

El Cempoalxóchitl: historia, presente y perspectivas

Sánchez-Millán José L.^{1,2,3,4,5}, Gutiérrez-Cortes Elsa¹, Heredia-Barbero Alejandro⁶, Chávez-Martínez Ana I.⁷, Palacios-Martínez Janet⁷, Luis Cárdenas⁷ ♦

¹Departamento de investigación y posgrado

²Departamento de Matemáticas

³Centro de Enseñanza Agropecuaria

⁴Departamento de Ciencias Pecuarias

⁵Departamento de Ciencias Biológicas, departamentos de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

⁶Instituto de Ciencias Nucleares

⁷Instituto de Biotecnología; todas dependencias académico-científicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

♦ Correspondencia: luis.cardenas@ibt.unam.mx

Área Temática:
Ciencia de las Plantas

Recibido: 15 enero, 2025
Aceptado: 14 marzo, 2025
Publicado: 31 julio, 2025

Cita: Sánchez-Millán JL, Gutiérrez-Cortes E, Heredia-Barbero A, Chávez-Martínez AI, Palacios-Martínez J y Cárdenas L. 2025. El Cempoalxóchitl: historia, presente y perspectivas. *Bioc Scientia* 1(2). <https://doi.org/10.63622/RBS.2504>



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Resumen: El cempoalxóchitl (*Tagetes erecta*) es una planta endémica de México con un gran potencial y múltiples aplicaciones entre las que se encuentran: la ornamental, la terapéutica, la agroindustrial y la tecnológica. Desde sus primeros reportes en el siglo XV, el cempoalxóchitl ha sido naturalizada en diferentes zonas subtropicales del mundo. Los carotenoides son de los principales metabolitos presentes en *T. erecta*. Estos son compuestos lipofílicos e hidrofóbicos, generalmente constituidos por un esqueleto hidrocarbonado de 40 átomos y en las plantas están involucrados en el desarrollo y la respuesta al estrés. El desarrollo de las ómicas para generar estrategias que permitan incrementar el rendimiento y/o producción en los niveles de estos metabolitos en *T. erecta*, puede ser una solución para lograr cubrir la demanda y posicionar a México como un líder en la producción de carotenoides. Así mismo, esto permitirá el desarrollo de tecnologías más sostenibles mediante el uso de *T. erecta*.

Palabras clave: Cempoalxóchitl, *Tagetes erecta*, México, carotenoides, flor, industria.

Abstract: The cempoalxóchitl (*Tagetes erecta*) is a plant endemic to Mexico with a great potential and multiple applications, including ornamental, therapeutic, agro-industrial and technological applications. Since its first reports in the 15th century, cempoalxóchitl has been naturalized in different subtropical areas of the world. Carotenoids are among the most important metabolites present in *T. erecta*. These are lipophilic and hydrophobic compounds, generally composed of a hydrocarbon skeleton of 40 atoms, among its roles it has been described in development and stress responses. The development of omics approaches to generate strategies to increase the yield and/or production levels of these metabolites in *T. erecta* could be a solution to meet the demand and position Mexico as a leader in the production of carotenoids. This will also allow the development of more sustainable technologies through the use of *T. erecta*.

Keywords: Cempoalxóchitl, *Tagetes erecta*, Mexico, carotenoids, flower, industry.

INTRODUCCIÓN

Origen y diversidad de la flor de cempoalxóchitl

El cempoalxóchitl (del náhuatl *cempoalli* que hace referencia al número 20 y *xochitl* flor), es una planta endémica de México. Se considera que los aztecas fueron los primeros en atribuirle propiedades medicinales, por lo que su uso se diseminó hacia América central y Sudamérica. El primer reporte del cempoalxóchitl data de 1552 plasmado en el “Herbal Azteca De La Crus-Badiano” (Gupta et al., 2022). Tiempo después fue descrita por el fraile franciscano Bernardino de Sahagún en el Códice Florentino la flor de cempoalxóchitl (Figura 1) e introducida en Europa en el siglo XVI. Posteriormente, las semillas de cempoalxóchitl fueron transportadas al norte de África, donde fue naturalizada y a finales del siglo XVI fue introducida en la India proveniente de Portugal (Shukla y Thakur 2018).



Figura 1. Flores de cempoalxóchitl en el Códice Florentino. Se observa una copia del Códice Florentino “Estas flores que se llaman cempoalxóchitl son amarillas y de buen olor, y hermosas. Hay muchas de ellas que ellas se nacen y otras que las siembran en los huertos. Son de dos maneras: unas que llaman hembras cempoalxóchitl, y son grandes y hermosas; otras hay que se llaman macho cempoalxóchitl: no son tan hermosas ni tan grandes”. Códice Florentino Folio 186v, 1577.

Esta especie se desarrolla en diversos tipos de ecosistemas que abarcan desde bosques tropicales caducifolios, bosques espinosos, bosques nubosos y bosques de pino-encino, a altitudes que van desde los 800 hasta los 2300 metros (Heyden, 1987). Actualmente, se ha introducido como especie cultivada en China, India, Zambia, Sudáfrica y Australia (Gupta et al., 2022).

