Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

Artículo

Modulación auxina-citocinina para optimizar la morfogénesis en explantes de *Fragaria × ananassa* Duch.

Patricia Velázquez-Fernández [1]
Gregorio Arellano-Ostoa [1, §]
Reyna Isabel Rojas-Martínez [2]
Eduardo García-Villanueva [1]
Sergio Humberto Chávez-Franco [1]

1 Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Fruticultura-Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera Federal México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230.

2 Postgrado en Fitosanidad. Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera Federal México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230. (patricia.velazquez@colpos.mx; egarciav@colpos.mx; sergiocf@colpos.mx; rojas@colpos.mx).

Autor para correspondencia: arellano@colpos.mx

Resumen

La propagación *in vitro* de *Fragaria* × *ananassa* mediante callos organogénicos es una vía eficiente para regenerar brotes y plantas completas. Este estudio evaluó el efecto de distintas combinaciones de reguladores de crecimiento, polisacáridos hidrosolubles y fosfoproteínas en la inducción de callos a partir de explantes foliares de los cultivares festival y CP-Jacona. Se probaron seis tratamientos con diferentes concentraciones de ANA, 2,4-D, BA, TDZ, MET, GA y CS. Tras 150 días se midieron sobrevivencia, porcentaje de inducción, diámetro, peso, textura del callo y su grado de desarrollo. En el cultivar Festival, el tratamiento T3 (3 mg L^{-1} 2,4-D + 0.5 mg L^{-1} BA) fue el más efectivo, logrando 96.3 % de sobrevivencia, 92.6 %de inducción, callos friables y buen desarrollo (61-80%). Para el cultivar CP-Jacona el tratamiento T2 (0.2 mg L^{-1} 2,4-D + 1 mg L^{-1} TDZ) mostró el mejor rendimiento, con 96.3% de sobrevivencia e inducción, callos friables y desarrollo en el mismo intervalo (61-80%). En ambos cultivares, los callos diferenciaron brotes utilizando medios específicos, en festival el MS + 1.5 mg L^{-1} 2,4-D + 0.25 mg L^{-1} BA y CP-Jacona el MS + 0.1 mg L^{-1} 2,4-D + 0.5 mg L^{-1} TDZ + 1 mg L^{-1} BA. Los protocolos específicos aplicados permitieron una inducción y diferenciación exitosa de callos organogénicos en fresa, representando una alternativa viable para su propagación y mejoramiento genético.

Palabras clave:

auxina, callogénesis, citoquinina, organogénesis indirecta, TDZ, 2,4 D.

License (open-access): Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia **Creative Commons**

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

Introducción

La fresa (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) es un cultivo de alto valor comercial, industrial y nutracéutico. En México, para 2023 se reportaron 15 267 ha cosechadas con 641 552 t, situando al país entre los principales productores y exportadores; destacan Michoacán, Guanajuato y Baja California.

Las exportaciones de fruta fresca superaron 184 000 t y 748 000 000 USD, con Estados Unidos de América como principal destino y demanda creciente también en Europa (USDA ERS, 2023; SIAP, 2025). La propagación tradicional por estolones, aunque común, es lenta, costosa y propensa a transmitir patógenos, afectando la uniformidad y el vigor de las plantas (Gaston *et al*., 2020).

En contraste, el cultivo *in vitro* permite micropropagación rápida, producción a gran escala y obtención de material libre de patógenos (Thorpe, 2007). La organogénesis de novo depende de fitohormonas exógenas (Duclercq *et al*., 2011; Ikeuchi *et al*., 2019). En *Arabidopsis thaliana* el callo se induce en un medio de inducción de callo (CIM, Callus Induction Medium) con una alta relación auxina/citoquinina y los brotes se inducen en un medio de inducción de brotes (SIM, Shoot Induction Medium) con relación inversa de estos reguladores (Skoog y Miller, 1957).

En fresa, la organogénesis indirecta vía callo ha sido ampliamente documentada en distintos cultivares y tipos de explante, siendo clave la proporción auxina-citoquinina: relaciones altas de auxina favorecen la callogénesis, mientras que proporciones mayores de citoquinina promueven la brotación (Palei *et al*., 2017; Liu *et al*., 2022). Combinaciones como 2,4-D + BA, NAA + BA y reguladores de fuerte actividad citocinínica como TDZ han mostrado altas tasas de inducción de brotes (Haddadi *et al*., 2013; Kaur *et al*., 2021; Suminar *et al*., 2024).

