vitroplantas de henequén durante la fase de aclimatización.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en el Centro de Estudios Biotecnológicos (CEBIO) de la Universidad de Matanzas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Se utilizaron plántulas de la variedad Sakí, procedentes del protocolo de micro propagación establecido para este cultivo de acuerdo con González (2001), que mostraban un adecuado estado fisiológico y fitosanitario.

Las plántulas fueron extraídas de los frascos después de concluida la fase de enraizamiento *in vitro* y lavadas cuidadosamente con agua corriente para eliminar los restos de agar de los brotes y raíces. Las raíces fueron podadas teniendo en cuenta la infuncionalidad de este órgano como consecuencia de su regeneración en las condiciones *in vitro* y, para facilitar el establecimiento en el sustrato. Antes del trasplante se sometieron a un período de una hora de imbibición en agua natural.

El proceso de aclimatización se desarrolló en casa de cultivo de acuerdo con el protocolo establecido por Abreu (2009), con manejo de la intensidad luminosa [flujo de fotones fotosintéticos (FFF)], a través de diferentes condiciones creadas con el empleo de capas de malla zaran de color negro. Se estableció una zona que permitía el paso del 30% de la luz aproximadamente, donde las plántulas fueron ubicadas durante las cuatro primeras semanas y otra zona con el paso de la luz del 70% aproximadamente, hacia donde fueron movidas posteriormente hasta su traslado para previvero. Se utilizaron bandejas de poli espuma de 70 alvéolos, con un sustrato orgánico obtenido a partir de compost, mezclado con zeolita en una proporción de 1:1 (V:V). La humedad relativa se mantuvo por encima del 70% con el empleo de riegos periódicos por aspersión, cuidando no humedecer demasiado el sustrato. La fase de aclimatización se extendió hasta los 60 días.

Para evaluar el efecto de las nanopartículas de hierro (NPs Fe) en el proceso de aclimatización de las vitroplantas de henequén, se emplearon tres concentraciones del producto (50, 100 y 150 mg L^{-1}). Con estas variantes se montó un experimento, sobre un diseño totalmente aleatorizado conformado con unidades experimentales de 25 plantas en cada caso. Se establecieron cuatro tratamientos identificados de la siguiente manera: T1 (50 mg L^{-1}), T2 (100 mg L^{-1}), T3 (150 mg L^{-1}) y el T4 (tratamiento control, sin aplicación del producto).

Las nanopartículas se aplicaron en dos momentos, 15 y 35 días de transcurrido el proceso. Para ello se empleó un microaspersor manual con un volumen de la solución que permitiera rociar y humedecer de manera uniforme toda el área foliar de las plántulas. Las plantas fueron medidas en su momento inicial (salida de *in vitro*), tomando para ello una muestra representativa de todo el material vegetal utilizado, que permitiera caracterizar los indicadores de desarrollo de las mismas, (altura, número de hojas, grosor del tallo, número de raíces, área foliar y peso fresco). Posteriormente se repitieron dos mediciones después de cada aplicación (35 días y 50 días de transcurrido el proceso), se evaluó el comportamiento de los indicadores del desarrollo definidos anteriormente. Se siguió el procedimiento que se describe:

- Altura de las plantas: Se midió desde la base del tallo hasta la altura de las hojas más largas, para ello se utilizó una regla graduada, con precisión de 1 mm
- Número hojas: Se determinó por conteo directo de hojas
- Grosor del tallo: Se empleó un pie de rey, con el cual se determinó el diámetro en su base
- Número de raíces: Se determinó por conteo directo de las raíces
- Peso fresco: Se utilizó una balanza digital KERN
- Área Foliar: Se determinó según la ecuación propuesta por González (2001)

Af = Largo x Ancho x 0,68.

Toda la información obtenida de los estudios realizados fue procesada según el paquete Statgraphic plus 5.1 sobre WINDOWS. Se determinó el ajuste a una Distribución Normal mediante la prueba de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov y la Homogeneidad de Varianza mediante las Pruebas de Bartlett.