En México, debido a su amplia distribución y presencia en el país, se le han atribuido diferentes nombres entre los que se encuentran: Flor de muerto;

Cempoalxóchitl (náhuatl): flor de veinte pétalos; Cepazuchilt, cempasochil, cempoal, flor de cempoal, flor de cempoaxóchitl, flor de difunto, flor de muerto chino, flor de niño, veinte flores; Distrito Federal: cempoalxóchitl (náhuatl); Estado de México: tecacaya, zempoalxochitl; Guerrero: yita cua (mixteco); Michoacán: tiringuin-tztzuki; Nayarit: púua (cora); Oaxaca: pikna'a pojy, pikon'kpojy (huave), li mi ñe, zempazuchil; Puebla: calpuxham, kgalhpuxan (totonaco), chant (tepehua), cempaxochitl, copalxuitl (náhuatl); Tlaxcala: zempalzuchilt; Veracruz: kalpuxum, xempasochitl; Yucatán: ts'uul xpujuk, xpa'ajuk, xpayjul; San Luis Potosí: k'uchid huitz, santorum huitz (tenek).

El nombre científico del cempoalxóchitl es *Tagetes erecta*. *Tagetes* pertenece a la familia Asteraceae y está constituido por alrededor de 55 especies de plantas herbáceas anuales o perennes (Serrato-Cruz et al., 2008). Esta planta ramificada puede llegar a medir aproximadamente 1.5 m de altura y presentar distintas formas de inflorescencias. Estas pueden estar conformadas por varios tipos de flores, como las flores liguladas (hembras) o sin ligulas (hermafroditas). El arreglo de estas flores va desde inflorescencias con solo un anillo exterior de flores liguladas (hembras) y en su centro presencia de flores hermafroditas tubuladas, inflorescencias que presentan varios anillos de flores liguladas y pocas flores tubuladas hermafroditas en el centro, hasta las que solo presentan flores hembra sin presencia de fuentes de polen (Figura 2 A y B).



Figura 2. Fotos de inflorescencias de cempoalxóchitl. Se presentan distintos tipos de inflorescencias de cempoalxóchitl. En el panel A, se presenta una inflorescencia con un solo anillo de lígulas y en el centro se encuentran flores tubuladas sin lígulas hermafroditas. En el B, una inflorescencia de flores hembras con lígulas (se ha descrito un tipo de inflorescencias hembras sin lígulas) (fotografías del autor).

Aplicaciones de *T. erecta*

T. erecta es una planta ornamental y medicinal que sintetiza metabolitos con un amplio rango de actividad farmacológica, la cual incluye actividad antibacterial, diurética, anti-inflamatoria, antioxidante, hepatoprotectora, antiepiléptica,

anticancerígena, antiparasitaria (Singh et al., 2020). Además, en ensayos *in vitro* se ha demostrado que el extracto de *T. erecta* presenta una gran actividad antioxidante, antidiabética y antilipémica, al inhibir a la α -glucosidasa, la α -amilasa y la lipasa pancreática (Wang et al., 2016). Particularmente la luteína y la zeaxantina, son dos moléculas con propiedades antioxidantes que benefician la salud visual y ayudan a prevenir enfermedades en humanos (Wang et al., 2023). Además, los metabolitos secundarios derivados de *T. erecta* han sido utilizados como aditivos por la industria agroalimentaria para brindar color a los alimentos, aumentar su vida de anaquel y además por sus propiedades nutrimentales. Por ejemplo, se ha reportado que la adición de extractos de *T. erecta* retrasa considerablemente la presencia de radicales libres durante la extracción de aceite de soya (Huang et al., 2022).

Composición bioquímica de *T. erecta*

Las plantas de *T. erecta* son ampliamente cultivadas por su rol ornamental y medicinal, sin embargo, sus usos se han ampliado gracias a diversos estudios que han aportado información respecto a su composición bioquímica. Los metabolitos secundarios presentes en *T. erecta* varían en función del genotipo, las condiciones de crecimiento y el tejido del que se trate (Park et al., 2017). Por ejemplo, el análisis fitoquímico de plantas de *T. erecta* reveló la presencia de cumarinas solo detectadas en hojas, mientras que la presencia de esteroides solo se detectó en las flores (Camacho-Campos et al., 2018). Particularmente de las flores de estas plantas se han aislado hasta 22 compuestos los cuales son: β -sitosterol, daucosterol, 7 β -hidroxisitosterol, eritrodiol-3-palmitato, lupeol, eritrodiol, 1-[5-(1-propin-1-il)-[2, 2-bitiofeno]-5-il]-etanona, α -tercentilo, quercetagetina, quercetagetina-7-metiléter, quercetagetina-7-O-glucósido, kaempferol, ácido siríngico, ácido gálico, ácido 3- α -galactosil disiríngico, ácido 3- β -galactosil disiríngico, 6-etoxi-2, 4-dimetilquinolina, oplodiol, (3S, 6R, 7E)-hidroxi-4,7-megastigmadien-9-ona, palmitina, glicolinoleato de etileno y n-hexadecano (Singh et al., 2020). Entre los diferentes componentes aislados (flavonoides, ácidos fenólicos, tiofenos), los carotenoides son los mayores constituyentes del extracto de las flores de *T. erecta*.

Generalidades y ruta biosintética de los carotenoides

Los carotenoides son compuestos lipofílicos e hidrofóbicos y su estructura usualmente consiste en una cadena de polieno, la cual posee nueve dobles enlaces conjugados con un grupo terminal a cada extremo de la cadena. Estos compuestos generalmente están constituidos por ocho unidades de isopreno formando un esqueleto hidrocarbonado de 40 átomos. Sin embargo, en algunos organismos como *Haloarcula japonica* se ha detectado la presencia de carotenoides de hasta 50 átomos (Yatsunami et al., 2014). Por otro lado, también se han detectado los apocarotenoides de cadena corta (<C40), generados por la escisión oxidativa de dobles enlaces específicos (Figura 3) (Zhang et al., 2020).

