



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

Progresos en la investigación del uso de alelopáticos en la agricultura

Alumna: María Oviedo Moya

Junio, 2020



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales



Trabajo Fin de Grado

Progresos en la investigación del uso de alelopáticos en la agricultura

Alumno: María Oviedo Moya

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul que parece leer "María Oviedo Moya". La firma es fluida y está rodeada por un círculo azul.

Junio, 2020

RESUMEN	1
ABSTRACT	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Alelopatía y aleloquímico	2
1.2 Vías de emisión de los aleloquímicos	5
1.3 Efecto de los alelopáticos sobre la bioquímica y fisiología de la planta receptora y el medio.....	7
1.3.1 <i>Cambios en la micro y ultra estructura de las células</i>	<i>7</i>
1.3.2 <i>Inhibición de la división y elongación celular</i>	<i>7</i>
1.3.3 <i>Efectos en la permeabilidad de la membrana celular</i>	<i>7</i>
1.3.4 <i>Efectos en las actividades enzimáticas</i>	<i>8</i>
1.3.5 <i>Efectos sobre los reguladores del crecimiento</i>	<i>9</i>
1.3.6 <i>Influencia en la respiración y fotosíntesis</i>	<i>9</i>
1.3.7 <i>Influencia en la síntesis y metabolismo de proteínas y ácidos nucleicos</i>	<i>10</i>
1.3.8 <i>Influencia en la captación de agua y nutrientes</i>	<i>11</i>
1.4 Gestión de la alelopatía vegetal en la agricultura	11
1.5 Selección y crecimiento de cultivos alelopáticos	14
1.6 Efectos de los aleloquímicos en microorganismos y medio ambiente	15
1.7 Problemas y perspectivas futuras de investigación	16
2. OBJETIVOS	18
3. MATERIALES Y MÉTODOS	19
4. RESULTADOS	20

4.1 Arroz	20
4.2 Quinoa	22
4.3 Trigo	23
4.4 Avena	24
4.5 Centeno	25
4.6 Cebada	26
4.7 Haba	26
4.8 Judía	27
4.9 Soja	29
4.10 Trébol	30
5. DISCUSIÓN	31
5.1 Aplicación del arroz	31
5.2 Beneficios de la quinoa	31
5.3 Importancia del trigo con efectos alelopáticos	32
5.4 Avena, ejemplo de fitotoxicidad alelopática	32
5.5 Centeno para control de malezas en la agricultura	33
5.6 Cebada de baja autotoxicidad.....	33
5.7 Rápido efecto supresor del haba.....	34
5.8 Judía como método específico de supresión	35
5.9 La soja y sus grandes propiedades	35
5.10 Beneficios del trébol como forraje	36
6. CONCLUSIÓN	37
7. BIBLIOGRAFÍA.....	38

Resumen

La alelopatía es un fenómeno natural frecuente en plantas en el que un organismo produce compuestos químicos, llamados aleloquímicos o alelopáticos, que influyen en el crecimiento, germinación, reproducción, supervivencia y desarrollo de otros organismos. La alelopatía es una técnica de interacción entre una planta donante y otra receptora, donde se pueden provocar efectos positivos, como control de malezas, protección de cultivos frente a plagas, etc., o efectos negativos, como autotoxicidad, enfermedad del suelo o invasión biológica. Para asegurar el desarrollo agrícola sostenible, el uso continuo y excesivo de herbicidas en la agricultura debe sustituirse por métodos ecológicos como la alelopatía, aprovechando sus propiedades inhibitorias/estimuladoras en los organismos y procurando evitar los efectos perjudiciales. Por ello en esta revisión se pretende recoger información sobre el estado actual de la alelopatía como potencial método en la agricultura sostenible, mediante la revisión de los últimos avances en mecanismos alelopáticos.

Palabras clave: alelopatía, aleloquímico, agricultura sostenible, mecanismo ecológico.

Abstract

Allelopathy is a natural phenomenon frequent in plants in which an organism produces chemical compounds, called allelochemicals or allelopathic, that influence the growth, germination, reproduction, survival and development of other organisms causing beneficial or harmful effects. Allelopathy is a technique of interaction between a donor and a recipient plant, where positive effects such as weed control, crop protection against pests, etc. can be caused. To ensure sustainable agricultural development, the continuous and excessive use of herbicides in agriculture should be replaced by ecological methods such as allelopathy, taking advantage of their inhibitory / stimulatory properties in organisms and avoiding negative effects such as autotoxicity, soil disease or biological invasion. For this reason, this review aims to collect information on the current state of allelopathy as a potential method in sustainable agriculture, by reviewing the latest advances in allelopathic mechanisms.

Keywords: allelopathy, allelochemical, sustainable agriculture, ecological mechanism.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el incremento continuado de la población mundial, junto con una serie de factores que amenazan la estabilidad de los ecosistemas, entre ellos el cambio climático y el abuso de la utilización de pesticidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas) están produciendo áreas menos productivas, y, por tanto, menos tierras dedicadas al uso agrícola. Estos hechos hacen que una investigación sobre las variedades más productivas que permitan una agricultura rentable, ecológica y no contaminante sea una prioridad a día de hoy (Blanco, 2006; Gollack et al., 2014).

En la naturaleza, las plantas han estado sometidas, durante toda su vida, a diferentes factores bióticos y abióticos que han ejercido una presión de selección, que les ha permitido evolucionar desarrollando diversas rutas metabólicas mediante las cuales sintetizan una gran diversidad de metabolitos secundarios (terpenos, fenoles, compuestos nitrogenados) los cuales sirven de defensa frente al entorno ambiental en el que viven, les permite interactuar con otros organismos y sobrevivir a condiciones ambientales muy diversas (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Muchos de estos metabolitos secundarios (conocidos como aleloquímicos o alelopáticos) pueden producir inhibición o estimulación del crecimiento de plantas vecinas, lo que sugiere tener un sistema de defensa natural, biodegradable y sin efectos tóxicos o residuales, y, por tanto, pueden servir como herramienta de manejo de cultivo en los agroecosistemas, aprovechando su gran potencial alelopático. No obstante, el grado de eficacia y especificidad de estos metabolitos secundarios es limitado (Blanco, 2006; Bhadoria, 2011).

1.1. Alelopatía y aleloquímico

La alelopatía (del griego *allelon*= uno al otro, *pathos*= sufrir, efecto dañino de uno sobre otro) es un fenómeno que ocurre en organismos vegetales, por el cual una planta es capaz de producir determinadas sustancias bioquímicas que pueden afectar a la germinación, crecimiento, desarrollo, reproducción y supervivencia de otros organismos. Además, también pueden estar implicados otros organismos como microorganismos, hongos, virus, bacterias, nematodos o insectos, debido a la interacción que existe en la naturaleza entre los diferentes sistemas biológicos (Kong y Hu, 2001).

Estas sustancias bioquímicas, pertenecientes al grupo de metabolitos secundarios, se originan a partir del metabolismo primario y se conectan a través de las vías del ácido shikímico, ácido malónico, mevalónico y vía MEP (metileritrol fosfato) (Fig. 1).

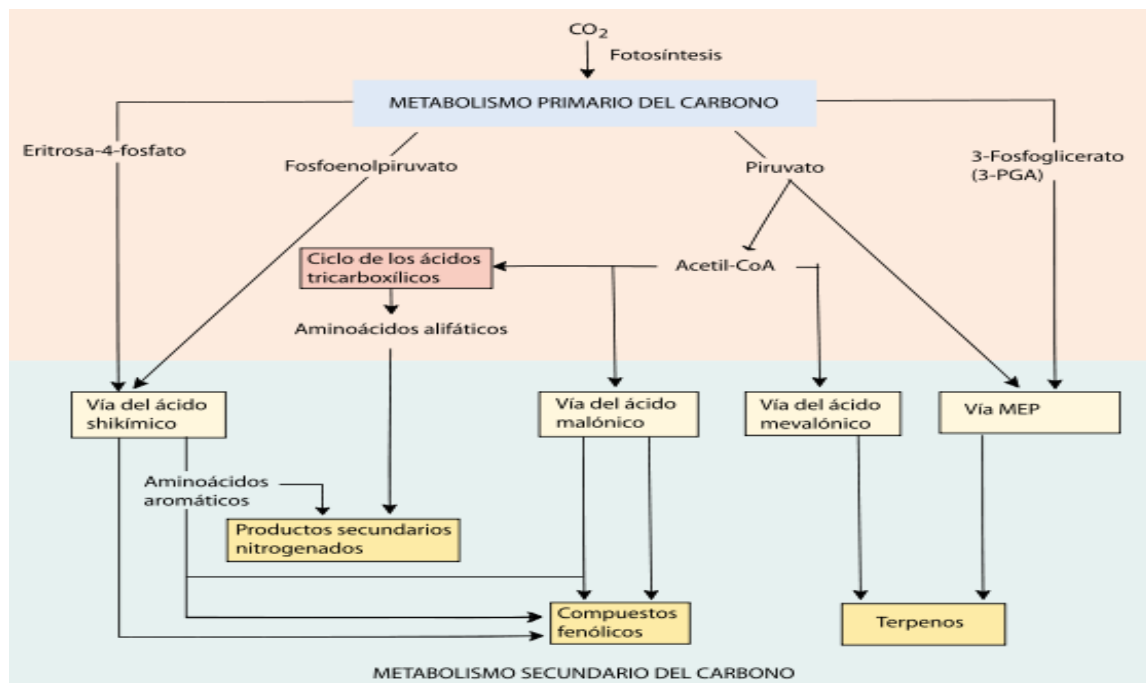


Fig. 1. Rutas metabólicas que conectan los metabolitos primarios y secundarios (Taiz y Zeiger, 2002).

