

FITOTÓXICOS COMO HERBICIDAS NATURALES Y OTRAS ALTERNATIVAS DE USO

Fernando López-Valdez ¹, Ada M. Ríos-Cortes ¹, Valentín López-Gayou ¹, Nina Torres-Valencia ¹, Sandra L. Cabrera-Hilerio ², Mariana Miranda-Arámbula ^{1*}

¹Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA), Instituto Politécnico Nacional. Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala. C.P. 90700. México.

² Fac. Ciencias Químicas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Ciudad Universitaria, Col. San Manuel, C.P. 72570 Puebla, Pue. México.

* Autor para correspondencia: M. Miranda-Arámbula. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA), Instituto Politécnico Nacional. Carr. Estatal Sta. Inés Tecuexcomac – Tepetitla, km 1.5 s/n. Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala. 90700. México.

Tel: +52 (55) 5729 6000 / 6300, ext. 87805. E-mail: mmirandaa@ipn.mx

RESUMEN

Es claro, que cada vez la humanidad se preocupa por lo que consume, como los alimentos. Buscando alimentos más seguros, más sanos, con mejores propiedades alimenticias y organolépticas, por mencionar algunos aspectos. Es por ello, que se debe poner atención en la forma que se cultivan y se protegen los cultivos, porque son los alimentos que consumimos. En este trabajo se abordarán temas como la importancia de los metabolitos secundarios con actividad fitotóxica y algunos ejemplos del potencial fitotóxico (herbicida) de plantas arvenses y cultivables. Adicionalmente, se pone en contexto su uso en la síntesis verde. Con la finalidad de tomar consciencia para prevenir el uso y los daños asociados u ocasionados por los herbicidas sintéticos, al mismo tiempo, prevenir enfermedades por el uso de sustancias perjudiciales a la salud y al ambiente a futuro. Y

Palabras clave: Metabolitos secundarios, fitotóxicos, herbicidas, arvenses.

ABSTRACT

It is clear that humanity is increasingly concerned about what it consumes, such as foods. Looking for safer, healthier foods, with better nutritional and organoleptic properties, for example. That is why attention must be paid to the way crops are grown and protected, because they are the food we consume. This work will address issues such as the importance of secondary metabolites with phytotoxic activity and some examples of the phytotoxic potential (herbicide) of weed and crops. Additionally, is place in context the use of such compounds in green synthesis. In order to raise awareness to prevent the use and damage associated or caused by synthetic herbicides, at the same time, prevent diseases due to the use of substances harmful to health and the environment in the future.

Keywords: Secondary metabolites, phytotoxic, herbicides, weeds.

I. Introducción.

Las plantas producen una amplia variedad de sustancias conocidas como metabolitos, primarios y secundarios. En el caso de los *metabolitos secundarios*, son aquellos que no están involucrados a procesos básicos de crecimiento y desarrollo de las células. Algunos metabolitos secundarios (MS) podemos percibirlos a través de nuestros sentidos como el olfato (una fragancia floral) y el sentido del gusto (por el sabor), y visualmente, por los colores de la especie. Las propiedades y la actividad biológica de los MS son diversas y se han aprovechado con diferentes propósitos, los que más destacan son los de interés farmacológico, los saborizantes, pigmentos y aromáticos; los que menor atención han recibido, son las propiedades antagónicas (es la interacción entre sustancias u organismos sobre otros organismos, que causan la inhibición o pérdida de actividad) como los herbicidas. Estos últimos, han cobrado importancia en las recientes décadas como posibles alternativas para la reducción y/o sustitución de la aplicación de plaguicidas sintéticos. Cabe preguntarnos ¿Por qué queremos disminuir o sustituir los plaguicidas sintéticos? Para dar respuesta, es importante señalar que estos plaguicidas sintéticos, entre las décadas de los 50 a los 90, permitieron incrementos en la producción y rendimientos de los cultivos agrícolas; sin embargo, en los últimos 30 años se han identificado una serie de problemas asociados por la aplicación masiva de estos productos. Los plaguicidas sintéticos afectan a organismos no objetivo (porque no son específicos) y tienen un impacto tóxico en organismos benéficos (polinizadores, diseminadores de semillas, microorganismos y productores primarios, etc.) para un ecosistema. Por otra parte, se han registrado patógenos resistentes a estas sustancias, dejan residuos en el ambiente y representan un riesgo para la salud humana y animal (Brakhage *et al.*, 2009). Es muy importante aclarar que, una vez aplicados los plaguicidas sintéticos sobre cultivos, organismos o suelos, se debe tomar en cuenta que no hay tecnología que pueda remover los plaguicidas sintéticos (o sus residuos) de la superficie o interior de los organismos (plantas, animales o microorganismos benéficos), salvo por el suelo, que si existen tecnologías, pero cada una de estas tecnologías de remediación es por si sola altamente costosa (remediación *in situ* o *ex situ*), por ello, lo más conveniente es prevenir, sustituir o disminuir dichas sustancias. Ante estos problemas, los productores agrícolas requieren de alternativas para aminorar los daños ocasionados por plagas y enfermedades a niveles rentables (económicos) y a la vez, que estas alternativas no representen los riesgos ya descritos.