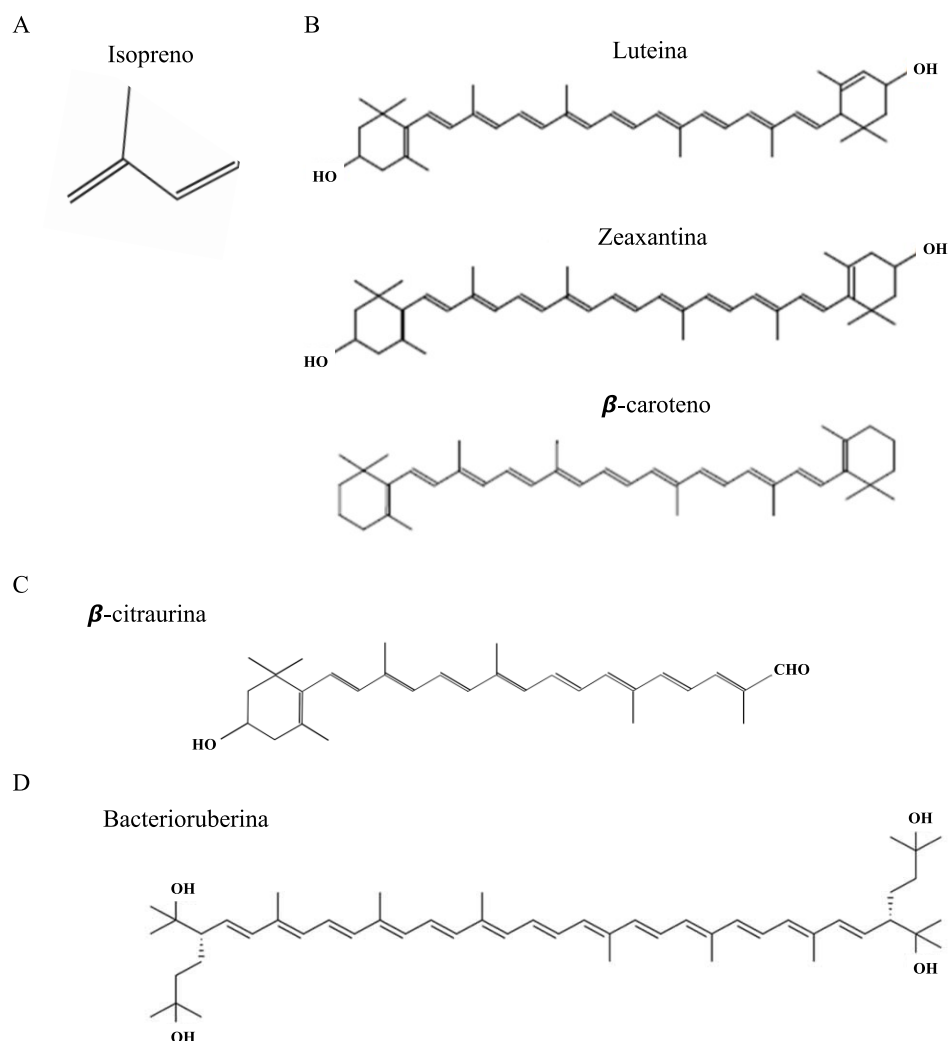


Figura 3. Estructuras químicas de los carotenoides. **A.** Estructura química del isopreno, unidad fundamental de los carotenoides. **B.** Estructura química de los tres principales carotenoides de 40 carbonos a partir de las inflorescencias del cempoalxóchitl, la luteína, zeaxantina y el β -caroteno. **C.** Estructura química de la β -citraurina, apocarotenoides de 30 carbonos presente en cítricos. **D.** Estructura química de la bacterioruberina, carotenoides de 50 carbonos presente en *Haloarcula japonica* (modificado de Millan, 2010)

Los carotenoides están distribuidos en una amplia variedad de organismos, entre los que se encuentran algunas microalgas, hongos, bacterias y plantas. En las plantas, la acumulación de carotenoides se ha detectado en los cloroplastos y los cromoplastos, y su presencia está relacionada a la fotoprotección, la absorción de la luz, las reacciones redox, la resistencia a estrés abiótico, la polinización y la germinación de las semillas (Galpaz et al., 2006; Kolašinac et al. 2021). Además, la degradación de los carotenoides conlleva a la generación de compuestos volátiles, estrigolactonas y la fitohormona ácido abscísico (ABA) (Zhang et al., 2020). Estos compuestos pueden clasificarse en dos grupos dependiendo de su función: las

xantofilas, que contienen oxígeno e incluyen a la luteína y la zeaxantina y los carotenos como el α -caroteno, el β -caroteno y el licopeno (Figura 3). Sin embargo, la gran diversidad de los carotenoides está dada por las diferencias en su estructura, como son: el desplazamiento de dobles enlaces conjugados y la adición de grupos funcionales en los anillos terminales de la molécula. Los carotenoides fueron aislados por primera vez en 1999 mediante la saponificación del extracto de flores de *T. erecta* (Hadden et al., 1999).