Todos estos compuestos están relacionados con los mecanismos de defensa que la planta tiene frente a diferentes condiciones ambientales y bióticas. Estos compuestos pueden tener efectos beneficiosos o perjudiciales en otros organismos, dependiendo de la concentración en la que se encuentren (efectos beneficiosos a bajas concentraciones, mientras que otras producen efectos perjudiciales cuando se supera un determinado umbral). En la actualidad, es posible la realización de procesos de aislamiento, análisis químico y estructural de determinados aleloquímicos gracias a los grandes avances tecnológicos, permitiendo la identificación de alelopáticos en pequeñas cantidades (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

En la alelopatía existe una planta que produce el agente alelopático (donadora) y otra planta que lo recibe (receptora) perteneciente a otra especie, no obstante, existe la posibilidad de que la planta que produce el alelopático y la planta receptora sean de la misma especie, en este caso se habla de autotoxicidad (Rice, 1984).

Clasificación de los compuestos alelopáticos en función de su similitud química (Rice, 1974):

- 1) Compuestos alifáticos: inhiben la germinación de semillas y el crecimiento de la planta. Comprenden alcoholes y ácidos orgánicos (solubles en agua) que forman parte de forma natural del suelo.
- 2) Lactonas insaturadas: hidroxiácidos, como patulina, psilocina y protoanemonina, que, aunque pueden inhibir el crecimiento de otras plantas, son bastante desconocidas hasta ahora.
- 3) Lípidos y ácidos grasos de cadena larga como ácidos linoleico, mirístico, palmítico, láurico e hidroxiesteárico. Es el grupo menos conocido debido a que su función en la alelopatía no está completamente investigada.
- 4) Glucósidos cianogénicos: derivados de ciertos aminoácidos, presentan una alta actividad alelopática.
- 5) Terpenos: incluyendo monoterpenos y sesquiterpenos. Son componentes muy abundantes en los organismos vegetales y son conocidos por su alta capacidad alelopática frente a malezas y plantas de cultivo.
- 6) Compuestos aromáticos: ácidos fenólicos, policétidos, flavonoides, taninos, cumarinas, alcaloides y derivados fenil-propanoicos. Conforman la más extensa categoría de aleloquímicos. Algunos de ellos están íntimamente ligados a la ruta del ácido shikímico, de la cual proceden.

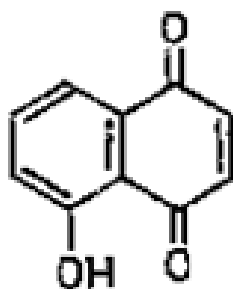


Fig. 2. Estructura química de la juglona, hidroxinaftoquinona producida por el nogal (diferentes especies del género *Juglans*) (Sampietro, 2003).

1.2. Vías de emisión de los aleloquímicos

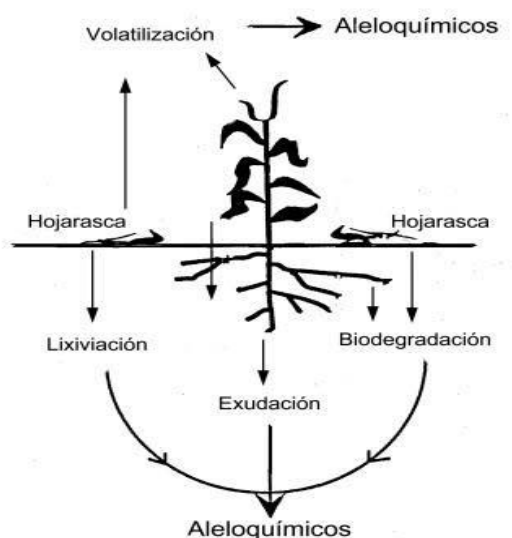


Fig. 3. Esquema de las distintas vías de liberación de alelopáticos (Sampietro, 2003).

- Volatilización: la planta produce compuestos volátiles que van destinados a la parte aérea como las raíces de plantas vecinas. Este método de liberación suele ser característico de plantas que producen aleloquímicos de tipo terpenoides, su toxicidad es prolongada (incluso de varios meses).
- Lavado o lixiviación: en este caso los compuestos alelopáticos se liberan y son transportados por el efecto de la nieve, lavado de lluvia o rocío. Se liberan todo tipo de compuestos fenólicos, terpenos y alcaloides.
- Descomposición de tejidos vegetales: las partes muertas de la planta caen al suelo convirtiéndose en residuos en descomposición, estos compuestos liberan los aleloquímicos. Una vez en el suelo y en contacto con microorganismos pueden sufrir alteraciones en su composición química llegando a obtenerse productos con efectos tóxicos potenciados.
- Exudación radicular: este método es el más frecuente de liberación de alelopáticos. Los exudados radiculares pueden alterar el crecimiento de raíces y brotes, reducir la germinación de semillas, e impedir la correcta absorción de nutrientes.

La actividad alelopática también depende de varios factores como son: la especie y variedad, cantidad de aleloquímicos liberados, sensibilidad de la planta receptora,

el clima, la riqueza nutricional del suelo, interacciones con microorganismos, etc. (Blanco, 2006).

Especie	Vía de liberación	Efecto inhibitorio	Naturaleza química
<i>Amaranthus palmeri</i> S.Wats.	Volatilización	Germinación de tomate, cebolla y zanahoria.	Cetonas
<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	Volatilización	Germinación y crecimiento de plantas de cultivo	Terpenos
<i>Brassica napus</i> L.	Lixiviación	Germinación de soja	Isotiocianatos
<i>Datura stramonium</i> L.	Lixiviación	Crecimiento de trigo y soja.	Escopolamina, hyoscyamina
<i>Cyperus rotundus</i> L.	Descomposición	Rendimiento de tomate, arroz, repollo, pepino, zanahoria, soja y algodón.	Polifenoles y sesquiterpenos.
<i>Cyperus esculentus</i> L.	Descomposición	Germinación y crecimiento de remolacha azucarera, lechuga, arveja, tomate, maíz, soja y tabaco.	Ácidos ferúlico, hidroxibenzoico, siríngico y vainílico.
<i>Asparagus officinalis</i> L.	Exudación radicular	Autotóxico	No determinada
<i>Avena</i> spp.	Exudación radicular	Crecimiento de trigo	Escopoletina y ácidos benzoico, cumárico y vainílico

Tabla 1: Potencial alelopático en diferentes especies (Sampietro, 2003).

1.3. Efecto de los alelopáticos sobre la bioquímica y fisiología de la planta receptora y el medio

A continuación, veremos una serie de cambios fisiológicos y bioquímicos que sufren las plantas causados por la acción de los aleloquímicos.

1.3.1. Cambios en la micro y ultra estructura de las células

Debido a la acción de los aleloquímicos, la estructura y la forma de las células se ven afectadas. Un ejemplo de ello son los monoterpenos volátiles, como el eucaliptol o el alcanfor, que son capaces de ensanchar y acortar las células de la raíz, producir malformaciones nucleares y aumentar el número vacuolar (Pawlowski et al., 2012). El citral es una sustancia aromática presente en una gran cantidad de aceites esenciales que, según varios estudios, es capaz de alterar los microtúbulos en raíces de trigo y *Arabidopsis thaliana* L., (Chaimovitsh et al., 2012). Además, genera en esta última especie un efecto desorganizador a largo plazo en la ultraestructura celular, engrosando la pared celular e interrumpiendo la comunicación intercelular y la formación de pelos radiculares (Graña et al., 2013).