En los casos en que los datos cumplieron los requisitos exigidos se procesaron mediante ANOVA de clasificación simple y se utilizó la Prueba de Rangos Múltiples de Duncan para la comparación entre medias. Para los datos que no cumplieron con estas premisas, se utilizó la Prueba de Kruskal-Wallis y las medias fueron comparadas mediante la Prueba de Rangos Múltiples de Student-Newman-Kwels (SNK) ($P < 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra a partir de un gráfico de distribución de frecuencia por clases, el comportamiento de cuatro variables del desarrollo de las vitroplantas (altura, número de hojas, peso fresco y diámetro del tallo), medidas al momento de su salida de las condiciones *in vitro*, de acuerdo al rango de valores en que se mueve cada variable, lo que indica la calidad del material vegetal utilizado en la investigación y su posible efecto sobre los resultados obtenidos para evaluar el éxito o no del empleo de las nanopartículas de hierro (NPs-Fe) como estimulador en la respuesta metabólica de las vitroplantas ante el proceso de aclimatización.

Como se muestra en la Figura 1, en todas las variables se refleja una mayor concentración de los valores en un menor número de clases, lo que puede ser muy positivo y aportar mayor fiabilidad en los resultados de la investigación, sin embargo, el coeficiente de variación en todos los casos es mayor del 15%, lo que induce mayor variabilidad en el comportamiento de los individuos.

El efecto de las NPs-Fe sobre la respuesta de las vitroplantas, de acuerdo con los tratamientos en estudio (T1 (50 mg L^{-1} de NPs-Fe), T2 (100 mg L^{-1}de NPs-Fe), T3 (150 mg L^{-1}de NPs-Fe) y T4 (control, sin aplicación del nanoproducto), se muestra en las figuras de la 2 a la 7. Cada Figura refleja el comportamiento de la dinámica de desarrollo de las variables medidas a partir de su condición inicial (salida *in vitro*) presentadas en la Figura 1, como ya se destacó anteriormente, y su tendencia evolutiva durante el tiempo de duración del proceso de aclimatización (55 días). En la Figura 2 se destaca el comportamiento de la altura.

Como se puede observar en este resultado, no se señala diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos en ninguno de los dos momentos de muestreos establecidos para monitorear la dinámica en el comportamiento de las variables (35 y 55 días respectivamente), de la misma manera que, respecto a la tendencia de su evolución durante el proceso, no se reflejan incrementos en los valores mostrados en ninguno de los intervalos con respecto al momento inicial.

Comportamientos similares mostraron las variables número de hojas (Figura 3) y largo de las hojas (Figura 4 A). En estas variables, al igual que en la altura, además de no expresarse diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos a partir de las respuestas de las plantas por efecto del empleo de las nanopartículas de hierro

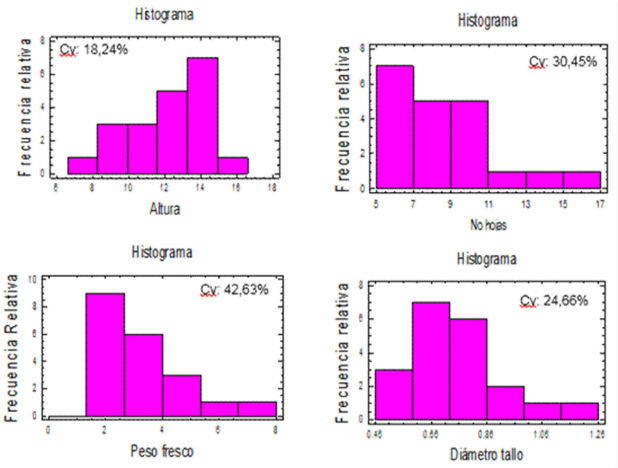


Figura 1. Histograma de distribución de frecuencia por clases en las variables altura, número de hojas, peso fresco de las plántulas y diámetro del tallo, al momento de su salida de las condiciones *in vitro*. (Cv, significa el coeficiente de variación con respecto a la media en cada variable).