De forma paralela, mecanismos epigenéticos como la metilación del ADN y la remodelación de la cromatina regulan la desdiferenciación y la adquisición de competencia celular; inhibidores como la 5-azacitidina reducen la callogénesis y la regeneración, evidenciando que una cromatina más abierta es necesaria para la reprogramación (Lee *et al*., 2018; Liu *et al*., 2022).

En *Arabidopsis*, la pluripotencia durante la desdiferenciación surge de la interacción entre auxina, reprogramación transcripcional y remodelación cromatínica; la auxina, vía ARF-LBD, activa genes como PLT y WOX, estableciendo la competencia regenerativa (Sugimoto *et al*., 2010; Kareem *et al*., 2015; Lee y Seo, 2018). Este proceso se consolida mediante regulación epigenética dinámica (Ikeuchi *et al*., 2016; Ikeuchi *et al*., 2018).

En fresa, la callogénesis depende de la relación auxina/citocinina y del estado del explante (Passey *et al*., 2003; Debnath, 2006). El estudio evalúa cómo el CIM modula estas redes hormonales y epigenéticas variando distintas concentraciones de reguladores de crecimiento, polisacáridos hidrosolubles y fosfoproteínas en el medio para inducir callos a partir de hojas jóvenes de brotes *in vitro* de los cultivares festival y CP Jacona.



DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

Materiales y métodos

Selección del sitio de estudio

El estudio se realizó en el laboratorio de biotecnología y estructura de frutales del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, 2023-2025; 19.4605° latitud norte, 98.9030° longitud oeste y 2 250 msnm.

Material vegetal

Se utilizaron plántulas *in vitro* de *Fragaria* × *ananassa* cvs. festival y CP-Jacona obtenidas de ápices meristemáticos (~400 µm) de coronas de plantas hijas de invernadero. Los explantes se establecieron en medio MS (Murashige y Skoog, 1962) con 0.5 mg L^{-1} BA + 0.5 mg L^{-1} IBA, a 25±2 °C y fotoperiodo de 16 h luz 8 h oscuridad a 25 ±2 °C durante 30 días. La multiplicación de brotes se realizó en MS con 1 mg L^{-1} BA + 0.1 mg L^{-1} IBA realizando subcultivos mensuales durante ocho meses.

Inducción de callo (CIM

Para inducir callos se utilizaron segmentos foliares (~1 cm^2) colocados con la superficie abaxial en medio MS (100%) con combinaciones de auxinas (ANA, 2,4-D), citoquininas (BA, TDZ, metatopolina [MET]), arabinogalactano (GA) y caseína hidrolizada (CS).

Inducción de brotes (SIM

Los callos formados se transfirieron a medios de inducción de brotes (SIM). Para festival se utilizó MS (100%) con 1.5 mg L^{-1} de 2,4-D y 0.25 mg L^{-1} de BA; para CP-Jacona, MS (100%) con 0.1 mg L^{-1} de 2,4-D, 0.25 mg L^{-1} de TDZ y 1 mg L^{-1} de BA.

Tratamientos experimentales (CIM

Para la inducción de callos organogénicos en dos cultivares de fresa se evaluaron seis tratamientos: T1 (4 mg L^{-1} ANA + 0.4 mg L^{-1} MET + 1 mg L^{-1} GA + 50 mg L^{-1} CS), T2 (0.2 mg L^{-1} 2,4-D + 1 mg L^{-1} TDZ), T3 (3 mg L^{-1} 2,4-D + 0.5 mg L^{-1} BA), T4 (1 mg L^{-1} 2,4-D + 0.1 mg L^{-1} BA), T5 (2 mg L^{-1} ANA + 0.5 mg L^{-1} BA) y T6 (4 mg L^{-1} ANA + 0.4 mg L^{-1} BA + 1 mg L^{-1} GA +50 mg L^{-1} CS) (Karim *et al*., 2011; Palei *et al*., 2017; Roy *et al*., 2018).