1.3.2. Inhibición de la división y elongación celular

Varios estudios realizados determinaron que la sorgoleona inhibe la división celular, concretamente el proceso mitótico, de forma que reduce considerablemente el número de células en cada mitosis, dañando la tubulina y dando lugar a núcleos poliploides (Hallak et al., 1999). El centeno es otro claro ejemplo de especies alelopáticas que inhiben el crecimiento, ya que produce aleloquímicos que inhiben la regeneración de las células radiculares en estudios realizados en pepino (Burgos et al., 2004). Cai y Mu (2012) llevaron a cabo un estudio en el que se trataba a la soja con extractos de hojas de *Datura stramonium* L., tras la aplicación descubrieron que cuanto más alta fuese la concentración de los extractos, mayor era el grado de inhibición del alargamiento primario de la raíz y su desarrollo lateral, la división celular en el extremo de la raíz y la longitud y densidad del pelo radicular.

1.3.3. Efectos en la permeabilidad de la membrana celular

La actuación de los aleloquímicos conlleva serias repercusiones en la actividad de las membranas, inhibiendo la actividad de las enzimas antioxidantes y aumentando los niveles de radicales libres. Estos radicales provocan un aumento de la peroxidación de lípidos de membrana y un desajuste del potencial de membrana

(Sunmonu y Van Staden, 2014). Los compuestos derivados de los ácidos benzoico y cinámico producen cambios en la polaridad de membrana, alterando su permeabilidad y estructura.

Hay una gran cantidad de aleloquímicos que inhiben la incorporación de minerales al interior celular que puede ser causado por la inhibición de las ATPasas de membrana. Algunos de ellos son los ácidos fenólico, ferúlico, vainílico, p-cumárico, y algunos flavonoides (Blanco, 2006). Los ácidos cafeico, siríngico y protocatéuico reducen el contenido de hierro, fósforo, molibdeno, potasio y nitrógeno, pero no alteran los niveles de magnesio (Rabotnov, 1974). Los ácidos fenólicos y las cumarinas alteran los niveles de agua en la planta, mientras que el ácido ferúlico disminuye la incorporación de agua en las raíces (Einhellig, 1995).

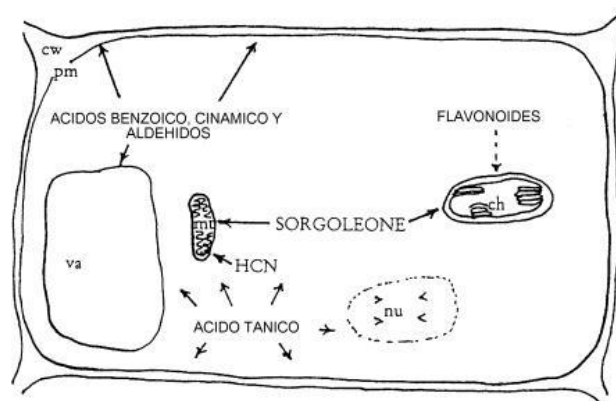


Fig. 4. “Modelo que ilustra los sitios de acción de agentes alelopáticos del sorgo en la fisiología celular. Algunos sitios primarios de acción deletérea están sugeridos por flechas” (Blanco, 2006).

1.3.4. Efectos en las actividades enzimáticas

Los aleloquímicos pueden modificar la actividad enzimática. Son capaces de provocar diversos efectos en las enzimas, como por ejemplo suprimir su actividad, o reducir su síntesis entre otros. Se ha demostrado en varios estudios que los aleloquímicos alteran la funcionalidad de las enzimas, como es el caso de la enzima λ -fosforilasa, que tiene una relación clara con la germinación de la semilla y que es inhibida por el ácido clorogénico, el cafeico y el catecol (Rice, 1984), (Einhellig, 1995).

También está el caso del ácido ferúlico, que es capaz de inhibir una gran cantidad de enzimas hidrolíticas tales como amilasa, maltasa, invertasa, proteasa y fosfatasa ácida que intervienen en la movilización del alimento (Blanco, 2006).

1.3.5. Efectos sobre los reguladores del crecimiento

Los aleloquímicos pueden alterar el funcionamiento de los reguladores del crecimiento de las plantas o provocar desajustes en algunas fitohormonas, provocando una inhibición del crecimiento y desarrollo (Cheng y Cheng, 2015). Las hormonas vegetales son compuestos orgánicos producidos por las plantas que controlan determinados procesos fisiológicos. Se clasifican en auxinas, giberelinas, citoquininas, etileno y ácido abscísico (ABA). Por ejemplo, algunos monofenoles como los ácidos p-hidroxibenzoico, vainílico, p-cumárico y siríngico son capaces de reducir la disponibilidad de ácido indol acético (AIA) (una fitohormona que pertenece al grupo de las auxinas), mientras que algunos difenoles y polifenoles como los ácidos clorogénico, cafeico, ferúlico y protocatéuico aumentan su disponibilidad. Esto sugiere que estos fenoles establecen un control en los niveles de AIA, junto con la enzima polifenoloxidasas, que sintetiza polifenoles, y, por tanto, tiene una relación directa con la regulación de AIA (Macías et al., 2000). Cabe destacar que el etileno es considerado un potente agente alelopático que es capaz de frenar la elongación en tallos y raíces mediante su liberación por residuos vegetales en descomposición. Algunos taninos junto con varios compuestos fenólicos como los ácidos ferúlico, p-cumárico, vainílico y las cumarinas inhiben el crecimiento promovido por las giberelinas (Blanco, 2006).

1.3.6. Influencia en la respiración y fotosíntesis

La respiración es un proceso crucial para la supervivencia de los organismos vegetales. Los aleloquímicos influyen en esta ruta bioquímica de diferentes formas y en diferentes etapas. Pueden producir una disminución de la toma de oxígeno, lo que inhibe la respiración, o pueden estimular la liberación de dióxido de carbono, estimulando la respiración. Los procesos mitocondriales más importantes a los que afecta son la transferencia de electrones, la fosforilación oxidativa, la producción de dióxido de carbono y de ATP (Cheng y Cheng, 2015).

Cabe destacar el efecto en la respiración que producen quinonas como la sorgoleona o la juglona a bajas concentraciones, afectando al transporte de electrones y a la incorporación de O₂ en la mitocondria (Sampietro, 2003).

El principal efecto de los aleloquímicos en la fotosíntesis de la planta es la rápida degradación de los pigmentos fotosintéticos, dando lugar a una reducción de la síntesis de ATP. Esto afecta a los estomas, y, por ende, inhibe el proceso de fotosíntesis (Yu et al., 2006).

Mediante la realización de bioensayos con *Abutilon theophrasti* Medic., se demostró que aleloquímicos como el ácido ferúlico, ácido p-cumárico y ácido vainílico eran capaces de inhibir la fotosíntesis modificando los niveles de clorofila o mediante el cierre de los estomas, provocando así la carencia de CO₂. Algunos flavonoides influyen en la organización estructural del cloroplasto, tales como el quempferol o las quinonas. Otros aleloquímicos reconocidos como la juglona o la sorgoleona tienen también efectos alelopáticos en el cloroplasto. La sorgoleona, procedente de los exudados radiculares del sorgo, es capaz de alterar la transferencia de electrones en el fotosistema II en la misma cantidad que la usada con el herbicida atrazina (Sampietro, 2003).

1.3.7. Influencia en la síntesis y metabolismo de proteínas y ácidos nucleicos

Hay sustancias que presentan efectos alelopáticos, como los alcaloides, que tienen diversas formas de afectar al ADN, por ejemplo, son capaces de integrarse con el ADN y aumentar la temperatura de escisión, inhibir la ADN polimerasa I, impedir la transcripción y traducción, así como inhibir la síntesis de proteínas (Wink y Latz-Brüning, 1995). Existen muchos casos más, como el del ácido ferúlico y al ácido cinámico, que presentan actividad aleloquímica y que pueden impedir la síntesis de proteínas (Li et al., 2010). También hay ciertos aleloquímicos que pueden inhibir la absorción de aminoácidos y el crecimiento celular (Abenavoli et al., 2003).

La cianamida altera la expresión de los genes de expansina, *LeEXPA9* y *LeEXPA1*, responsables de la reconstrucción de la pared celular posterior a la citocinesis, impidiendo la formación de raíz de tomate (Soltys et al., 2012). Las plantas donantes producen aleloquímicos que afectan a las plantas receptoras, mientras que las plantas receptoras reaccionan produciendo cambios en las expresiones génicas.

1.3.8. Influencia en la captación de agua y nutrientes

Un gran número de aleloquímicos afectan a la absorción de nutrientes en las raíces o privan del uso del agua ocasionando estrés hídrico. También son capaces de bloquear las acciones de la bomba Na^+/K^+ -ATPasa, necesaria en la absorción y transporte de iones en la membrana plasmática, impidiendo la entrada y salida de iones de la célula. En las plántulas de maíz los aleloquímicos trans-cinámico, ácido ferúlico y ácido p-cumárico impiden la correcta absorción de nitrato y el correcto funcionamiento de la bomba Na^+/K^+ -ATPasa, mientras que la umbeliferona y el ácido cafeico no tuvieron ningún efecto sobre la membrana plasmática (Abenavoli et al., 2010).