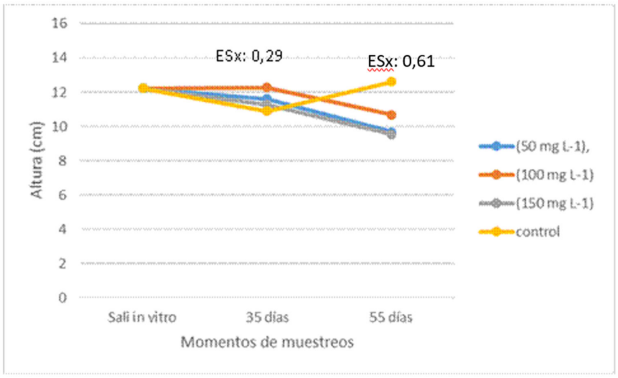


Figura 2. Dinámica de crecimiento de las plantas en la variable altura desde su establecimiento en la fase de aclimatización (salida de *in vitro*), hasta los 55 días de estancia en estas condiciones. Los análisis estadísticos se hicieron para cada momento de muestreo por separado, para $p \leq 0,05$. ESx significa error estándar de la media.

(NPs-Fe), su tendencia evolutiva en el tiempo no mostró incrementos en sus valores, y por el contrario se aprecia mayor irregularidad y dispersión de los valores alcanzados.

Sin embargo, en el ancho de las hojas el comportamiento fue diferente en cuanto a su dinámica (Figura 4 B), en esta variable a pesar de que tampoco se exhibió diferencia estadísticamente significativa en la magnitud de sus valores entre los tratamientos, sí hubo una tendencia a un incremento sostenido, desde su momento inicial hasta los 55 días como respuesta a la adaptación en las condiciones *ex vitro* (aclimatización), lo que ocurrió de manera similar en todos los tratamientos, refutando igualmente hasta este análisis posible efecto favorable del empleo de las NPs-Fe en el proceso de aclimatización, como estimulador del metabolismo de las plantas en algunos de sus procesos o mecanismos.

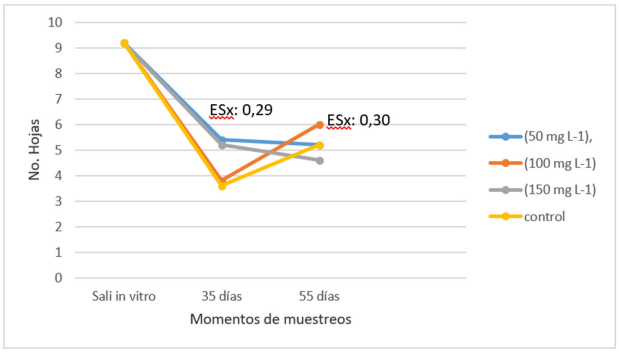


Figura 3. Dinámica de crecimiento de las plantas en la variable número de hojas (No. hojas), desde su establecimiento en la fase de aclimatización (salida de *in vitro*), hasta los 55 días de estancia en estas condiciones. Los análisis estadísticos se hicieron para cada momento de muestreo por separado, para $p \leq 0,05$. ESx significa error estándar de la media.