Preparación de medios y condiciones de cultivo

El medio de cultivo se solidificó con agar (5 g L^{-1}) y sacarosa al 3% como fuente de carbono; el pH se ajustó a 5.7 antes de esterilizar en autoclave a 120 °C y 15 psi durante 20 min. En condiciones estériles, se colocaron cuatro segmentos foliares (1 cm^2) por caja de Petri con la superficie abaxial en contacto con el medio. Los explantes se incubaron en oscuridad a 25 ±2 °C por 120 días, con subcultivos mensuales; posteriormente se mantuvieron a fotoperiodo 16 h luz 8 h oscuridad con iluminación LED (92.1 µmol m^{-2} s^{-1}) por 30 días.

Diseño experimental

Se realizaron experimentos independientes por cultivar. El diseño experimental fue completamente al azar (DCA) con seis tratamientos y 27 repeticiones, evaluando un total de 162 unidades experimentales; cada unidad experimental correspondió a una caja de Petri con cuatro explantes foliares (~1 cm^2).

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

Medición de variables

Después de 150 días en los medios de cultivo se evaluaron las variables: supervivencia (%), inducción de callo (%), textura del callo (friable o compacto, %), grado de desarrollo (%) mediante una escala ordinal de cinco niveles (1-20, 21-40, 41-60, 61-80 y 81-100%), diámetro del callo (cm) medido con vernier de 150 mm (Adir®, modelo 11684) y peso fresco del callo (g) con una balanza analítica (ADAM®, modelo PW 254).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante Anova de efectos fijos y cuando hubo diferencias significativas, se aplicó la prueba de Tukey (α= 0.05) utilizando SAS® versión 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

Resultados y discusión

Se evaluó cómo distintos reguladores de crecimiento, con o sin GA y CS, influyen en la inducción y desarrollo de callos organogénicos a partir de hojas de los cultivares de fresa festival y CP-Jacona. Los resultados se presentan por variable de respuesta con su interpretación fisiológica y molecular.

Sobrevivencia e inducción de callogénesis

Los tratamientos T2 a T6 presentaron los mayores porcentajes de sobrevivencia (81.5-96.3%) e inducción de callo (77.7-96.3%) en ambos cultivares, sin diferencias significativas entre ellos (Figura 1 y 2). En contraste, T1 registró los valores más bajos para ambas variables.

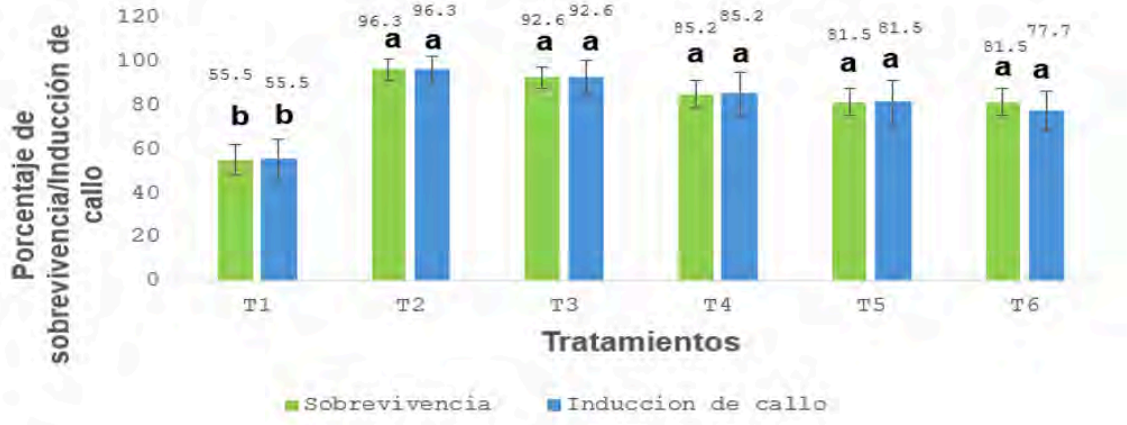
Figura 1. Porcentaje de sobrevivencia e inducción de callo del cultivar festival a los 150 días después de la aplicación de tratamientos. Barras con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey (p≤ 0.05).





DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

Figura 2. Porcentaje de sobrevivencia e inducción de callo del cultivar CP-Jacona a los 150 días después de la aplicación de tratamientos. Barras con letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey (p≤ 0.05).



Estos resultados sugieren que distintas combinaciones de auxinas (2,4-D o ANA) y citoquininas (BA o TDZ) pueden promover respuestas morfogénicas similares, siempre que se mantenga un balance hormonal adecuado para favorecer la desdiferenciación celular y la formación de callo.