Las concentraciones a las que se encuentran los aleloquímicos determinan los efectos sobre las plantas. Una baja/alta concentración de un aleloquímico puede estimular la absorción de un ion, pero a la vez disminuir la absorción de otro (Geng et al., 2009).

1.4. Gestión de la alelopatía vegetal en la agricultura

La alelopatía es un fenómeno ecológico natural, conocido y usado en agricultura desde la antigüedad. Podemos decir que es una herramienta notablemente aprovechable en la práctica de agricultura ecológica, sacando partido a sus cualidades de estimulación e inhibición de la germinación y crecimiento de los organismos vegetales. Por lo tanto, la adecuada aplicación agraria de la alelopatía mantiene una dirección enfocada a la mejora de la productividad en los cultivos junto con la protección del medio ambiente, basada en el control de una serie de factores como son el control ecológico de malezas, control de plagas de insectos, y control de enfermedades en general de los cultivos vegetales, todo ello ligado a la conservación del nitrógeno en los terrenos de cultivo y la síntesis de agroquímicos basados en aleloquímicos (Zeng, 2014).

Hoy por hoy, se está llevando a cabo la aplicación de la alelopatía en diferentes métodos de cultivos como, por ejemplo, la rotación de cultivos, cultivos de cobertura, cultivos intercalados, acolchado o abono verde (Haider et al., 2015).

- Rotación de cultivos: consiste en ir variando el tipo de cultivo en una misma fracción de tierra, cultivando distintas especies cada temporada.

- Cultivos de cobertura: entre cosecha y cosecha se planta cualquier otro vegetal, manteniendo las características y los nutrientes del suelo y evitando la erosión.
- Cultivos intercalados: consiste en el cultivo simultáneo de dos o más especies en el mismo terreno.
- Acolchado: se cubre el suelo que rodea a las plantas con algún material, ya sea paja, compost, restos de podas o cultivos con el fin de mantener la humedad y evitar la rápida evaporación.
- Abono verde: se permite el crecimiento de determinadas plantas con el fin de proteger el suelo para después incorporarlas en forma de abono.

El cultivo intercalado es una forma de maximizar las propiedades del terreno y reducir el riesgo de pérdida o fracaso al plantar una sola variedad de cultivo, así mismo, utilizando la rotación de cultivos y los sistemas de cultivos intercalados, se puede reducir notoriamente la densidad de malezas y producción de biomasa (Jabran et al., 2015).

Hay que tener en cuenta las características alelopáticas de cada especie en estos métodos de cultivo (Cheng y Xu, 2013), debido a que unas plantas alelopáticas pueden formar un buen equipo y complementarse, fomentando el rendimiento y el crecimiento de la especie vecina, mientras que algunas plantas pueden anularse mutuamente y no llegar a producir un buen resultado (Cheng y Cheng 2015).

Existe cierta confusión a la hora de asignar los términos alelopatía y competencia en las interacciones entre plantas. En la competencia, se produce la reducción de un recurso del entorno debido a su utilización por parte de algún organismo vegetal que a su vez es requerido también por otra planta del mismo hábitat (An et al., 1998). Sin embargo, la alelopatía comprende la interacción de dos plantas donde una de ellas libera un compuesto químico que afecta a la otra. La alelopatía es un mecanismo bioquímico que ofrece a los organismos vegetales una ventaja en un ámbito donde los recursos son limitados (Gioria y Osborne, 2014). Desde el punto de vista de la ecofisiología, son dos conceptos complementarios, por lo que existe una denominación en conjunto que reúne todos los efectos perjudiciales producidos por ambos fenómenos y que se usa para denominar el efecto total de una planta sobre otra, este efecto se conoce como “interferencia” (Fitter y Hay, 2002).

La capacidad de una planta alelopática de controlar la población de malas hierbas está determinada por la alelopatía y la competencia en su conjunto, gracias a ello, se puede utilizar como un método de control de malas hierbas, para aliviar la autotoxicidad alelopática, para mejorar el uso de la tierra y para aumentar la producción estableciendo un sistema de rotación de cultivos y cultivos intercalados (Andrew et al., 2015).

El uso de herbicidas en la agricultura tradicional no es solo un hábito costoso, también es una forma de contaminación ambiental. Por ejemplo, el mantillo a base de paja es una aplicación alelopática que proporciona un manejo sostenible de las malezas, reduciendo el impacto negativo de la agricultura en el medio ambiente (Cheema et al., 2004; Jabran et al., 2015). El mantillo o acolchado de paja (Straw mulching) es un método en el cual se usa la paja descompuesta para cubrir las partes del terreno en las que no se desea la proliferación de malezas. Este método es eficaz gracias a que la paja produce aleloquímicos que suprimen el crecimiento de las malas hierbas y aumentan la fertilidad del suelo (Gamarra et al., 2018). Otro ejemplo, la aplicación de materiales vegetales alelopáticos a 1-2 toneladas por hectárea, podría reducir la biomasa de malezas en un 70% y aumentar el rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en un 20% en los arrozales en comparación con los controles respectivos (Xuan et al., 2005).



Fig. 5. Experimento de campo sobre mantillo de centeno y cultivo de tomate en un cultivar biológico (Schulz et al., 2013). A la izquierda tenemos una parcela cultivada con tomates donde se coloca entre las franjas de tomates una capa de mantillo de centeno. A simple vista se puede apreciar la alta capacidad de supresión de malezas. En la imagen de la derecha tenemos una parcela control sin mantillo de centeno, dividida en dos tratamientos: la subparcela izquierda no tiene tratamiento y

se puede apreciar que las malezas cubren casi por completo las plantas de tomate; en la subparcela derecha existe un control mecánico en la que las plantas de tomate crecen tanto como las plantas de la parcela de prueba.

En Brasil, se usan cascaras del fruto del café (*Coffea arabica* L.) como un remedio en la agricultura para controlar las malezas, ya que contienen aleloquímicos como fenoles, flavonoides y cafeína (Silva et al., 2013). Además, sabemos que algunas semillas de soja tienen la propiedad de impulsar la germinación del jopo de girasol (*Orobancha* spp.), una maleza parásita nociva, lo que nos plantea la posibilidad de usar la soja como cultivo trampa (Zhang et al., 2013).

1.5. Selección y crecimiento de cultivos alelopáticos

La selección de cultivos alelopáticos se basa en la cumplimentación de dos requisitos: que el cultivo reduzca o minimice la introducción de productos químicos resistentes a altas temperaturas (Fragasso et al., 2013) y que posea una alta capacidad de reducción de malezas con un alto potencial de rendimiento, madurez temprana, resistencia a enfermedades y mejor calidad del cultivo (Gealy y Yan, 2012). Especies como la remolacha (*Beta vulgaris* L.), maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), avena (*Avena sativa* L.), trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum* Moench.) y pepino (*Cucumis sativus* L.) presentan efectos inhibitorios frente al crecimiento de malezas (Rice, 1984). A continuación, veremos algunos ejemplos:

Especie alelopática	Maleza afectada
<i>Tagetes patula</i> L.	<i>Euphorbia heterophylla</i> L., <i>Amaranthus</i> spp., <i>Desmodium purpureum</i> Hook. & Arn. y <i>Momordica charantia</i> L.
Arroz	<i>Heteranthera limosa</i> Willd., <i>Rottboellia</i> spp., <i>Brachiaria platyphylla</i> (Munro ex C.Wright) Nash, <i>Echinochloa crus-galli</i> (L.) P.Beauv. y <i>Cyperus rotundus</i> L.
Alfalfa	<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop. y <i>Amaranthus</i> sp.
<i>Helianthus</i> spp.	<i>Amaranthus dubius</i> Mart. ex Thell., <i>Ipomoea</i> spp., <i>Euphorbia hirta</i> L., <i>Eleusine indica</i> L. y <i>Rottboellia exaltata</i> L.
Cebada	<i>Capsella bursa-pastoris</i> L. y <i>Stellaria media</i> L.

<i>Helianthus annuus</i> , L.	<i>Sorghum halepense</i> L., <i>E. heterophylla</i> , <i>Cyperus rotundus</i> L., <i>Portulaca oleraceae</i> L. y <i>Amaranthus dubius</i> Mart. ex Thell
-------------------------------	--

Tabla 2. Relación de especies alelopáticas de cultivo y malezas afectadas (Blanco, 2006).

1.6. Efectos de los aleloquímicos en microorganismos y medio ambiente

En los últimos años se ha descubierto que, bajo la influencia de aleloquímicos, existe una relación entre el crecimiento de los cultivos y los microorganismos presentes en el suelo (Bais et al., 2006).