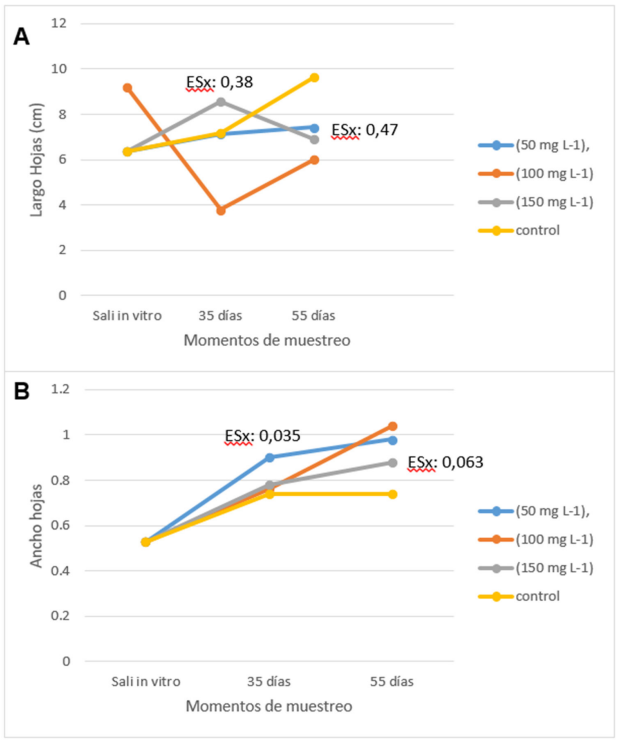


Figura 4. Dinámica de crecimiento de las plantas en las variables largo de hojas, (gráfico A) y ancho de hojas, (grafico B), desde su establecimiento en la fase de aclimatización (salida de *in vitro*), hasta los 55 días de estancia en estas condiciones. Los análisis estadísticos se hicieron para cada momento de muestreo por separado, para $p < 0,05$. ESx significa error estándar de la media.

En las variables restantes como área foliar y diámetro del tallo (Figuras 5 A y 5 B) respectivamente, vuelve a expresarse una respuesta similar a las variables altura, número de hojas, y largo de las hojas, tanto en su dinámica como por efecto de los tratamientos.

El área foliar puede ser una variable que refleje una respuesta más integral de la plántulas en cuanto al desarrollo biológico y su ritmo de crecimiento como respuesta ante determinadas condiciones ambientales, lo que les

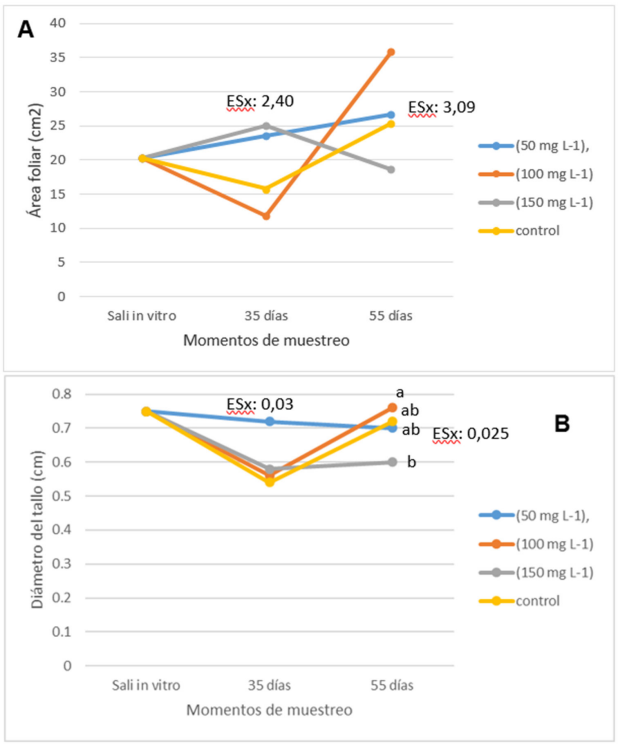


Figura 5. Dinámica de crecimiento de las plantas en las variables área foliar (gráfico A) y diámetro del tallo (gráfico B), desde su establecimiento en la fase de aclimatización (salida de *in vitro*), hasta los 55 días de estancia en estas condiciones. Los análisis estadísticos se hicieron para cada momento de muestreo por separadopara $p \leq 0,05$. Letras diferentes significa que hay diferencias significativas entre los tratamientos. ESx significa error estándar de la media.

condiciona incrementos más marcados o no en la biomasa, sin embargo, se deriva del número de hojas y del largo y ancho de las mismas y por lo tanto puede ser influenciada en mayor medida o no, por una de estas variables, como pudiera ocurrir en los resultados obtenidos en esta investigación a partir del comportamiento del número y largo de las hojas, y su posible influencia en el área.

Por su parte al peso fresco (Figura 6) y número de raíces nuevas (Figura 7), los resultados mostrados parten de condiciones diferentes de acuerdo con los análisis hechos anteriormente en cuanto a los momentos de muestreo y el seguimiento a su dinámica, aunque en estas variables también se expresa la no existencia de diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos al final del proceso (55 días), por lo que tampoco se puede hablar de efecto estimulador de la NPs-Fe.