En las plantas, la ruta biosintética de los carotenoides comienza con la condensación del geranilgeranilpirofosfato (GGPP), el cual es un precursor de la vía del 2-C-metil-D-eritritol-4-fosfato (MEP), que por acción de cuatro enzimas: la 1-deoxilulosa-5-fosfato sintasa (DXS), la 1-deoxilulosa-5-fosfato reductasa (DXR), la geranilgeranil pirofosfato sintasa (GGPPS) y la fitoeno sintasa (PSY) dan lugar a la formación del fitoeno (compuesto incoloro). A continuación, ocurren cuatro reacciones subsecuentes mediadas por la fitoeno desaturasa (PDS), la 15-cis- ζ -caroteno isomerasa (Z-ISO), la ζ -caroteno desaturasa (ZDS) y la caroteno isomerasa (CRTISO) para la conversión del fitoeno en licopeno (pigmento rojo). Posteriormente, el licopeno puede dirigirse hacia dos vías, por un lado, la β -ciclase (LCY- β) y la ϵ -cyclase (LCY- ϵ) conllevan a la formación de α -caroteno para posteriormente, por acción de la β -hidroxilasa (HYD- β) y la ϵ -hidroxilasa (HYD- ϵ), formar la luteína. Mientras que en la otra vía el licopeno es llevado a la formación de β -caroteno mediada por la LCY- β y que deriva en la formación de las xantofilas zeaxantina, violaxantina y neoxantina (Zhang et al., 2020) (Figura 4 A).

Las ciencias ómicas aplicadas en la biotecnología: Genomas y transcriptomas del cempoalxóchitl

Recientemente se publicó el genoma de dos variedades de cempoalxóchitl. El primer genoma se secuenció a partir del tejido foliar de la variedad mexicana V-01 de *T. erecta*, los datos genómicos se identifican en NCBI con el código GCA_026213115.1 publicado por la Universidad de Agricultura de China (Xin et al., 2023). A partir de este genoma se estimó un tamaño de 621.2 Mb distribuido en 12 cromosomas. Respecto al segundo genoma, este se identificó con código GCA_030867185.1 publicado por el Instituto de Agricultura y Genómica de Shenzhen, China. Este se realizó a partir de tejido foliar de la variedad WSJ de un cultivo ubicado en Guangdong, China. De acuerdo con el análisis de los datos genómicos, el tamaño estimado es de 778.9 Mb en 12 cromosomas (Jiang et al., 2023). La tecnología de secuenciación usada para analizar ambos genomas fue PacBio, esta tecnología ofrece un análisis de cobertura y profundidad amplio, lo que permite generar lecturas de mayor longitud, y aumenta significativamente las probabilidades de realizar un ensamble *de novo* del genoma y con mayor calidad.

Dentro de las características que se han ponderado en el uso comercial de *T. erecta*, está la producción de carotenoides. En este sentido, se han considerado dos características importantes de las inflorescencias, una es el número de inflorescencias y la segunda es la concentración de carotenoides. Respecto al número y desarrollo de inflorescencias, se realizó un análisis de los genomas de *T. erecta* en el que se identificó la familia de los genes que codifican para los factores de transcripción MADS-box (Liu et al., 2024). Esta familia de genes se ha relacionado con el crecimiento y desarrollo de las inflorescencias, el tiempo de floración, la arquitectura de la flor y la identidad de los órganos florales. De manera específica, la familia de genes MADS-box son cruciales para la formación del complejo floral del clado Asteraceae. Se identificaron 65 genes MADS-box en el genoma de *T. erecta*, distribuidos en los 12 cromosomas (Liu et al., 2024). El análisis de la expresión de los genes reveló patrones específicos en cada órgano, lo que permitió identificar 34 genes relacionados con el desarrollo de los órganos florales. De los cuales, cuatro genes se expresaron específicamente sólo en los pétalos y 20 mayormente en los estambres (Liu et al., 2024). Los autores sugieren que sus resultados podrían estar relacionados con la formación de diferentes tipos de flor. Además, de que este análisis exhaustivo contribuye con el conocimiento acerca del desarrollo de los órganos florales de la familia Asteraceae (Liu et al., 2024).

Debido a la importancia económica que representa el colorante que se sintetiza en las inflorescencias y a que este es producido por los carotenos, el énfasis de los análisis ómicos ha sido identificar las vías metabólicas involucradas en la producción de carotenos. En este sentido, se han generado repositorios ómicos con datos de los paisajes transcripcionales y metabólicos durante las etapas de la floración. En el 2018, se realizó un primer análisis del paisaje transcripcional con la tecnología de Illumina HiSeq 2000 del tejido floral de *T. erecta*, en el que se ensamblaron un total de 72,499 unigenes, de los cuales 34,892, es decir, el 48% fueron anotados en Swiss-Prot/Pfam (www.uniprot.org/), GO (Gene Ontology) (www.geneontology.org/) y KEGG (Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes) (www.genome.jp/kegg/). Se identificaron 11,721 genes expresados diferencialmente en hojas, tejido floral inmaduro y maduro. Los genes expresados diferencialmente en el tejido floral estuvieron involucrados principalmente en la fotosíntesis y la biosíntesis de metabolitos secundarios. Además, se determinaron los unigenes relacionados con la biosíntesis de los carotenoides, los cuales también se validaron por RT-qPCR (Feng et al., 2018). Los resultados sugieren que la expresión diferencial de los genes involucrados en la biosíntesis de carotenoides podría explicar el alto contenido de pigmento en *T. erecta* (Feng et al., 2018).