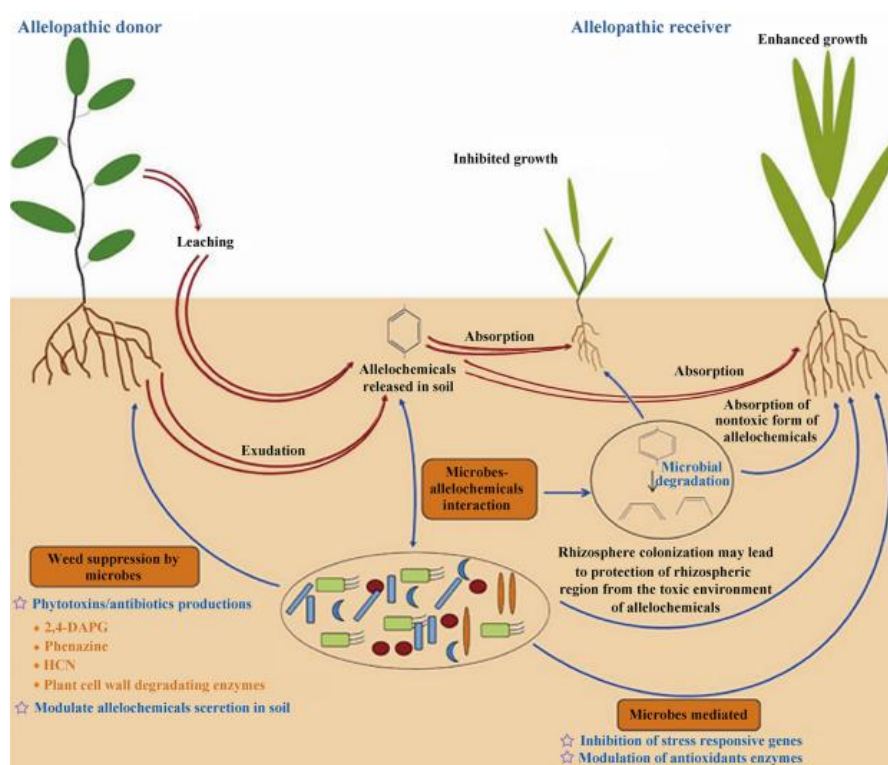


Fig. 6. Esquema que muestra los diferentes papeles que representan los microbios en la regulación de la interrelación de las especies alelopáticas donantes y receptoras (Mishra et al., 2013). Las flechas rojas dobles indican la manifestación de la alelopatía y las flechas azules simples indican la participación de los microorganismos del suelo en la reducción/aumento de la inhibición alelopática. En esta figura se expone el uso de las rizobacterias beneficiosas como método de reducción de la fitotoxicidad que la planta donante ejerce sobre la planta receptora mediante procesos como la colonización de las raíces, la formación de biopelículas, la degradación o transformación de aleloquímicos tóxicos y la modificación de mecanismo de defensa de las especies receptoras al estimular la expresión de

genes sensibles al estrés o a la actividad enzimática antioxidante. Algunos microorganismos son capaces de activar la producción de aleloquímicos mediante la liberación de glucósidos sin toxicidad tras la que se produce una degradación microbiana (el microorganismo actúa sobre el aleloquímico alterando alguna ruta bioquímica) para liberar el aleloquímico.

Según estudios recientes, el efecto indirecto que la alelopatía ejerce como mediador de las interacciones planta-planta presenta una mayor importancia que el efecto directo de la inhibición (Zeng, 2014). En el caso de que los microorganismos presentes en el suelo sufran cambios específicos en su composición química, se puede generar una retroalimentación o “feedback” negativo que afecte a la salubridad del suelo y al crecimiento de las plantas (Li et al., 2014). De forma contraria, los microorganismos asociados a la rizosfera conforman una retroalimentación positiva aumentando el potencial alelopático de las plantas (Wu et al., 2015).

Los aleloquímicos liberados por las plantas pueden ser modificados por microorganismos en el suelo antes de que ejerzan su acción sobre la planta receptora (Blanco, 2006), por ello, constituyen una labor clave en las interacciones entre organismos vegetales. Basándonos en estas afirmaciones podemos hablar sobre la probabilidad de que la alelopatía modele la composición vegetal y tome parte en el control de la biodiversidad (Fernández et al., 2013). Las rizobacterias promotoras del crecimiento en plantas o PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), son bacterias que entablan una relación simbiótica con la planta, confiriéndoles efectos beneficiosos como defensa frente a patógenos y mejora de la captación de nutrientes. Se ha confirmado que estas bacterias son capaces de alterar la expresión génica y regular la síntesis de aleloquímicos y vías de señalización en plantas, con el fin de perfeccionar la resistencia a enfermedades, la adaptabilidad y las cualidades de defensa en respuesta al estrés biótico y abiótico en plantas (Mishra y Nautiyal, 2012).

1.7. Problemas y perspectivas futuras de investigación

Para determinar la actividad y metodología por la que se rigen los aleloquímicos hay que observar la forma de liberación aleloquímica en el medio natural en primera instancia (Inderjit y Nilsen, 2003). A la hora de extraer un determinado aleloquímico

de un organismo se deben tener una serie de precauciones debido a la capacidad de cambiar su propio estado natural durante el proceso de extracción (Li et al., 2002).

No existe un aleloquímico genérico, hay infinidad de componentes químicos y estructuras que los conforman. Normalmente, un aleloquímico no lo conforma una sola sustancia, sino que, actúa como un conjunto de sustancias asociadas y las cantidades de aleloquímicos que son liberados varían dependiendo de las condiciones a las que está sujeta la planta. En vista de que diferentes aleloquímicos pueden ser compatibles y establecer una sinergia, también pueden solaparse y ser incompatibles alelopáticamente, o pueden desarrollar un incremento de los efectos alelopáticos. Además, un aleloquímico puede no mostrar actividad alelopática en solitario, pero si mostrarla en asociación con otros aleloquímicos (Albuquerque et al., 2010). Por ello, el potencial de un aleloquímico, se investiga atendiendo al tipo y a la cantidad de aleloquímicos liberados en conjunto por la planta, que dependen de factores de la propia planta (genotipo, especie, variedad, etapa de crecimiento, tipo de tejido, etc.) y de factores tanto bióticos (competencia entre plantas, enfermedades, herbivoría y regulación de retroalimentación del receptor), como abióticos (temperatura, humedad, pH, radiación solar, limitación de nutrientes). Los efectos alelopáticos varían en función de la variedad de la planta o el genotipo vegetal (Leão et al., 2012; Iannucci et al., 2013).

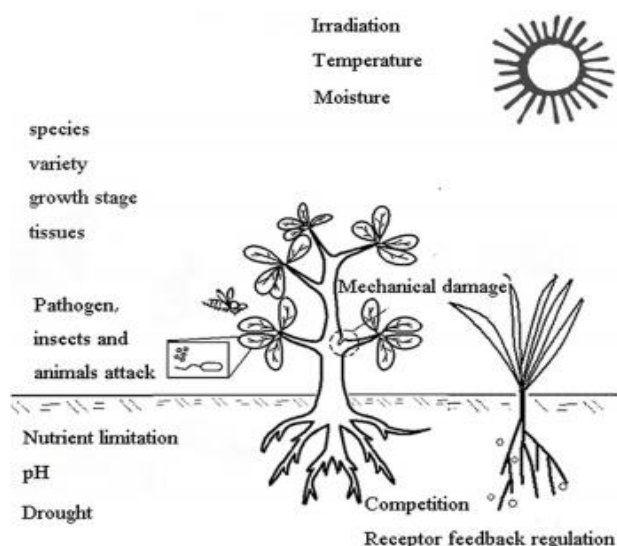


Fig. 7. Producción de aleloquímicos inducida por la propia planta y por diversos factores ambientales (Albuquerque et al., 2010).

Se ha observado que la exposición a estrés puede causar un aumento de aleloquímicos liberados por plantas alelopáticas (Albuquerque et al., 2010). Por lo tanto, el estudio de la liberación de aleloquímicos en diferentes situaciones de estrés puede esclarecer diferentes dudas en referencia al mecanismo de liberación aleloquímico.

La permanencia de los aleloquímicos en el suelo es relativa, va desde unas pocas horas hasta meses (Barto y Cipollini, 2009). El tiempo de degradación de estos es variable y está relacionado con la concentración del aleloquímico, el tipo y estructura del suelo y las enzimas y microorganismos presentes en él (Gu et al., 2009).

Algunos temas idóneos para abordar en futuras investigaciones podrían ser:

- Transporte de aleloquímicos a través del suelo.
- Metodología de absorción de aleloquímicos.
- Biodegradación de aleloquímicos en el suelo.
- Genética de las especies alelopáticas.
- Uso de aleloquímicos en el campo.
- Rápida adaptación de las malezas para evitar el efecto de los aleloquímicos.
- Conjunto de microorganismos que se mantienen en el suelo en presencia de aleloquímicos.
- Estudio de mecanismos de desintoxicación en diferentes especies, lo que nos daría pistas sobre las diferencias entre los diferentes mecanismos usados por plantas y microbios para la desintoxicación alelopática.