Para el peso fresco solamente se tuvo en cuenta el peso fresco inicial a la salida *in vitro* y al final del proceso (55 días), momento en que las plantas fueron extraídas de las bandejas y trasplantadas a canteros, y bajo estas condiciones hubo un aumento en el peso fresco de las plantas que se justifica a partir de incremento en su biomasa como respuesta al proceso de adaptación en las nuevas condiciones.

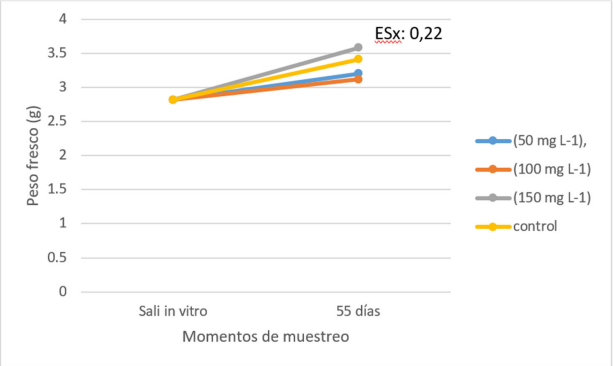


Figura 6. Dinámica de crecimiento de las plantas en la variable peso fresco, desde su establecimiento en la fase de aclimatización (salida de *in vitro*), hasta los 55 días de estancia en estas condiciones. Los análisis estadísticos se hicieron para cada momento de muestreo por separado, para $p \leq 0,05$. ESx significa error estándar de la media.

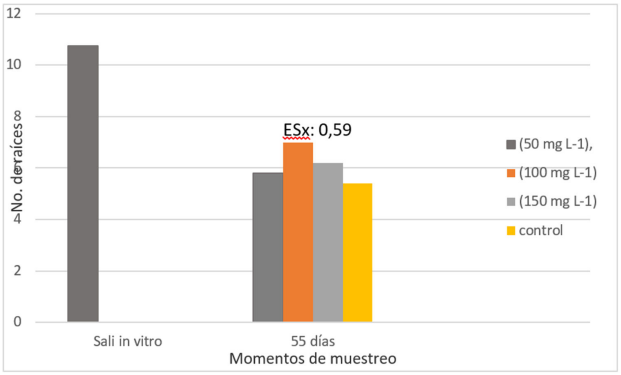


Figura 7. Comportamiento del número raíces nuevas emitidas por las plantas, medidas al final del proceso de aclimatización (55 días). La barra de Sali in vitro solo se muestra para referenciar de la cantidad al momento de su (salida *in vitro*). ESx significa error estándar de la media. $p \leq 0,05$.

Análisis similar se asocia a los resultados en cuanto al número de raíces nuevas (Figura 7).

El número de raíces que se muestra en la figura destaca la emisión de nuevas raíces funcionales en las condiciones *exvitro*, lo que sugiere una respuesta positiva de las plántulas para enfrentar el estrés a que son sometidas por el cambio de las condiciones *in vitro* a las *ex vitro*. Sobre la respuesta de esta variable en el proceso de aclimatización de vitroplantas de henequén, autores como (Abreu (2009) y Fontes (2017) la utilizaron como indicador de referencia para confirmar respuesta positiva de las plantas en las condiciones *ex vitro* ante un proceso de aclimatización. Otros autores como García et al. (2020) en una investigación sobre aplicación de extracto de *Aloe vera* L. en la adaptación de vitroplantas de plátano, encontraron respuesta en el número de raíces como uno de los principales indicadores a tener en cuenta para validar la eficacia de este producto.

De manera general, los resultados descritos para evaluar el proceso de aclimatización de vitroplantas de henequén a partir de las variables seleccionadas están condicionados por dos factores fundamentales, como ha sido informado por diferentes autores (Abreu, 2009; Abreu et al., 2007; Fontes, 2017; González, 2001). Ello se refiere al efecto que induce el ambiente *in vitro* en la anatomía, morfología y fisiología de estas plantas, identificados también por diferentes autores de forma generalizada para este tipo de tecnología de micropropagación (Morales et al., 2009; Rodríguez & González, 2012), y al efecto de las peculiaridades de la especie, este último de mayor importancia para evaluar la dinámica del desarrollo de las plántulas a partir del comportamiento de su fisiología o anatomorfología, como respuesta antes determinados estímulos o situaciones de estrés.