Por otro lado, es conveniente definir los términos de arvenses y malezas, las plantas arvenses son todas aquellas plantas que crecen completamente ajenos al cultivo de interés, y el término maleza se refiere a un término impreciso: como arbustos o abundancia de “malas hierbas” (Torres-Valencia

et al., 2021). La problemática de las arvenses es que ejercen presión sobre los cultivos agrícolas ya que compiten por recursos y espacio, además, han presentado una rápida resistencia a herbicidas sintéticos (Baker y Umetsu, 2001). Algunos MS pueden tener propiedades fitotóxicas, entiéndase como *fitotóxico* como el compuesto que impide el crecimiento y desarrollo de uno o más tipos de plantas (Ronco-Campaña, 2018). De acuerdo con Hoagland (2001), define que *fitotoxicidad* es la actividad que poseen los MS sobre otras especies vegetales, y estas sustancias se pueden clasificar como herbicidas naturales, como una estrategia de control de arvenses. También pueden ser una estrategia ambientalmente viable, si consideramos que estas sustancias son biodegradables, altamente específicas, no son persistentes en el ambiente y que actúan contra diferentes organismos con actividad bactericida, nematocida, fungicida, insecticida, herbicida, entre otras.

En este trabajo se aborda brevemente algunos aspectos históricos del efecto de los MS con actividad fitotóxica (sección 2), aspectos fundamentales de las arvenses como fuente de fitotóxicos (sección 3), se mencionan algunos ejemplos de actividad fitotóxica de cultivos agrícolas (sección 4) y de arvenses (sección 5), la importancia de incorporar tecnologías como el encapsulamiento de los fitoquímicos (sección 6) y la “Síntesis verde” (sección 7), todo esto desde el punto de vista de las propiedades antagónicas de los MS como herbicidas naturales.



2. Aspectos históricos.

Hace 300 años a.C. aproximadamente, Theophrastus fue de los primeros en documentar efectos tóxicos entre las plantas, posteriormente Pliny II (año I d.C.) documentó el efecto tóxico entre plantas particularmente entre los cultivos agrícolas. Siglos después, en 1832, De Candolle demuestra que los efectos tóxicos entre las plantas, principalmente en los campos agrícolas, se debía a los compuestos químicos (MS) exudados al suelo, por algunos cultivos (como el sorgo) que este fenómeno fue denominando “enfermedad del suelo” y De Candolle, fue de los primeros en sugerir que este problema se resuelve con una adecuada rotación de cultivos. Este fenómeno de efecto tóxico entre especies mediado por MS, lo definió Molisch, en 1937, como *Alelopatía*, y en 1996, en el Congreso Internacional de Alelopatía (IAS, Cadiz, España), se estable su definición: “cualquier proceso que involucra MS producidos por plantas, algas, bacterias y hongos, y estas sustancias influyen en el crecimiento y desarrollo de los sistemas biológicos” (Anaya, 1999). Actualmente, alelopatía se define como el efecto directo o indirecto (benéfico y/o tóxico) de los MS producidos por organismos (plantas, bacterias, hongos, etc.) que influyen en procesos de crecimiento y desarrollo de los sistemas biológicos y agrícolas (Anaya, 1999; Vyvyan, 2002). En recientes fechas, el estudio de diferentes especies con potencial alelopático ha cobrado un importante interés en diferentes disciplinas, no tan solo por la identificación y descubrimiento de nuevos compuestos de interés farmacológico, sino también, por que representan un recurso de nuevos plaguicidas naturales, destacando la actividad fitotóxica (herbicida), fungicida, bactericida, entre otras.