Los aleloquímicos se están usando en diversos estudios para la producción de pesticidas ecológicos debido a sus mecanismos disuasorios nutritivos contra la herbivoría (Ihsan et al., 2015).

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta revisión bibliográfica, consiste en analizar y recopilar la información que ha sido publicada en los últimos años, sobre la capacidad que tienen determinados organismos vegetales de producir sustancias aleloquímicas, con el fin de seleccionar aquellas especies más interesantes para la producción agrícola y describir las practicas alelopáticas más comunes en la agricultura.

El conocimiento de una serie de especies con interés alelopático nos puede dar una información valiosa que pueda ser aplicable, por sus efectos beneficiosos, en una agricultura sostenible y ecológica para seguir avanzando en investigaciones futuras.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Para localizar la información necesaria para realizar esta revisión, se han utilizado distintas bases de datos, así como libros, varias páginas webs de ámbito científico y destacados artículos, los cuales ofrecen información sobre las posibles aplicaciones alelopáticas. La forma de ejecución consistió en la selección de títulos de artículos científicos a través de diferentes plataformas de búsqueda, con sus correspondientes palabras clave y filtros de búsqueda para la inclusión o exclusión de diversas fuentes.

- Google Académico “Google Scholar”: Es un Buscador de Google especializado, en el que podemos encontrar gran cantidad de documentos académicos, numerosas revistas científicas, resúmenes y distintas citas correspondientes a numerosas disciplinas y fuentes, a la vez que permite acceder a diversas fuentes desde un solo lugar. Se puede acceder a este buscador a través de la siguiente URL: <https://scholar.google.es/>

- Web of Science a la que se puede acceder a través de la biblioteca de la Universidad de Jaén, utilizando palabras claves como “Allelopathy”, etc., realizándose búsquedas a partir del año 2015.

- La búsqueda en varias revistas científicas como: Environmental Experimental Botany, Frontiers Plants Science, New Phytologist, Acta Physiologia Plantarum, Plant and Soil, Journal Agricultural Crop Science, Industrial Crop and Products, Science Horticulturae, Environmental Science Pollution Research, International Journal Environmental Science, etc. Se puede acceder a ella a través de la Web of Science.

- Pubmed: es un motor de búsqueda a la base de datos MEDLINE que tiene acceso a artículos de texto. Su acceso es gratis desde la UJA y su link es <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>.

En los buscadores se han introducido las palabras clave “Allelopathy”, “allelopathic plants”, “allelochemical”. Dentro de los buscadores se usan filtros para minimizar la búsqueda y obtener resultados más apropiados.

Con la palabra clave “Allelopathy” encontramos 5115 resultados, para seleccionarlos le añadimos varios filtros, entre ellos que fueran “de acceso abierto” y “revisión”, que tuvieran el “texto completo”, y que fueran de los últimos cinco años, de esta manera la búsqueda se nos redujo a 33 resultados.

4. RESULTADOS

En base a la revisión bibliográfica realizada, hemos seleccionado aquellas especies de interés agrícola (gramíneas y legumbres) donde hay una amplia información sobre aplicabilidad al cultivo convencional para su utilización en la reducción de herbicidas químicos y la eliminación de malezas.

4.1. El Arroz

El arroz es un cultivo alelopático que es consumido en un gran número de países (base alimenticia de la población en zonas orientales del planeta) y del cual se han descubierto una gran cantidad de aleloquímicos presentes en sus diferentes variedades. El cultivo permite establecer relaciones entre los diferentes componentes del suelo y el ambiente, produciéndose interacciones positivas y aplicables que pueden ser usadas como herramienta para la obtención de un sistema de producción agrícola sostenible y ecológico (Amb y Ahluwalia, 2016).

Existen gran cantidad de variedades de arroz y cada una presenta una serie de propiedades que la caracterizan, como productividad, resistencia a la sequía, resistencia a altas temperaturas, etc. Pero también hay otros posibles beneficios con numerosas aplicaciones. Entre la gran variedad de aleloquímicos producidos por el arroz, destaca la 5,4-dihidroxi-3,5-dimetoxi-7-O-glucopiranosilflavona, que es exudada por las raíces y una vez en el suelo, puede ser modificado por microorganismos convirtiéndolo en *aglicona*, participando en gran número de procesos biológicos por su interacción con los organismos del suelo (Kong et al., 2008).

Entre las malezas típicas del arroz encontramos *Echinochloa colona* (L.) Link, *Monochoria vaginalis* (Burm.f.) C.Presl, *Erodium cicutarium* (L.) L'Hér., *H. limosa* y *E. crus-galli*, esta última puede ver inhibido su crecimiento por el Momilactona B, un

potente agente alelopático producido a partir de exudados radiculares del arroz (Kato-Noguchi et al., 2008). Rabbani et al. (2001), afirmaron que *E. colona* es la maleza más dañina en el arroz, causando una pérdida de rendimiento del 56% en las variedades Basmati-385 y 42% en Super Basmati.

Por tanto, la utilización de residuos vegetales de arroz en arrozales, es una práctica que reduce la aparición de malezas a la vez que proporciona una importante mejora en el estado de la materia orgánica del suelo. La descomposición de paja, hojas, rastrojos o cáscaras de cultivos con fuertes propiedades alelopáticas se considera un método que puede llegar a reducir la interferencia de malezas en un 60-95% (Narwal, 2000; Jung et al., 2004). Otras plantas también pueden ser utilizadas, por ejemplo, las familias Fabaceae y Passifloraceae presentan una fuerte capacidad alelopática, pudiendo reducir el crecimiento inicial de malezas en cultivos de arroz mediante su aplicación (1-2 toneladas por hectárea), hasta en un 80% (Khanh et al., 2006). Es importante tener en cuenta que se puede reducir el impacto de las malezas sobre el cultivo de arroz retardando el crecimiento de las malezas. Johnson et al. (2004) llevaron a cabo un estudio donde se produjo una reducción del 40-48% en el rendimiento de grano de arroz cuando las malas hierbas emergieron con el cultivo, en comparación con cuando las malas hierbas se controlaron hasta 42 días después de la siembra.

En un estudio llevado a cabo sobre un proyecto comercial de producción de arroz orgánico en Tejas, (Estados Unidos), se evaluó el potencial de supresión de malezas de varias variedades de arroz para su posterior comparación con especies de cultivo comerciales convencionales. Se determinó que la variedad “Rondo”, un arroz de grano largo desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos a través de la mutación de un germoplasma de arroz Indica chino, era de gran interés. Esta variedad combina un alto potencial de producción con una elevada capacidad para suprimir malezas, por lo que es considerado como un cultivo potencial con propiedades alelopáticas. Se concluyó que la habilidad de supresión de malezas de Rondo, y otras variedades de arroz evaluadas, es superior a la de muchas especies de cultivo comerciales (Gealy y Yan, 2012; Korres et al., 2016). El objetivo era combinar la actividad alelopática supresora de malezas con otros rasgos propios que caracterizan al arroz, como, por ejemplo, el rápido crecimiento de las plántulas, producción de brotes secundarios y desarrollo del área foliar, junto con su alto

rendimiento. De esta manera se consigue un cultivo sostenible y ecológico, que permite eliminar el uso excesivo de herbicidas sintéticos y minimizar la pérdida de rendimiento del cultivo (Gealy y Moldenhauer, 2012).

4.2. Quinoa

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Will.) es un pseudocereal con una alta capacidad de adaptación en cuanto a condiciones climáticas se refiere. Posee unos atributos nutricionales excepcionales (Bilalis et al., 2019) y actualmente, se encuentra presente en la dieta de un gran porcentaje de la población, abriendo nuevos campos de mercado para alimentos sin gluten (Adolf et al., 2013). Además, se puede usar tanto para la alimentación humana como la alimentación animal (Nowak et al., 2016).

La quinoa es una halófito muy resistente al estrés hídrico que, además, exhibe grandes aptitudes como un futuro cultivo en zonas áridas, por su alta adaptabilidad a suelos agrícolas de escasa fertilidad (Ruiz et al., 2015), y en ecosistemas salinos, ya que es capaz de tolerar altos niveles de salinidad, superiores a los del agua del mar (Hinojosa et al., 2018).