En relación con estos criterios un primer elemento para lograr éxito en la aclimatización de las vitroplantas, está en la posibilidad de que las plantas puedan pasar de condiciones heterotróficas o mixotróficas (mezcla de autotróficas con heterotróficas), las que aparecen como consecuencia de los ambientes *in vitro*, al autotrofismo como condición natural de las plantas (Nava et al., 2011 & Tamayo, 2014) cuando son transferidas a las condiciones *ex vitro* o casas de cultivo, lo que resulta en una fase crítica debido a los altos porcentajes de mortalidad que pueden ocurrir por el estrés a que son sometidas como consecuencia de cambios bruscos en los niveles de dióxido de carbono, iluminación y humedad relativa, entre otros. Y el otro elemento está en establecer un protocolo que responda a las peculiaridades de la especie, como ya se refirió anteriormente, lo que permitiría definir que indicadores o variables determinan una respuesta positiva de las plantas en relación a su adaptación a las condiciones *ex vitro,* y el tiempo mínimo que debe durar este proceso.

En el cultivo del henequén, Abreu (2009) y Fontes (2017) establecen criterios para el proceso de aclimatización, que incluyen indicadores en cuanto a calidad de las vitroplantas, asociado a la supervivencia de las mismas, la cual no se tuvo en cuenta en esta investigación, ya que se partió de grupos de plantas que habían superado la etapa crítica (15 días) en cuanto a la supervivencia, de acuerdo con los criterios de estos autores, y otros indicadores a partir de variables morfológicas y fisiológicas, como las evaluadas en este estudio, entre otras, y que también han sido utilizadas en especies de Agaves (*Agave angustifolia Haw*), como la altura y número de hojas informado por Sánchez et al. (2020).

En este sentido los resultados obtenidos en cuanto a la dinámica del desarrollo de las vitroplantas coinciden con lo reportado por Abreu (2009) y Fontes (2017), este último específicamente en el clon Subinerme. De acuerdo con estos autores para el cultivo del henequén las variables que más definieron los criterios para establecer el protocolo de aclimatización fueron el ancho de la hoja y la emisión de nuevas raíces funcionales, el resto de las variables como la altura, número y largo de las hojas, área foliar, entre otras, tuvieron un comportamiento muy inestable lo que lo asociaron con las características del cultivo.

El henequén es una planta xeromorfica de crecimiento lento, que en su condición de vitroplanta, durante el proceso de aclimatización, debe lograr en un corto periodo de tiempo un reordenamiento fisiológico que les permita poder sobrevivir al cambio de una condición a otra, lo que está muy asociado con sus peculiaridades. En este sentido, según informaron Abreu (2009) y Fontes (2017), el comportamiento de variables morfológicas como la altura, número de hojas, número de raíces y masa fresca de la planta, en todos los casos las plántulas a la salida *in vitro* reflejan un valor para cada variable que posteriormente varia de manera significativa en alguno de sus momentos en su dinámica de desarrollo, por una disminución de su valor, que finalmente vuelve a incrementarse hacia el final de la etapa, similar a su momento inicial, sin diferencias estadísticamente significativa entre ellos. Este comportamiento se le atribuye al acomodo fisiológico de las plántulas debido al estrés por el cambio hacia su transformación como organismos autotróficos, lo que estuvo muy en correspondencia con el comportamiento que tuvieron las plántulas en esta investigación.