En un segundo análisis de los paisajes transcripcionales y metabolómicos, se identificaron los transcritos con expresión diferencial y las vías metabólicas involucradas en la producción de carotenos en dos líneas; la mutante V-01 de pétalos color naranja y una mutante natural con pétalos amarillos V-01M (Zhang et al., 2020). Es importante mencionar que, a partir de los datos de los perfiles

transcripcionales de la vía de biosíntesis de los carotenoides, construimos un gráfico de tipo heatmap, con los perfiles transcripcionales de los elementos más importantes de la vía de biosíntesis (Figura 4 B). De acuerdo con los resultados, se identificaron las enzimas y sus perfiles de expresión involucradas en la biosíntesis, transporte y degradación de carotenoides que estuvieron reguladas diferencialmente en ambas líneas. Inicialmente, se identificaron las enzimas que catalizan la conversión de fitoeno en licopeno (Figura 4 A) (Zhang et al., 2020). En el análisis transcriptómico y metabolómico se identificaron las enzimas involucradas en la fase catalítica; la PDS, la Z-ISO, la ZDS y la CRTISO, que fueron reguladas positivamente de manera significativa en las etapas III y IV (Zhang et al., 2020). De manera consistente, LCY- β , LCY- ϵ , HYD- β y HYD- ϵ se regularon positivamente en las etapas III y IV (Figura 4 A) (Zhang et al., 2020).

La inducción en la expresión de los genes de la biosíntesis de carotenoides está relacionada con el aumento en la pigmentación de las flores en las etapas de desarrollo III y IV, durante la expansión de los pétalos. Tanto V-01 como V-01M tuvieron un patrón de expresión similar de estos genes. Sin embargo, los genes que codifican para las enzimas de degradación de carotenoides se expresan de manera diferencial entre V-01 y V-01M (Zhang et al., 2020). Este resultado sugiere que la vía de síntesis de carotenoides se mantiene inducida en ambas líneas, sin embargo, la vía de degradación de los carotenoides está sobreexpresada en la línea V-01 y bajamente expresada en la línea mutante V-01M (Zhang et al., 2020). En otras palabras, en ambas líneas se sintetizan los carotenoides de manera similar, pero en la línea V-01 se degradan más rápido que en la mutante V-01M (Figura 4 A y B).

Estos resultados son consistentes de acuerdo con otro análisis ómico realizado en tres variedades de *T. erecta*, en el que se identificó un mayor contenido de luteína, en la variedad 'Juwang' de flor naranja y 'Taishan' de color amarillo anaranjado, que en la variedad de flor amarilla 'Quanwang'. Las variedades 'Juwang' 'Taishan' mostraron una significativa sobreexpresión de genes en la vía de biosíntesis de carotenoides, especialmente la PDS, la PSY y la ZDS, mientras que los genes que codifican las enzimas de escisión de carotenoides CCD se regularon bajamente durante el desarrollo de la inflorescencia en la variedad con mayor contenido de luteína 'Juwang'. Además, se aislaron tres genes *TePDS*, *TePSYS3* y *TeZDS* y se transformaron en tomate (Qiu et al., 2024). La sobreexpresión de *TePDS* o *TeZDS* resultó en la promoción de la maduración de la fruta y la acumulación de carotenoides en las líneas transgénicas. Por otro lado, *TePSYS3* de *T. erecta* mostró múltiples efectos, no solo en la biosíntesis de carotenoides de la fruta sino también en los patrones de pigmentación en los tejidos vegetativos y en el crecimiento de la planta (Qiu et al., 2024). En conjunto, las variaciones en los perfiles de expresión de los genes biosintéticos contribuyen con el cambio dinámico de los niveles de carotenoides y a la diversidad de coloración de las inflorescencias en *T. erecta* (Qiu et al., 2024).

Esta información acerca del estado del arte de las ciencias ómicas de *T. erecta*, es fundamental en las nuevas estrategias genómicas de preservación y conservación de la especie, además de que permitirán proponer pruebas de hipótesis acerca de las estrategias moleculares y fenotípicas que están relacionadas con el número y tamaño de inflorescencias, así como la síntesis de los carotenoides producidos en cempoalxóchitl, que se requieren para la industria de la floricultura o bien, para la producción de suplementos alimenticios usados en la industria alimenticia.