Se investigaron los efectos alelopáticos de la quinoa sobre la avena (*Avena sativa*). El objetivo principal del estudio era detectar la posible actividad alelopática de la quinoa usando soluciones acuosas procedentes de diferentes tejidos (hojas, raíces e inflorescencias) y evaluar el potencial alelopático de cada uno de ellos. Para evaluar los efectos alelopáticos (inhibitorios) de las soluciones acuosas, se midieron los pesos frescos y secos de las partes superiores y subterráneas de las plantas de avena (macetas) y también se llevaron a cabo estudios en la lenteja de agua y el frijol. Los resultados obtenidos indican que la mayor respuesta fitotóxica de la quinoa se produjo en los tejidos procedentes de las inflorescencias, en las tres especies, en comparación con los tejidos de hojas y de raíces, lo que confirma la posible actividad alelopática de la quinoa (Bilalis et al., 2013, 2019).

La Universidad Tecnológica Federal de Paraná (Brasil), llevó a cabo un estudio sobre el potencial alelopático de la quinoa en una primera fase en laboratorio, y otra fase en el campo. En los resultados de laboratorio se vio que los extractos de quinoa fueron los que presentaron un mayor potencial alelopático en la inhibición de germinación de semillas de *Euphorbia heterophylla*, mientras que, en los resultados de campo, la quinoa quedó en segundo puesto tras la avena en la supresión de

malezas sin interferir en la plantación de soja. Por ello, se presenta a la quinoa como un buen cultivo de cobertura por su notable potencial alelopático y de fácil comercialización (Bianchini, 2017).

4.3. Trigo

El trigo es una especie ampliamente cultivada en todo el mundo que pertenece a la familia de las Poáceas. Su consumo es fundamentalmente alimenticio, ya que su grano se usa para hacer harina, sémola, cerveza y una gran variedad de productos comerciales. Como cultivo, el trigo, es una especie invernal y de primavera, dependiendo de la variedad. El objetivo principal en gran cantidad de estudios sobre el trigo es su uso para cultivarlo en invierno y utilizarlo en la rotación de cultivos. En un experimento realizado en Brasil para determinar si el trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*) es un buen cultivo de invierno, se evaluó el impacto alelopático de éste en los cultivos de avena (*Avena sativa*) y en otra variedad de trigo (*Triticum aestivum*). En el estudio se utilizaron extractos acuosos de trigo sarraceno a diferentes concentraciones: 0, 5, 10, 15 y 20%, en cincuenta parcelas de cultivo experimentales. Los parámetros que se evaluaron fueron el porcentaje de germinación y la masa y longitud de la parte aérea. Tras analizar los datos obtenidos mediante un programa estadístico, se obtuvo que el trigo sarraceno afectó en la germinación de trigo y avena solamente cuando se usaron extractos de 10% de concentración, (**Fig. 8**) (Simonetti et al., 2019).

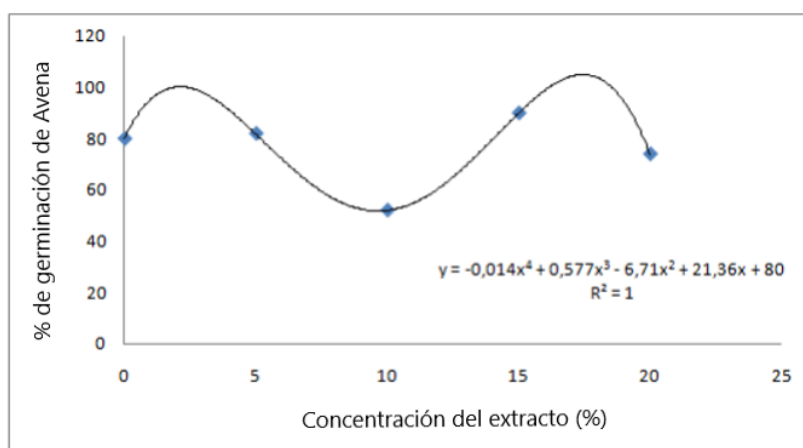


Fig. 8. Porcentaje de germinación de avena en diferentes concentraciones de extracto de trigo sarraceno (Simonetti et al., 2019).

En otro experimento se determinó que el abono de *T. aestivum* en forma de paja inhibe el crecimiento de malezas de *Ipomoea* en cultivos de maíz y soja (Cheng y Cheng, 2015).

Al analizar el perfil de expresión génica de *A. thaliana* después del tratamiento con fagomina, ácido gálico y rutina, que son aleloquímicos que se encuentran en el trigo sarraceno, observaron que los genes que reaccionaron a los aleloquímicos fallaron en varias categorías funcionales: interacción con el medio ambiente, localización subcelular, proteínas con una función de unión, rescate celular, defensa y virulencia, o fallos en el metabolismo. La respuesta de la planta a los aleloquímicos fue similar a la respuesta producida frente al estrés (Golisz et al., 2008).

4.4. Avena

La avena es una especie interesante capaz de aprovechar mejor los nutrientes del suelo, dado que presenta un sistema radicular que alcanza mayor profundidad y por ende, requiere menor cantidad de fertilizantes. La avena produce triterpenos como aleloquímicos, entre otros metabolitos, desempeñando un papel clave en la defensa frente a microorganismos patógenos y estrés abiótico (Owatworakit et al., 2013).

En un estudio realizado en Italia sobre la avena silvestre, se procedió al aislamiento de varios compuestos aleloquímicos de esta especie (*Avena fatua* L.). Para ello, se procedió al aislamiento aleloquímico de las partes aéreas de las plantas y posterior identificación de metabolitos, donde se localizaron: ácido siríngico, tricina, acacetina, siringósido y diosmetina. Posteriormente, se realizaron varios bioensayos donde se evaluó el potencial aleloquímico de estos compuestos sobre la germinación y crecimiento de plántulas de trigo (*Triticum aestivum*). Los resultados obtenidos fueron que, todos los compuestos aleloquímicos, inhibieron de forma significativa la germinación y crecimiento de las plántulas de trigo (Liu et al., 2016).

En otro estudio realizado en Irán, se evaluó el efecto alelopático de extractos acuosos de cebada (*Hordeum vulgare* L.) sobre el crecimiento, fotosíntesis y peroxidación de *Avena sterilis* subsp. *ludoviciana* (Durieu) Nyman. Los extractos acuosos de cebada a diferentes concentraciones (10, 20 y 30%) disminuyeron la actividad fotosintética, sacarosa sintasa y enzimática en avena, siendo este descenso directamente proporcional al nivel de concentración del extracto. En este

estudio se determinó que la acción alelopática de la cebada inhibía de forma significativa el desarrollo de avena (Farhoudi y Lee, 2013).

4.5. Centeno

El centeno (*Secale cereale* L.) es una planta perteneciente al grupo de las gramíneas que se cultiva como forraje o para la obtención de su grano. Se llevó a cabo un estudio en el sudoeste de los Estados Unidos con el objetivo de evaluar el efecto del centeno sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento de la alfalfa (*Medicago sativa* L.), además de medir su capacidad de supresión de malezas. El centeno fue sembrado a mediados de octubre y se recogió en marzo. Posteriormente, se incorporó como rastrojo en el suelo y unas cuatro semanas después fue plantada la alfalfa. El experimento consistió en cultivar diez plantas de alfalfa en tres repeticiones tras el centeno junto con tres repeticiones previas sin centeno. Los resultados obtenidos fueron que en las parcelas sin centeno había una presencia de malezas mucho mayor que en las parcelas cultivadas solamente con alfalfa. La cobertura media por malezas de las plantas de la plantación sin centeno fue del 77%, mientras que en las parcelas con post-cosecha fue menor a 5%. En cuanto a las malezas presentes en los cultivos, no se observó un patrón concreto de especies en particular para un cultivo específico. Los resultados sugirieron de forma clara que el centeno tiene un fuerte potencial alelopático y una alta capacidad como supresor de malezas en cultivos de alfalfa. También se han observado efectos alelopáticos del centeno hacia la alfalfa cultivada, reduciendo la aparición de plántulas hasta un 64% y un apreciable descenso de rendimiento (entre el 15% y el 43%) (Adhikari et al., 2018).

En otro estudio se investigó el efecto alelopático del centeno (*S. cereale*) sobre cultivos de *Perilla frutescens* (L.) Britton, (albahaca japonesa o cóleo silvestre) y las respectivas malezas que crecen en este cultivo. Se realizaron dos cultivos, una plantación *P. frutescens* a la que se le aplicó extractos de hojarasca de centeno, y un cultivo de *P. frutescens* control al que no se le aplicaron exudados. Los resultados que se obtuvieron fueron que el uso del centeno como cobertura retardó la germinación de las malezas hasta cincuenta días después de la aplicación. Además, se encontró una tasa de inhibición de malezas superior al 80% en comparación con el cultivo control. Se estableció una relación inhibitoria de forma

que al aumentar el número de cultivos de cobertura o la densidad de siembra, se produjo un mayor grado de inhibición (Ghimire et al., 2019).