Referente a los resultados obtenidos con el empleo de las NPs-Fe para estimular las respuestas de las vitroplantas ante la incidencia del estrés causado por el cambio de una condición a otra durante el proceso de aclimatización, no se encontró efecto de este nanoproducto en las concentraciones evaluadas, aunque no se puede afirmar categóricamente la posibilidad de no encontrar efecto en este sentido. De acuerdo con autores como (Le Pioufle. et al., 2024 y Rivas-Ramírez & Torres-Pacheco, 2021) el empleo de las NPs de un determinado material como promotora del crecimiento, requiere de la experimentación exhaustiva para establecer la concentración adecuada, el tamaño y la forma de aplicación (Razzaq et al., 2016), además, las propiedades inherentes del elemento involucrado, así como la función fisiológica y bioquímica que desempeña en la planta, aspectos que se inician con esta investigación, con el objetivo de potenciar el proceso de aclimatización de vitroplantas de henequén, como fase crítica en la tecnología de microprpagación asociada a este cultivo.

En correspondencia con estos criterios, Ceballos-Salazar et al. (2025), encontraron respuesta positiva sobre el metabolismo de plantas de *Crica papaya* con el empleo de NPs de cerio y hierro en diferentes concentraciones, sin embargo, tuvieron un efecto nulo o poco significativo en el crecimiento de las plantas, Adicionalmente encontraron que las plantas tratadas con estas NPs y las de cerio en la mínima concentración obtuvieron la mayor altura, pero sorpresivamente, las NPs de cerio a una concentración de 50mg L^{-1} presentaron toxicidad en las variables respuestas (altura y biomasa seca obtenida).

Por su parte Uresti (2016) en un trabajo donde evalúa el efecto de nanopartículas de ZnO, TiO_2 y Fe_2O_3 en el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz, señala que la concentración de NPs no afectó significativamente la biomasa y longitud de las plantas, pero sí modificó significativamente los componentes de rendimiento de la cosecha, además refiere que el tipo de NP o su concentración afectaron significativamente al menos una variable relacionada con la germinación de semillas, la actividad fotosintética, la biomasa, la longitud de planta y los componentes de rendimiento. Por otra parte, este autor se refiere a perspectivas del uso de los nanoproductos, donde indica que se deben definir protocolos para ensayos de toxicidad en plantas, que consideren las particularidades de cada nanomaterial.

El hierro es un micronutriente esencial para las plantas debido a sus fundamentales funciones en diversos procesos como la actividad enzimática y la síntesis de clorofila (Hortocampo, 2022), no obstante, en forma de nanopartíula puede tener otras funciones que son importante conocer para potenciar su uso como estimulador de la actividad metabólica de las plantas, lo que está de acuerdo con lo informado por Uresti (2016) al referirse que los nanoproductos presentan propiedades únicas, que no se presentan a tamaños convencionales, pero que puede traer como consecuencia riesgos para la salud del hombre y su entorno.

Finalmente, los resultados obtenidos en esta investigación sugieren la necesidad de seguir investigando sobre los efectos de las NPs-Fe como estimulador del metabolismo de las vitroplantas de henequén para enfrentar el estrés que les induce el proceso de aclimatización a condición de obtener indicadores más favorables de respuesta de las plantas en este proceso y mayor calidad de este material de propagación.

CONCLUSIONES

El empleo de las NPs Fe en vitroplantas de henequén durante la fase de aclimatización no evidencio efecto estimulador de este nanoproducto en las condiciones del estudio. Los resultados obtenidos en cuanto las variables morfofisiológicas evaluadas, reflejaron un comportamiento en la dinámica de desarrollo de las vitroplantas, característico de esta especie, que ya había sido descrito de manear similar por otros autores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, E. (2009). *Aclimatización de plántulas de henequén* (*Agave fourcroydes* Lem.) *y su evaluación en la etapa de previvero. La Habana* [Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas]. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas.

Abreu, E., González, G., Ortíz, R., Rodríguez, P., Domech, R., & Garriga, M. (2007). Aclimatación de plantas de henequén micropropagadas (*Agave fourcroydes* Lem.). Estudio de diferentes condiciones en la etapa de vivero. *Producción Vegetal*, 84.

Ceballos-Salazar, R., Quiñones-Aguilar, E., López-Mena, E. R., Navarro-López, D. E., & Enriquez, G. R. (2025). *Efecto de la concentración de nanopartículas en la biomasa de Carica papaya*. XLIX CONGRESO NACIONAL DE LA SMF, México.