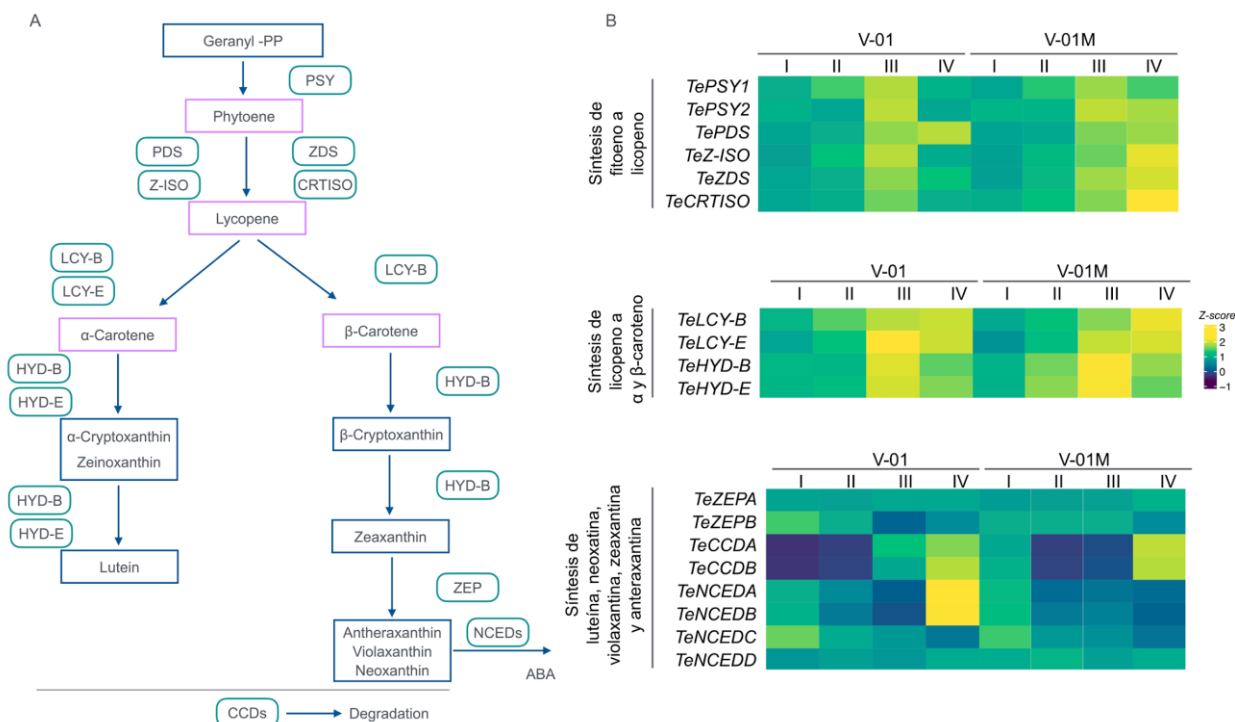


Figura 4. Vía de síntesis y degradación de los carotenoides y paisaje transcripcional en flores. En el panel **A**, se ilustra la vía de síntesis y degradación de los carotenoides y en el panel **B**, los perfiles de expresión de genes que codifican enzimas que participan en la biosíntesis y degradación de carotenoides en las flores de cempoalxóchitl. Los niveles de expresión génica en las cuatro etapas de desarrollo de las flores de cempoalxóchitl (*T. erecta*) 'V-01' y 'V-01M' están representados en el *heatmap*. Las nomenclaturas de las enzimas son: Fitoeno sintasa PSY, fitoeno desaturasa PDS, Z-ISO 15-cis-zeta-caroteno isomerasa, ZDS zeta-caroteno desaturasa, CRTISO prolicopeno isomerasa, LCY- β licopeno beta ciclasa, LCY- ϵ licopeno épsilon ciclasa, HYD- β anillo beta hidroxilasa, HYD- ϵ caroteno épsilon-monooxigenasa, ZEP zeaxantina epoxidasa, CCD dioxigenasa de escisión de carotenoides, NCED 9-cis-epoxicarotenoide dioxigenasa.

Biología para la producción de *T. erecta* mediante cultivo de tejido vegetal y transformación genética

Desde su diseminación por Europa, se han desarrollado muchas variedades de cempoalxóchitl entre las que se encuentran las siguientes: Atlantis, Cortez, Discovery, Galore, Jubilé, Ladies, Piezas de Oro y Vainilla (Serrato-Cruz, 2004). Sin embargo, debido a sus diversas aplicaciones, el incremento en su demanda ha requerido de esfuerzos para incrementar su producción y el rendimiento de sus compuestos derivados. El cultivo de tejido vegetal ha sido una herramienta muy

útil y clave para el desarrollo de sistemas eficientes en la regeneración de plantas completas de *T. erecta*, para preservar sus características morfológicas. Se ha estudiado la suplementación de los explantes con ácido ascórbico o reguladores de crecimiento como las auxinas, las citocininas y las giberelinas en diferentes dosis. No obstante, otra estrategia exitosa ha sido la transformación genética de forma estable o transitoria, de plantas compuestas para manipular rutas metabólicas y la producción de compuestos de interés. Por ejemplo, en 2015, Gupta y Rahman establecieron un protocolo para la transformación estable de *T. erecta* utilizando *Agrobacterium tumefaciens* mediante el uso de hipocótilos. Posteriormente, se reportó la producción eficiente de tiofenos, compuestos sulfurosos heterocíclicos que poseen actividad biocida en cultivos de raíces pilosas transformadas con *A. rhizogenes* (Gupta et al., 2016).

Aplicaciones biotecnológicas del cempoalxóchitl: Potencial en tecnología, fitorremediación y agricultura

Debido a su elevada capacidad antioxidante, el extracto de *T. erecta* se ha estudiado en la síntesis de nanopartículas estables de plata con potencial terapéutico (Tyagi et al., 2021). Por otro lado, a partir de las flores de *T. erecta* se ha logrado la generación de puntos cuánticos de grafeno, un material luminiscente con propiedades llamativas como lo son: una baja toxicidad, una alta biocompatibilidad, una emisión fluorescente ajustable y una alta estabilidad con aplicaciones en la electrónica y la biomedicina (Gupta et al., 2021). Otro aspecto importante es la implementación de tecnologías de remediación del suelo y de los mantos acuíferos mediante el uso de plantas acumuladoras o hiper acumuladoras de metales pesados como lo es *T. erecta*, , por ser una alternativa sustentable al uso de los métodos convencionales (lavado de suelos, solidificación, vitrificación, remediación electrocinética, etc.) (Yan et al., 2020). En este sentido, mientras que, en la mayoría de las plantas, concentraciones superiores a 39 mg/kg de peso seco de cadmio generan toxicidad, interfiriendo en el arreglo de la cromatina y la actividad fotosintética e inhibiendo el desarrollo, *T. erecta* tiene una alta capacidad para acumular metales pesados como el cromo (3.2 mg/kg de peso seco), el cobre (150-400 mg/kg de peso seco), el cadmio (57 mg/kg de peso seco) y el plomo (1.3 mg/kg de peso seco) (Castillo et al., 2011; Chitraprabha y Sathyavathi, 2018; Małkowski et al., 2019; Rungruang et al., 2011).