La ausencia de diferencias entre los tratamientos T2, T3, T4, T5 y T6 indica que las concentraciones evaluadas de auxinas y citoquininas fueron suficientes para inducir una respuesta callogénica eficiente en los explantes foliares de fresa.

Aunque los tratamientos difirieron en el tipo y concentración de reguladores de crecimiento, todos mantuvieron una interacción auxina-citoquinina favorable para estimular la división celular y la proliferación de tejido callogénico.

Resultados similares han sido reportados en fresa, donde la respuesta morfogénica se atribuye a la elevada sensibilidad hormonal asociada con su naturaleza octoploide (Infante *et al*., 1998).

Resultados similares han sido reportados, donde diferentes combinaciones de auxinas y citocininas, como BAP e IBA, favorecieron la inducción de callo y la regeneración de brotes en explantes foliares de fresa (Yeasmin *et al*., 2022).

Asimismo, se ha reportado que combinaciones de 2,4-D con BA inducen la formación de callo compacto y favorecen la regeneración de brotes adventicios en fresa (Chomboon y Lohasupthawee, 2022), mientras que la combinación de 2,4-D y TDZ puede alcanzar tasas de inducción de callo cercanas al 100% en explantes foliares de *Fragaria vesca* (Chung y Ouyang, 2021).

Además del control hormonal, la desdiferenciación hacia callo requiere modificaciones epigenéticas, como la reprogramación de H3K27me3 y cambios en la metilación del ADN, esenciales para adquirir competencia celular (Ishihara *et al*., 2019). En este estudio, la caseína hidrolizada y las proteínas arabino galactano no mostraron efectos significativos, indicando que bajo las condiciones evaluadas el eje auxina-citoquinina es el principal regulador de la inducción de callo.

Crecimiento y desarrollo de los callos

Diámetro de callo

El mayor diámetro de callo se obtuvo en festival con T3 y en CP-Jacona con T2, respuesta atribuida a las diferencias en los genotipos (Cuadro 1). Resultados similares en *Fragaria* indican que combinaciones de auxina y citoquinina, especialmente aquellas que incluyen TDZ, incrementan el crecimiento por su alta actividad morfogénica (Landi y Mezzetti, 2006; Chung y Ouyang, 2021).

Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas
DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

Cuadro 1. Diámetro y peso de callo en los cultivares festival y CP-Jacona de *Fragaria × ananassa* Duch.

Tratamiento	Festival		Cp-Jacona	
	Diámetro (cm)	Peso (g)	Diámetro (cm)	Peso (g)
1	0.9 ±0.1 e	0.5 ±0.1 f	0.8 ±0.2 d	0.8 ±0.1 f
2	1.7 ±0.2 b	2.3 ±0.1 b	2.9 ±0.2 a	5.2 ±0.2 a
3	2.2 ±0.2 a	3.3 ±0.1 a	1.7 ±0.1 b	3.9 ±0.1 b
4	1.3 ±0.2 cd	1.2 ±0.1 d	1.4 ±0.2 b	2.9 ±0.1 d
5	1.7 ±0.3 bc	1.9 ±0.2 c	1.6 ±0.2 b	3.4 ±0.2 c
6	1.3 ±0.2 d	0.8 ±0.1 e	1.1 ±0.1 c	1.5 ±0.2 e

Valores expresados como media ± desviación estándar, son medias de seis tratamientos con 27 repeticiones y 162 explantes. Letras distintas dentro de la misma columna indican diferencias significativas (Tukey ($p \leq 0.05$).

Estos patrones concuerdan con reportes que señalan la eficacia de mezclas 2,4-D + BA en la acumulación de biomasa (Ara *et al*., 2012). En este estudio no se detectaron efectos positivos de caseína hidrolizada, goma arábiga ni de la MET bajo las condiciones evaluadas.

Peso de callo

El peso fresco fue mayor con T3 en el cultivar festival y T2 en CP-Jacona (Cuadro 1), indica que existe una respuesta diferencial a la sensibilidad hormonal debido a la constitución genética de las variedades. Resultados previos en fresa muestran incrementos de biomasa con combinaciones de auxina y TDZ, atribuibles a su estímulo proliferativo dependiente del genotipo (Cappelletti *et al*., 2016).