3. Aspectos fundamentales de las arvenses como fuente de fitotóxicos

Para maximizar la producción y los rendimientos de los cultivos agrícolas, se han aplicado masivamente plaguicidas sintéticos para controlar el crecimiento de las poblaciones de diferentes organismos, en especial plantas arvenses (plantas no deseadas) que crecen entre los cultivos y que supone afectan la producción y los rendimientos de los mismos, ya que compiten por recursos como el agua, nutrientes y espacio (Vyvyan, 2002). En lo general, se han registrado más de 7 mil especies de arvenses, de las cuales 200 a 300 especies, aproximadamente, se han identificado como hierbas no deseables para su control en los campos agrícolas; lo que llevó a aplicaciones masivas de herbicidas sintéticos como el glifosato. El glifosato (N-fosfonometilglicina, C₃H₈NO₅P, CAS 1071-83-6) elimina todo tipo de plantas (no es un producto selectivo), afecta directamente a la diversidad biológica como son los polinizadores, genera resistencia

en las hierbas no deseables dando lugar a “super malezas”, es tóxico para los microorganismos del suelo y organismos acuáticos, así también, se considera que tiene implicaciones en la aparición y el aumento de tumores en mamíferos de vida silvestre. En 2015, esta sustancia fue reclasificada por la Agencia Internacional de Investigación de Cáncer (IARC) como probable carcinógeno para la especie humana (Bejarano-Gonzalez, 2017). Como ya se mencionó, una alternativa para el control de arvenses ha sido el uso de MS o *aleloquímicos* (aquellos metabolitos secundarios que afectan crecimiento, desarrollo y reproducción de organismo o de células, Chaïb *et al.* 2021) que se obtienen de plantas y pueden suprimir o controlar a diferentes especies, ganando especial atención porque pueden inhibir el crecimiento de estas y a la vez estimular algunos procesos biológicos de los cultivos, incrementando la producción y sus rendimientos, o incluso, pueden estimular la germinación temprana o tardía de algunas arvenses. Ejemplos de algunas especies con potencial herbicida son *Pueraria phaseoloides*, *Calopogonium mucunoides*, *Cassia rotundifolia*, *Centrosema pubescens*, entre otras especies (Teasdale *et al.*, 2007). Los aleloquímicos o metabolitos secundarios en el ambiente, pueden ser liberados por las plantas por diferentes mecanismos: como volátiles, exudados de raíz, lixiviados de la parte aérea de la planta y en los procesos de descomposición del material vegetal que los contienen (Vyvyan, 2002). Los MS pueden presentar más de un modo de acción afectando la división celular, los procesos de fotosíntesis, estructura de las membranas, entre otros. Además, en su mayoría son específicos a organismos blanco, biodegradables, frecuentemente no afectan a organismos benéficos y en algunos casos las mezclas de los MS liberados al ambiente pueden registrar efectos sinérgicos incrementando su bioactividad. Los herbicidas sintéticos no poseen estas características, a mediano y largo plazo inducen resistencia en organismos objetivo, por lo que, los MS son una prometedora vía de herbicidas naturales y eficientes, y sin riesgos para el ambiente y la salud humana (Vyvyan, 2002).



4. Cultivos agrícolas con actividad fitotóxica.

Como se mencionó en la sección 2 (aspectos históricos), el cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) libera MS al ambiente, los cuales tienen un efecto como fitotóxicos naturales. De acuerdo a Farooq *et al.* (2011), estos MS inhiben entre el 17% al 50% la densidad total de arvenses presentes en los cultivos de algodón, trigo, soya, girasol, entre otros, con la ventaja que estos MS incrementan los rendimientos (11 – 60%) en los cultivos mencionados. Por otro lado, en cultivos de *Brassica napus* (canola) con extractos acuosos del sorgo (15 L · ha⁻¹) combinados con extractos acuosos de canola (15 L · ha⁻¹), incrementaron la actividad herbicida, registrando una inhibición del 60 al 100%, sobre la densidad de las arvenses *Trianthema portulacastrum* L., *Cyperus rotundus* L., *Chenopodium album* L. y *Coronopus didymus* (L) Sm., en los cultivos de canola. Además, se observó un efecto positivo de los extractos combinados (de sorgo más canola) sobre el rendimiento de la propia canola, registrando un incremento hasta el 40% (Farooq *et al.*, 2011). Otras investigaciones han mostrado similar actividad en otros cultivos de interés agrícola como lo reportado por Xuan y colaboradores (2003), resaltando que el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en campos de arroz, reduce el 90% de las arvenses del cultivo e incrementa un 10% más los rendimientos del grano de arroz (1 a 2 toneladas más de rendimiento por hectárea). Otro ejemplo, por los mismos autores, es el inter-cultivo de trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum* Moench) con el cultivo de arroz, y se observó que, esta estrategia le confiere ventajas al cultivo, porque controlan las malezas de forma eficiente y se incrementan los rendimientos del grano de arroz a dos toneladas por hectárea, aproximadamente.