En lo que respecta a su aplicación en la agricultura, en las hojas de *T. erecta* se ha referido la presencia de compuestos de tipo monoterpenos y sesquiterpenoides, los cuales pueden tener actividad herbicida, lo que podría proponer a los extractos de *T. erecta* como una alternativa en una agricultura más sustentable (Laosinwattana et al., 2018). Aunado a esto, el potencial del extracto de *T. erecta* en el control de nemátodos fitoparásitos representa una enorme ventaja al tratarse de compuestos de toxicidad selectiva y biodegradables (Bhattacharyya, 2017).

PERSPECTIVAS

Aunque México es el centro de origen de *T. erecta*, no se está aprovechando la inmensa biodiversidad de esta especie (se cuenta con aprox. 2000 accesiones en bancos de germoplasma) para su uso industrial y es una gran paradoja que nuestro país tenga que importar prácticamente la totalidad del pigmento derivado de esta especie. Para las necesidades nacionales, principalmente para uso en la industria avícola, se cuenta con las herramientas científicas y tecnológicas para generar variedades de alto rendimiento tanto de biomasa de las inflorescencias como de concentración de carotenoides, incluso estimular la producción de uno de ellos. Pero es necesaria la vinculación entre el sector académico y el sector industrial, así como el apoyo de las autoridades federales.

La industria del cempoalxóchitl en México tiene el potencial de ser un motor de desarrollo económico y social, especialmente en zonas rurales. El cultivo del cempoalxóchitl puede ser una opción viable para los agricultores que buscan diversificar sus ingresos y generar empleos en sus comunidades. El desarrollo de una industria sustentable y rentable del cempoalxóchitl requiere de una visión a largo plazo que involucre la investigación, la innovación, la colaboración entre el sector académico y la industria, y la creación de sistemas de producción eficientes. El cempoalxóchitl es un tesoro mexicano con un futuro brillante. Con la inversión adecuada en investigación y desarrollo, México puede recuperar su posición como líder en la producción de carotenoides a nivel mundial, generar empleos, impulsar el desarrollo económico y contribuir a la seguridad alimentaria.

Agradecimientos

La cátedra de investigación: Innovación agroindustrial: eficiencia en la utilización de recursos y sustentabilidad frente al cambio climático, clave CI2452, agradece a la Secretaría de Posgrado e Investigación y al Centro de Enseñanza Agropecuaria (CEA) de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán UNAM, por el apoyo recibido. Agradecemos a CONAHCyT por las becas posdoctorales a Janet Palacios-Martínez (No. 2342655) y a Ana Isabel Chávez-Martínez (No. 4057713).

REFERENCIAS

- Bhattacharyya, M. 2017. Use of marigold (*Tagetes* sp.) for the successful control of nematodes in agriculture. The Pharma Innovation, 6(11, Part A), 1.
- Castillo, O. S., Dasgupta-Schubert, N., Alvarado, C. J., Zaragoza, E. M., and Villegas, H. J. 2011. The effect of the symbiosis between *Tagetes erecta* L.(marigold) and *Glomus intraradices* in the uptake of Copper (II) and its implications for phytoremediation. New biotechnology, 29(1), 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2011.05.009>.
- Chitraprabha K and Sathyavathi, S. 2018. Phytoextraction of chromium from electroplating effluent by *Tagetes erecta* (L.). Sustainable Environment Research, 28(3), 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.01.002>.
- Feng G, Huang S, Liu Y, Xiao F, Liu J, Zhang Z., ... X, Niu. 2018. The transcriptome analysis of *Tagetes erecta* provides novel insights into secondary metabolite biosynthesis during flower development. Gene. PMID: 29574190. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2018.03.051>.