Textura de callo

La textura fue friable en ambos cultivares y en todos los tratamientos, rasgo asociado a alto potencial organogénico (Cuadro 1). En fresa, Biswas *et al*. (2007) observaron callos friables con 1 mg L^{-1} 2,4 D + 0.5 mg L^{-1} BA, destacando que la concentración de reguladores y el órgano de origen del explante inciden en la división celular y desdiferenciación que conducen a la friabilidad.

Grado de desarrollo de callo

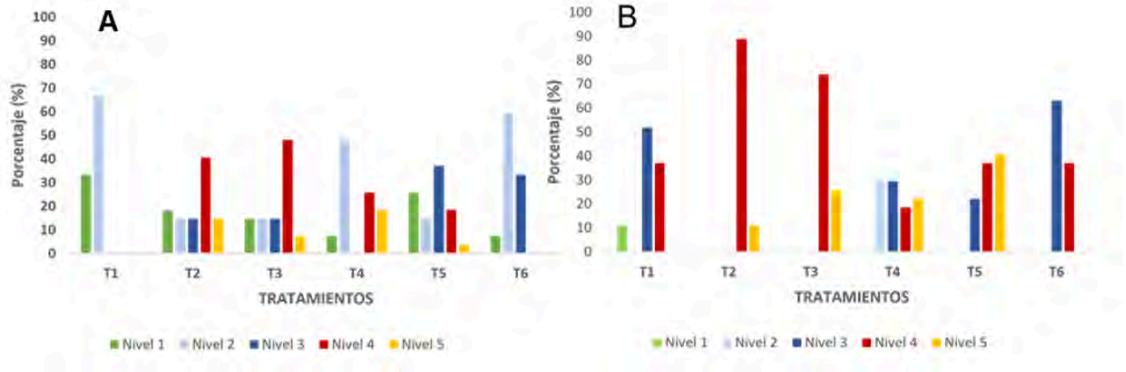
La Figura#3A y 3Bse muestra que en ambos cultivares el T2 y T3 lograron el mayor desarrollo de callo, esto es que se alcanzó más del 40% en festival y hasta 88% en CP-Jacona. En otros sistemas, combinaciones 2,4-D + BA favorecen este desarrollo al reducir la lignificación de pared celular y permitir mayor expansión del tejido (Riaz *et al*., 2016; Bollati *et al*., 2025).



Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

Figura 3. Grado de desarrollo de callo respecto al explante sembrado (%) en *Fragaria × ananassa* cvs. A) festival; y B) CP-Jacona a los 150 días después de la aplicación de tratamientos.



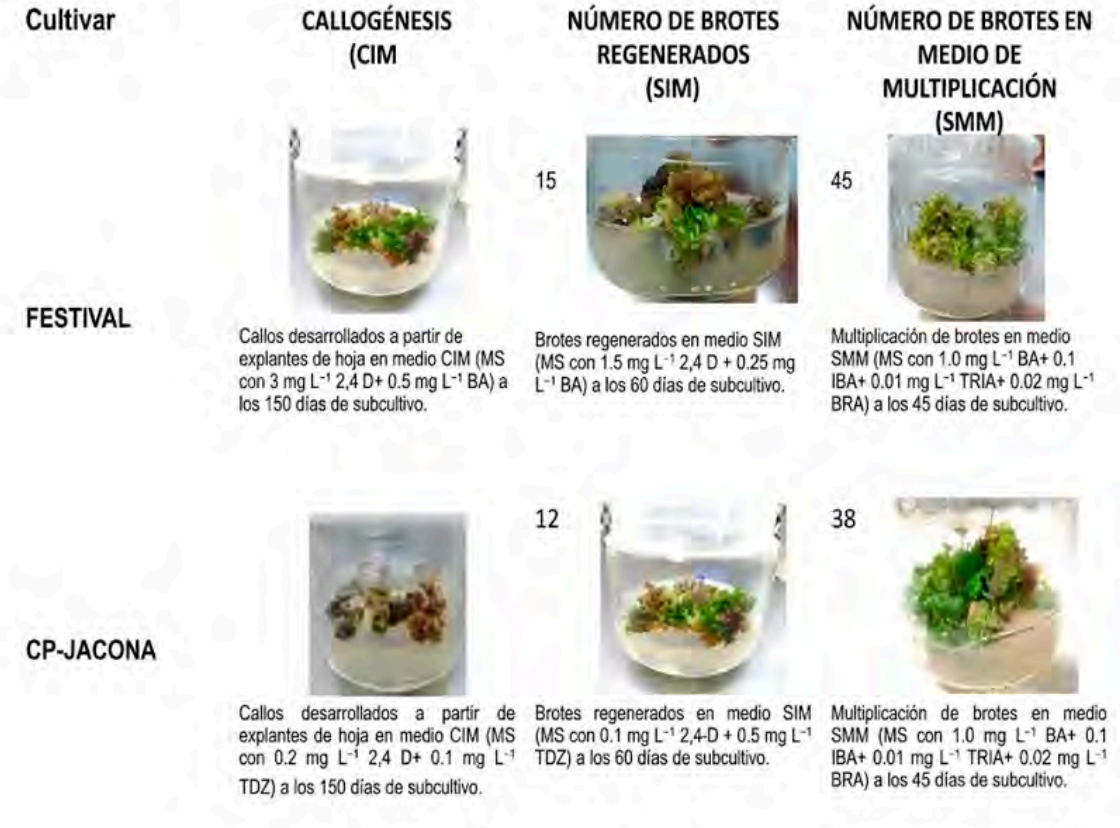
En este estudio, la fuerte actividad citocinínica del TDZ en T2 probablemente contribuyó al máximo desarrollo obtenido, indicando que la sinergia 2,4-D + TDZ/BA fue determinante bajo las condiciones evaluadas.