5. Arvenses con actividad fitotóxica.

Como ya se mencionó anteriormente, las arvenses contienden con el ambiente y han desarrollado diferentes MS que por medio de la evaluación biológica se puede elucidar la posible actividad fitotóxica (o herbicida), por ejemplo, el material deshidratado de *Ophiopogon japonicus* K., mezclado en el suelo, inhibe el 100% del crecimiento de las arvenses como *Cyperus difformis* L. y *Bidens biternata* L. (Farooq *et al.*, 2011). La arvense *Ageratum conyzoides* L. reduce el crecimiento de *Achinochloa cruz-galli* L. a un 70%, y para *Monochoria vaginalis* L. y *Aeschynomene indica* L. al 100%. Otra estrategia exitosa, es la aplicación de *Brassica nigra* L. en forma de “mulch” (ligera capa del material vegetal sobre el suelo o “acolchado”) que controló el 68% de la arvense *Avena fatua* L. (Farooq *et al.*, 2011). Los extractos acuosos (10 g L⁻¹) de las arvenses *Baccharis salicifolia* L., y *Lepidium*

virginicum L., mostraron 100% de inhibición sobre tres especies modelos (*Amaranthus* sp., *Lactuca sativa*, y *Solanum lycopersicum*) y se observó un ligero incremento (1 - 5%) en los rendimientos de biomasa del cultivo de jitomate (Miranda-Arámula *et al.*, 2021). Estos son sólo algunos ejemplos, de una amplia investigación referente al tema, lo que representa una oportunidad para ampliar y elucidar los mecanismos involucrados en estos fenómenos.

6. Encapsulamiento de fitotóxicos.

Los fitotóxicos tienen características como potenciales herbicidas, sin embargo, hay aspectos que no se han mencionado y que son importantes a considerar, estos factores son la sensibilidad a la temperatura, la luz, la humedad, el pH y al oxígeno, principalmente, que dificultan la formulación de productos, conservación y su aplicación a campo. Por ejemplo, los carotenoides son fácilmente oxidados cuando se exponen a la luz, algunos compuestos como las betalainas son inestables en presencia de humedad y/o agua, los polifenoles se oxidan al polimerizarse, y los taninos son insolubles y reaccionan con otros fenoles. Estos compuestos al igual que los aceites esenciales inician reacciones de oxidación y degradación durante los procesos de extracción y/o por los factores ya descritos. Todas estas reacciones generalmente pueden reducir o perder completamente la actividad de los fitotóxicos de interés, por ello, el encapsulamiento mejora la estabilidad de estos, ya que actúan como barreras físicas entre los fitotóxicos y el ambiente. Con la tecnología de los microencapsulados se puede proteger a los fitotóxicos de los factores externos, son liberados de forma más controlada y en menor cantidad, con la posibilidad de liberarse y distribuirse de forma más eficiente. Teniendo claro que los materiales utilizados para los microencapsulados son materiales inertes (no reaccionen con los fitotóxicos), deben ser estables durante el almacenamiento y relativamente económicos. Algunas técnicas para el encapsulamiento son el secado por aspersión, el liofilizado y el electro-spray (Labuschagne, 2018), siendo el más económico el secado por aspersión.



7. Síntesis verde y sus potenciales aplicaciones en la Biotecnología agrícola.

La "síntesis verde" como parte de la Química, es una disciplina que tiene el objetivo de disminuir y/o eliminar prácticas y procesos que son considerados tóxicos y con alto impacto ambiental, por la producción de desechos y/o productos contaminantes. Originalmente la síntesis verde se ha concebido para realizar procesos y productos, donde se eliminen tipo de riesgos (tanto los ambientales como a la salud) y los contaminantes como parte de los procesos de elaboración, para lograr una síntesis con estrategias que cumplan con algunos de los doce principios básicos que se proponen para la calidad verde (Ivanković et al., 2017), enfocado en un equilibrio ecológico. En la actualidad la síntesis verde se ha orientado casi en su totalidad a la síntesis de nanopartículas, pero no es exclusiva para estas. Por otro lado, aprovechando la búsqueda de nuevas nanopartículas funcionalizadas, se pueden utilizar los extractos vegetales de plantas arvenses vía síntesis verde para desarrollar diversas aplicaciones como sensores, nanomateriales, o bien, características biológicas como herbicidas (fitotóxicos) de interés agronómico. Por ejemplo, se han sintetizado nanopartículas de silicio que tienen el potencial para aplicarse como fertilizante en cultivos específicos y actúan como vehículos para suministrar herbicidas y fertilizantes en las plantas (Rastogi et al., 2019). Que se pueda contribuir a una agricultura más amigable y sustentable con el ambiente.