Fontes, E. (2017). Evaluación de vitroplantas de henequén (*Agave fourcroydes* Lem.) procedentes de una nueva accesión (Subinerme) durante la etapa de aclimatización. *Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Matanzas*.

García, M. J., Gonzalo, R. H., & López, M. E. (2020). Extracto de Aloe vera L. en la adaptación de vitroplantas de plátano. *Avances: Cuba*, *22*(1), 110-122, ISSN: 1562-3297, Publisher: Centro de Información y Gestión Tecnológica.

González, G. (2001). *Embriogénesis somática en henequén* (*Agave fourcroydes* Lem) [Tesis en opción al grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas]. Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba.

Hortocampo, H. (2022). *El rol del hierro (Fe) en la agricultura. Carencias y soluciones*. Hortocampo. https://www.hortocampo.com/blog/el-rol-del-hierro-fe-en la-agricultura-carencias-y-soluciones

Le Pioufle., O., Miranda, M., & López, F. (2024). Nanopartículas metálicas como plaguicidas en cultivos agrícolas, ventajas y retos de producción. *Revista Frontera Biotecnológica*, *28*, 31-40.

Minag-Cuba. (2012). *Instructivo técnico para el cultivo del henequén. Instituto de Investigaciones Hortícolas "Liliana Dimitrova"*. Ministerio de la Agricultura.

Morales, C., De la Fe, C., Corbera, J., & Calaña, J. (2009). Estudio de la aclimatización de vitroplantas de Anturio (*Anthurium andreanum* Lin.). *Cultivos Tropicales*, *30*(4), ISSN: 0258-5936, Publisher: Ediciones INCA.

Nava, J. J., Jiménez, A. R., De Jesús, A., Arenas, M. L., Ventura, E., & Evangelista, S. (2011). Estudio de la morfología y aclimatación de plantas de *Laelia Eyermaniana* Rchb. F. Generadas in vitro. *Revista Polibotanica*, *32*, 107-117.

Razzaq, A., Ammara, R., Jhanzab, H., Mahmood, T., Hafeez, A., & Hussain, S. (2016). A novel nanomaterial to enhance growth and yield of wheat. *Journal of Nanoscience and Technology*, 2(1), 55-58.

Rivas-Ramírez, L. K., & Torres-Pacheco, I. (2021). Nanopartículas: Nuevas aliadas de la agricultura. *Digital ciencia@ uaqro*, *14*(2), 19-27, ISSN: 2395-8847.

Rodríguez, R., & González, J. (2012). *Aclimatización de plántulas de caña de azúcar micropropagadas*. Editorial Academia Española.

Sánchez, A., Coronel, Z., Gutiérrez, A., Vargas, G., Coronado, M. L., & Esqueda, M. (2020). Aclimatación y trasplante de vitroplantas de *Agave angustifolia* Haw. En condiciones silvestres. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *11*(7), 1593-1605.

Sankoumba Fadiga, M. (2014). *Evaluación del comportamiento de la propagación in vitro de nuevas accesiones (Subinerme y C-97) de henequén* (*Agave fourcroydes* Lem.) [Tesis en opción al título de Máster en Ciencias Agrícolas]. Universidad de Matanzas.

Tamayo, A. C. F. (2014). *Tasa de incremento lumínico óptimo durante la aclimatación in vitro de Nothofagus alpina* (*Nothofagus alpina* Poepp et Endl (Oerst)). [Trabajo de titulación en opción al Título de Ingeniera Forestal]. Universidad Austral de Chile.

Torres, N. A. R., Lopez, J. I. G., Ricardo, H. L. S., Reyes, I. V., & Arguello, B. M. (2016). Efecto de nanopartículas metálicas y derivadas del carbón en la fisiología de semillas. *Segundo Taller Agronanotecnología. Mexico. (CD)*. Segundo Taller Agronanotecnología, Mexico.

Uresti, D. N. D. (2016). *Efecto de nanopartículas de ZnO, TiO_2 y Fe_2O_3 en el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz* [Tesis en opción al título de Maestro en Ciencias en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía.]. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Unidad Saltillo.