Los resultados muestran que la respuesta morfogénica en fresa depende de la interacción entre auxinas, citoquininas y el genotipo (Figura#4). Las combinaciones 2,4-D + TDZ (T2) y 2,4D + BA (T3) fueron las más eficientes para lograr alta sobrevivencia, inducción, desarrollo y biomasa de callos friables, consolidándose como estrategias robustas para regeneración *in vitro*.



DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

Figura 4. Muestra la formación de masas celulares (callos), la diferenciación de brotes adventicios y el desarrollo de nuevas plántulas de dos cultivares de fresa. Procesos regulados por hormonas vegetales y el tipo de medio de cultivo.



CS y AGP no mostraron efectos bajo estas condiciones, indicando que el control hormonal es el factor predominante. Mecanísticamente, la auxina impulsa la desdiferenciación, mientras la citoquinina mantiene la competencia organogénica mediante la accesibilidad de genes de identidad del brote, en coordinación con ajustes epigenéticos como H3K27me3 y metilación del ADN (Ishihara *et al*., 2019).

Las diferencias entre cultivares sugieren que CP-Jacona responde mejor a un tono citocinínico alto, mientras festival se beneficia de mayor auxina + BA, en concordancia con la plasticidad hormonal previamente descrita en fresa (Haddadi *et al*., 2013; Palei *et al*., 2017; Liu *et al*., 2022).

Conclusiones

T2 (2,4-D + TDZ) y T3 (2,4-D + BA) fueron los tratamientos más eficientes, con alta supervivencia, fuerte inducción y mayor biomasa, mostrando respuesta genotipo-dependiente: festival optimizó con T3 y CP-Jacona con T2. La auxina impulsa la desdiferenciación y la citoquinina mantiene la competencia organogénica, apoyadas por la reprogramación epigenética que restaura la pluripotencia celular. GA y CS no tuvieron efecto bajo estas condiciones.

Agradecimientos

PVF agradece a SECIHTI por la beca de doctorado durante la realización de este proyecto.

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

Bibliografía

1 Ara, T.; Karim, R.; Karim, M. R.; Islam, R. and Hossain, M. 2012. Callus induction and shoot regeneration in strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.). International Journal of Biosciences. 10(2):93-100. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:86274616.

2 Bollati, S. A.; Pérez-da Graça, J.; Silvente, S. T. and Conci, V. C. 2025. Optimization of culture media and environmental conditions for somatic embryogenesis in olive (*Olea europaea* L.) cultivars 'Arbequina' and 'Picual'. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 24(4):1-14. https://doi.org/10.1007/s44447-025-00037-4.

3 Biswas, M. K.; Islam, R. and Hossain, M. 2007. Somatic embryogenesis in strawberry (*Fragaria* sp.) through callus culture. Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 90(1):49-54. https://doi.org/10.1007/s11240-007-9247-y.

4 Cappelletti, R.; Sabbadini, S. and Mezzetti, B. 2016. The use of TDZ for the efficient *in vitro* regeneration and organogenesis of strawberry and blueberry cultivars. Scientia Horticulturae. 207:117-124. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.05.016.