- Galpaz N, Ronen G, Khalfa Z, Zamir D and Hirschberg J. 2006. A chromoplast-specific carotenoid biosynthesis pathway is revealed by cloning of the tomato white-flower locus. *The Plant Cell*, 18(8), 1947-1960. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.039966>.
- Gupta GK, Sagar P, Srivastava M, Singh AK, Singh J, Srivastava SK and Srivastava A. 2021. Excellent supercapacitive performance of graphene quantum dots derived from a bio-waste marigold flower (*Tagetes erecta*). *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(77), 38416-38424. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.094>.
- Gupta, V and ur Rahman, L. 2015. An efficient plant regeneration and Agrobacterium-mediated genetic transformation of *Tagetes erecta*. *Protoplasma*, 252, 1061-1070. <https://doi.org/10.1007/s00709-014-0740-y>.
- Gupta, V., Shanker, K., and ur Rahman, L. 2016. In vitro production of thiophenes using hairy root cultures of *Tagetes erecta* (L.). *African Journal of Biotechnology*, 15(17), 706-713. <https://doi.org/10.5897/ajb2015.14483>.
- Gupta YC, Panwar S, Banyal N, Thakur N and Dhiman, M. R. 2022. Marigold. In *Floriculture and Ornamental Plants* (pp. 1-23). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1554-5_1-1.
- Hadden, W. L., Watkins, R. H., Levy, L. W., Regalado, E., Rivadeneira, D. M., van Breemen, R. B., and Schwartz, S. J. 1999. Carotenoid composition of marigold (*Tagetes erecta*) flower extract used as nutritional supplement. *Journal of agricultural and food chemistry*, 47(10), 4189-4194. <https://doi.org/10.1021/jf990096k>.
- Huang, X., Gao, W., Yun, X., Qing, Z., & Zeng, J. (2022). Effect of natural antioxidants from marigolds (*Tagetes erecta* L.) on the oxidative stability of soybean oil. *Molecules*, 27(9), 2865. <https://doi.org/10.3390/molecules27092865>.
- Jiang F, Yuan L, Wang S, Wang H, Xu D, Wang and Fan W. 2023. Improved chromosome-level genome assembly for marigold (*Tagetes erecta*). *BiorXiv*. doi.org/10.1101/2023.07.25.550479
- Liu C, Wang F, Li R, Zhu Y, Zhang C and He Y. 2024. Marigold (*Tagetes erecta*) MADS-Box Genes: A Systematic Analysis and Their Implications for Floral Organ Development. *Agronomy*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy14091889>.
- Małkowski, E., Sitko, K., Zieleznik-Rusiniowska, P., Gierón, Ż., and Szopiński, M. 2019. Heavy metal toxicity: Physiological implications of metal toxicity in plants. *Plant metallomics and functional omics: a system-wide perspective*, 253-301. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19103-0_10.
- Millán, J. L. S. 2010. Análisis del efecto de la radiación fotosintéticamente activa en la biosíntesis de carotenoides en *Tagetes erecta* L. [Tesis de Doctorado]. México. Universidad Nacional Autónoma de México; 2010. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/73280>.
- Park YJ, Park SY, Valan Arasu M, Al-Dhabi NA, Ahn HG, Kim JK and Park SU. 2017. Accumulation of carotenoids and metabolic profiling in different cultivars of *Tagetes* flowers. *Molecules*, 22(2), 313. <https://doi.org/10.3390/molecules22020313>.
- Qiu, Y., Wang, R., Zhang, E., Shang, Y., F, Guodong., ... Xiang, N. 2024. Carotenoid biosynthesis profiling unveils the variance of flower coloration in *Tagetes erecta* and enhances fruit pigmentation in tomato. *Plant Science*. 347. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.112207>.
- Riyazuddin, R., Nisha, N., Ejaz, B., Khan, M. I. R., Kumar, M., Ramteke, P. W., and Gupta, R. 2021. A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants. *Biomolecules*, 12(1), 43
- SEMARNAT. (10 de junio de 2021). Seis flores endémicas que son un regalo de México para el mundo. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/seis-flores-endemicas-que-son-un-regalo-de-mexico-para-el-mundo?idiom=es>
- Rungruang, N., Babel, S., and Parkpian, P. 2011. Screening of potential hyperaccumulator for cadmium from contaminated soil. *Desalination and water treatment*, 32(1-3), 19-26. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2672>.
- Serrato-Cruz MA 2004. Cempoalxóchitl: Diversidad biológica y usos. *Ciencia y Desarrollo en Internet*. Julio-Agosto, pp 1-6. Available online: <http://www.conacyt.mx/comunicacion/revista/181/articulos/pdf/Cempoalxochit.pdf>
- Shukla, A., and Thakur, R. 2018. First report of Septoria leaf spot on marigold (*Tagetes erecta* L.) from Himachal Pradesh, India. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 7(1), 1744-1748. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.701.211>.
- Tyagi, P. K., Tyagi, S., Gola, D., Arya, A., Ayatollahi, S. A., Alshehri, M. M., and Sharifi-Rad, J. 2021. Ascorbic acid and polyphenols mediated green synthesis of silver nanoparticles from *Tagetes erecta* L. aqueous leaf extract and studied their antioxidant properties. *Journal of Nanomaterials*, 2021(1), 6515419. <https://doi.org/10.1155/2021/6515419>.
- Wang, W., Xu, H., Chen, H., Tai, K., Liu, F., and Gao, Y. 2016. In vitro antioxidant, anti-diabetic and antilipemic potentials of quercetagenin extracted from marigold (*Tagetes erecta* L.) inflorescence residues. *Journal of food science and technology*, 53, 2614-2624. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2228-6>.
- Xin, H., Ji, F., Wu, J., Zhang, S., Yi, C., Zhao, S., ... and Zhang Z. 2023. Chromosome-scale genome assembly of marigold (*Tagetes erecta* L.): An ornamental plant and feedstock for industrial lutein production. *Horticultural Plant Journal*, 9(6), 1119-1130.
- Yan A, Wang Y, Tan SN, Mohd Yusof ML, Ghosh S and Chen Z. 2020. Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in plant science*, 11, 359. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
- Yatsunami R, Ando A, Yang Y, Takaichi S, Kohno M, Matsumura Y, ... and Nakamura, S. 2014. Identification of carotenoids from the extremely halophilic archaeon *Haloarcula japonica*. *Frontiers in microbiology*, 5, 100. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00100>.
- Zhang H, Zhang S, Zhang H. et al. 2020. Carotenoid metabolite and transcriptome dynamics underlying flower color in marigold (*Tagetes erecta* L.). *Sci Rep* 10, 16835. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73859-7>.