8. Conclusiones.

Las propiedades y actividad biológica de los metabolitos secundarios son diversas y se están tratando de aprovechar para diferentes propósitos. De las propiedades, resalta la actividad plaguicida contra bacterias, insectos, arvenses, entre otras. Los metabolitos secundarios como fitotóxicos, pueden conferir protección con más de una actividad, i.e., actúan contra insectos y contra fitopatógenos e incrementan la producción y rendimiento del cultivo de interés. Tienen las ventajas de ser específicos, biodegradables, y eficientes, sin embargo, son fotosensibles, no son termoestables, etc., por lo que, en combinación con otras tecnologías como los encapsulados, se subsanan estas desventajas. Además, la "síntesis verde" puede mejorar los procesos de extracción y producción, cuidando que se generen estrategias ambientalmente viables y económicas. De esta forma, prevenir o evitar enfermedades asociadas al uso de plaguicidas sintéticos en la producción de nuestros alimentos que representan riesgos para la salud y el ambiente.

Agradecimientos.

Al Instituto Politécnico Nacional (Proyectos SIP: 20202274, 20211596, 20211576 y 20211511). Al CONACyT, por la beca y los estímulos recibidos, NT-V, VL-G, y FL-V.

Referencias.

- Anaya AL (1999). Allelopathy as a tool in the management of biotic resources in agroecosystems. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 18(6): 697-739.
- Baker DR, Umetsu NK (2001). Modern Agrochemical Discovery. In *Agrochemical discovery: Insect, Weed, and Fungal Control*. Baker DR, Umetsu NK Eds. American Chemical Society. Pp. 1-6.
- Bejarano González F (2017). Los plaguicidas altamente peligrosos en México. *Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México, A.C.* Pp. 364.
- Brakhage A, Gierl A, Hartmann T, Strack D (2009). Evolution of metabolic diversity. *Phytochemistry*. 70(15/16): 1611-1909. DOI: 10.1016/j.phytochem.2009.07.007.
- Chaïb S, Pistevos JC, Bertrand C, Bonnard I (2021). Allelopathy and allelochemicals from microalgae: An innovative source for bio-herbicidal compounds and biocontrol research. *Algal Research*. 54: 102213. doi.org/10.1016/j.algal.2021.10221
- Farooq M, Jabran K, Cheema ZA, Wahid A, Siddique KH (2011). The role of allelopathy in agricultural pest management. *Pest Management Science*. 67(5): 493-506.
- Hoagland R E (2001). Bioherbicides: Phytotoxic Natural Products. In *Agrochemical discovery: Insect, Weed, and Fungal Control*. Baker DR & Umetsu NK, Eds. American Chemical Society. Pp. 72-90.
- Ivanković A, Dronjić A, Martinović A, Talić S (2017) Review of 12 principles of green chemistry in practice. *International Journal of Sustainable and Green Energy*. 39-48.
- Labuschagne, P. (2018). Impact of wall material physicochemical characteristics on the stability of encapsulated phytochemicals: A review. *Food Research International*. 107, 227-247.
- Miranda-Arámbula M, Reyes-Chilpa R; Anaya LAL (2021). Phytotoxic Activity of Aqueous Extracts of Ruderal Plants and its Potential Application to Tomato Crop. *Botanical Sciences*. 99(3): 487-498. DOI: 10.17129/botsci.2727.

Rastogi A, Tripathi DK, Yadav S, Chauhan DK, Živčák M, Ghorbanpour M, Brestic M (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech*. 9(3): 1-11. https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7.

Ronco-Campaña A (2018). Fitotóxicos como alternativa a herbicidas contaminantes. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*. (30): 71-74.

Teasdale JR, Brandsaeter LO, Calegari A, Neto FS, Upadhyaya MK, Blackshaw RE (2007). Cover crops and weed management. *Non chemical weed management principles. Concepts and Technology*, CABI, Wallingford, UK, 49-64.

Torres-Valencia N, Miranda-Arámbula M, Ríos-Cortés AM, López-Gayou V, López-Valdez F (2021) Las malezas como un campo de oportunidades en el estudio de la síntesis verde. *Frontera Biotecnológica*. 18(1). *In press*.

Vyvyan JR (2002). Allelochemicals as leads for new herbicides

and agrochemicals. *Tetrahedron*. 58(9): 1631-1646.

Xuan TD, Yuichi O, Junko C, Tsuzuki E, Hiroyuki T, Mitsuhiro M, Khanh TD, Hong NH (2003). Kava root (*Piper methysticum* L.) as a potential natural herbicide and fungicide. *Crop Protection*. 22(6): 873-881. DOI:10.1016/S0261-2194(03)00083-8