5 Chomboon, P. and Lohasupthawee, P. 2022. Mass propagation system of strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) microshoots by liquid shake culture. Current Applied Science and Technology. 22(1):1-12. https://doi.org/10.55003/cast.2022.01.22.008.

6 Chung, H. H. and Ouyang, H. Y. 2021. Use of thidiazuron for high-frequency callus induction and organogenesis of wild strawberry (*Fragaria vesca*). Plants. 10(1):67. https://doi.org/10.3390/plants10010067.

7 Debnath, S. C. 2006. Strawberry sepal: another explant for thidiazuron-induced adventitious shoot regeneration. In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant. 41(5):671-676. https://doi.org/10.1079/ivp2005688.

8 Duclercq, J.; Sangwan-Norreel, B.; Catterou, M. and Sangwan, R. S. 2011. De Novo shoot organogenesis. Trends in Plant Science. 16(11):597-606. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.08.004.

9 Gaston, A.; Osorio, S.; Denoyes, B. and Rothan, C. 2020. Applying the Solanaceae strategies to strawberry crop improvement. Trends in Plant Science. 25(2):130-140. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.10.003.

10 Haddadi, F.; Abd-Aziz, M.; Kamaladini, H. and Ravanfar, S. A. 2013. Thidiazuron- and zeatin-induced high-frequency shoot regeneration from leaf and shoot-tip explants of strawberry. HortTechnology. 23(3):276-281. https://doi.org/10.21273/horttech.23.3.276.

11 Ikeuchi, M.; Ogawa, Y.; Iwase, A. and Sugimoto, K. 2016. Plant regeneration: cellular origins and molecular mechanisms. Development. 143(9):1442-1451. https://doi.org/10.1242/dev.134668.

12 Ikeuchi, M.; Shibata, M. and Rymen, B. 2018. A gene regulatory network for cellular reprogramming in plant regeneration. Plant Cell Physiol. 59(4):770-782.

13 Ikeuchi, M.; Favero, D. S.; Sakamoto, Y.; Iwase, A.; Coleman, D.; Rymen, B. and Sugimoto, K. 2019. Molecular Mechanisms of Plant Regeneration. Annual Review of Plant Biology. 70(1):377-406. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100434.

14 Infante, R.; Mazzara, M. and Rosati, P. 1998. Growth estimation of *in vitro* cultured callus and plant regeneration from leaf disk and petiole callus of musk strawberry (*Fragaria moschata* Duch.) Journal of the Japanese Society for Horticultural Science. 67(1):39-43. https://doi.org/10.2503/jjshs.67.39.

15 Ishihara, H.; Sugimoto, K. and Tarr, P. T. 2019. Primed histone demethylation regulates shoot regenerative competency. Nat. Commun. 10(1):1786. https://doi.org/10.1038/s41467-019-09386-5.

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

16 Kareem, A.; Durgaprasad, K.; Sugimoto, K.; Du, Y.; Pulianmackal, A. J.; Trivedi, Z. B.; Abhayadev, P. V.; Pinon, V.; Meyerowitz, E. M.; Scheres, B. and Prasad, K. 2015. Plethora genes control regeneration by a two-step mechanism. Current Biology. 25(8):1017-1030. https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.02.022.

17 Karim, M. R.; Aziz, M. A.; Roy, U. K.; Hoque, M. A. and Hossain, M. M. 2011. *In vitro* response of strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) for callus induction and shoot regeneration. International Journal of Agronomy and Agricultural Research. 1(1):29-36. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:86188503.

18 Kaur, H.; Chahil, B. S. and Kaur, J. 2021. *In vitro* protocol standardization for growth and rooting in strawberries. Journal of Krishi Vigyan. 9(1):193-201. https://doi.org/10.5958/2349-4433.2020.00158.0.

19 Landi, L. and Mezzetti, B. 2006. TDZ, auxin and genotype effects on leaf organogenesis in *Fragaria*. Plant Cell Reports. 25(4):281-288. https://doi.org/10.1007/s00299-005-0066-5.

20 Lee, K.; Park, O. S. and Seo, P. J. 2018. JMJ30#mediated demethylation of H3K9me3 drives tissue identity changes to promote callus formation in *Arabidopsis*. The Plant Journal. 95(6):961-975. https://doi.org/10.1111/tpj.14002.

21 Lee, K. and Seo, P. J. 2018. Dynamic epigenetic changes during plant regeneration. Trends Plant Science. 23(3):235-247. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.11.009.

22 Liu, D.; Mu, Q.; Li, X.; Xu, S.; Li, Y. and Gu, T. 2022. The callus formation capacity of strawberry leaf explant is modulated by DNA methylation. Horticulture Research. 9(1):1-12. https://doi.org/10.1093/hr/uhab073.

23 Murashige, T. and Skoog, F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. Physiologia Plantarum. 15(3):473-497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.

24 Palei, S.; Rout, G. R.; Das, A. K. and Dash, D. K. 2017. Callus induction and indirect regeneration of strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) cv. Chandler. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 6(11):1311-1318. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.611.157.

25 Passey, A.; Barrett, K. and James, D. 2003. Adventitious shoot regeneration from seven commercial strawberry cultivars (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) using a range of explant types. Plant Cell Reports. 21(5):397-401. https://doi.org/10.1007/s00299-002-0530-4.

26 Riaz, S.; Shah, A. H. and Ali, Q. 2016. Study of dichlorophenoxyacetic acid and 6-benzylaminopurine effects on callus development in *Cucurbita moschata*. Molecular Plant Breeding. 7(3):1-12. https://epe.lac-bac.gc.ca/100/201/300/molecular-plant-breeding/2016/2016v7n03.pdf?nodisclaimer=1.

27 Rodríguez-Beraud, M. M.; Latsague-Vidal, M. I.; Chacón-Fuentes, M. A. and Astorga-Brevis, P. K. 2014. Inducción *in vitro* de callogénesis y organogénesis indirecta en *Ugni molinae*. Bosque. 35(1):111-118. https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000100011.

28 Roy, T.; Al Mamun, S. A. and Islam, M. M. 2018. *In vitro* propagation of two strawberry cultivars of Bangladesh. Archives of Agriculture and Environmental Science. 3(4):382-387. https://doi.org/10.26832/24566632.2018.030409.

29 SIAP. 2025. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. Avance de siembras y cosechas, resumen nacional. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre-agricola/.

30 Skoog, F. and Miller, C. O. 1957. Chemical regulation of growth and organ formation in plant tissues cultured *in vitro*. Symp. Soc. Exp. Biol. 11:118-130.

31 Suminar, E.; Rahmawati, V.; Sumadi, S. and Nuraini, A. 2024. *In vitro* multiplication of strawberry in various types and concentrations of cytokinins and auxins. Journal Kultivasi. 23(1):1-7. https://doi.org/10.24198/kultivasi.v23i1.42727.

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

32 Sugimoto, K.; Jiao, Y. and Meyerowitz, E. M. 2010. *Arabidopsis* regeneration from multiple tissues occurs via a root development pathway. Developmental Cell. 18(3):463-471. https://doi.org/10.1016/j.devcel.2010.02.004.

33 Thorpe, T. A. 2007. History of plant tissue culture. Molecular Biotechnology. 37(2):169-180. https://doi.org/10.1007/s12033-007-0031-3.

34 USDA. 2023. United States Department of Agriculture. Fruit and Tree Nuts Outlook: September 2023, FTS-376, Economic Research Service. https://esmis.nal.usda.gov/sites/default/releasefiles/h989r3203/8w32sj61n/0p097n143/FTS-376.pdf.

35 Yeasmin, S.; Banu, T. A.; Goswami, B.; Hasan-Sarkar, M. M.; Jahan, I.; Habib, A.; Khan, S. and Akter, S. 2022. *In vitro* regeneration of strawberry plant from leaf explants via callus induction. Plant Tissue Culture and Biotechnology. 32(1):67-75. https://doi.org/10.3329/ptcb.v32i1.60473.



Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4188

Modulación auxina-citocinina para optimizar la morfogénesis en explantes de *Fragaria × ananassa* Duch.

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 July 2026
Date accepted: 01 October 2026
Publication date: 07 November 2026
Publication date: 2026
Volume: 17
Issue: 7
Electronic Location Identifier: e4188
DOI: 10.29312/remexca.v17i7.4188

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

auxina
callogénesis
citoquinina
organogénesis indirecta
TDZ
2,4 D

Counts

Figures: 4
Tables: 1
Equations: 0
References: 35