4.6. Cebada

La cebada es una gramínea con diversas aplicaciones, entre las cuales destacan su uso en la fabricación de cerveza y como alimento tanto de personas como de animales. En estudios anteriores se comprobó que la cebada tenía actividad alelopática, concretamente sus semillas, exudados radiculares y residuos vegetales (Bertholdsson, 2004). Del mismo modo, se comprobó que la cebada presenta autotoxicidad, provocando la disminución de su propia germinación y desarrollo de plántulas. Actualmente se han identificado aproximadamente unos 44 compuestos con potencial aleloquímico en esta especie (Kremer y Ben-Hammouda, 2009).

Bouhaouel et al., (2014) llevaron a cabo un estudio en el Norte de África sobre el posible efecto alelopático de los exudados de raíz de cebada (*Hordeum vulgare* ssp. *Vulgare* L.) sobre sí misma y sobre las malezas *Bromus diandrus* Roth y *Lolium rigidum* Gaudin, especies comunes en países como Túnez, que afectan en gran medida a los cultivos de cereales. Para llevar a cabo un estudio representativo se analizaron los resultados de dos patrones de cultivo diferentes, uno en el que la especie potencialmente aleloquímica (cebada) se sembró junto a *B. diandrus* y *L. rigidum*, y otro en el que se sembraron secuencialmente, impidiendo de esta forma que, en los resultados, la competencia natural entre especies pueda ser confundida con la alelopatía. Se observó que los aleloquímicos procedentes de la cebada presentaban un mayor efecto inhibitorio en las malezas que en la propia cebada, por lo que se dedujo que el potencial alelopático de los exudados de raíz de cebada depende de la especie receptora. Por otro lado, se comprobó que el tiempo afecta de manera directa al grado de toxicidad de los aleloquímicos, posiblemente porque experimentaran una modificación química llevada a cabo por microorganismos presentes en el suelo o factores abióticos.

4.7. Haba

El haba (*Vicia faba* L.) es una legumbre perteneciente a la familia de las fabáceas que es cultivada principalmente para consumo humano. Esta legumbre presenta nódulos capaces de fijar el nitrógeno, una habilidad que es muy útil en la rotación de cultivos, ya que su uso proporciona al suelo una renovación de nutrientes y mejora

de su fertilidad. En un estudio realizado por la Universidad de Pontevedra sobre rotaciones de cultivos, se estudió la capacidad del haba como especie supresora de malezas mediante su aplicación en forma de abono verde en una plantación de maíz. El estudio se llevó a cabo de dos formas, mediante el uso de macetas en invernadero y mediante experimentos de campo. En las macetas, el maíz se sembró en el momento de la incorporación del haba y se comprobó que redujo la germinación, el crecimiento de la raíz y tallo y peso aéreo de las malezas *Amaranthus retroflexus* L. y *Echinochloa crus-galli*. Mientras tanto, en el experimento de campo, se observó una disminución de malezas dicotiledóneas como *Amaranthus retroflexus*, *Chenopodium album* L. y *Solanum nigrum* L. y monocotiledóneas como *Digitaria sanguinalis* y *Cyperus rotundus* en las plantaciones de maíz y judía incorporada. Al realizar una comparación de biomasa de malezas entre las parcelas control y las experimentales, se contabilizó una diferencia de hasta el 67.2% (Álvarez-Iglesias et al., 2018).

En otro estudio relacionado con la rotación de cultivos, se realizaron experimentos en el laboratorio utilizando extractos acuosos de la parte aérea de *Vicia Faba* a fin de evaluar su potencial fitotóxico, mediante su aplicación en lechuga, maíz y soja utilizados como cultivo de forraje en ambientes templados, ya que todo parece indicar que la proliferación de malezas tras la incorporación de *Vicia faba* en forma de abono verde es menor. Además, también se evaluaron los efectos producidos en malezas muy comunes como *A. retroflexus*, *E. crus-galli* y *D. sanguinalis*. Los resultados se mostraron mediante curvas relacionando la dosis administrada y la respuesta obtenida de los extractos acuosos de *Vicia faba*, demostrando una disminución significativa en el grado de germinación y crecimiento temprano de las malezas, sobre todo a bajas y medias concentraciones (Álvarez-Iglesias et al., 2014).

4.8. Judía

La judía es una planta perteneciente a la familia Fabaceae cultivada y consumida en todo el mundo desde la antigüedad. En un estudio realizado por la Universidad Agrícola de Atenas (Grecia), se midieron los efectos alelopáticos del frijol o judía terciopelo (*Mucuna pruriens* Var. *Utilis* (Wall. ex Wight) L.H.Bailey) sobre una maleza (*Lolium rigidum*) característica de zonas mediterráneas. El experimento se llevó a cabo en macetas ubicadas en invernadero, donde se realizaron tres repeticiones del

experimento, utilizando un control sin tratamiento y residuos foliares de la judía. Tras esto, se procedió a la incorporación de los residuos al suelo y tras veinte días se agregaron cuarenta semillas de *Lolium rigidum* por maceta. A medida que la maleza fue creciendo, se llevaron a cabo mediciones sobre el crecimiento y la tasa de emergencia los días 11 y 19 después de la siembra. Esos datos fueron comparados con el control, observándose una diferencia significativa entre ambos, dado que los residuos de frijol redujeron la altura (26%), el número de hojas (51%) y la biomasa (62%) de *Lolium rigidum* (Travlos et al., 2018).

En otro estudio consultado sobre *Mucuna pruriens* (L.) DC., se estudia la capacidad alelopática de esta especie sobre cultivos de lechuga (*Lactuca sativa* L. Var. *Vanda*). El diseño experimental consistió en cuatro repeticiones combinando dos formas de incorporar la paja de *M. pruriens* con parcelas sometidas a desmalezado y parcelas sin él, además, estas parcelas se encontraban subdivididas.

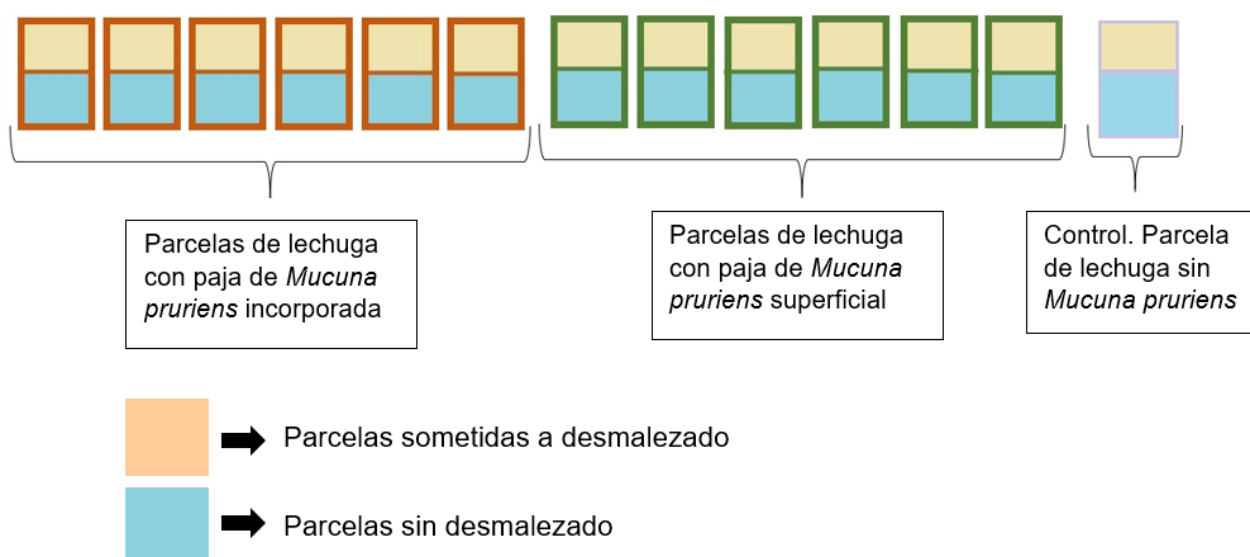


Fig. 9. Esquematización de la disposición de las parcelas de siembra.

Los resultados mostraron que no hubo variación significativa entre la masa seca y fresca de las malezas, tanto en uso superficial como en el incorporado. A pesar de ello, el rendimiento del cultivo de lechuga aumentó, viéndose reflejado en el aumento del 27% de la masa foliar y 20% de masa seca, además de un aumento del 32% de producción, posicionando a *Mucuna pruriens* como una importante leguminosa a considerar por sus propiedades alelopáticas en la optimización y mejora del cultivo de lechuga (Barbosa et al., 2018).

4.9. Soja

La soja (*Glycine max* L.) es otra leguminosa con un alto potencial comercial, ya que está presente en la alimentación (humana y animal) comercializándose en todo el mundo. En la universidad de Irán llevaron a cabo un estudio donde evaluaron el potencial alelopático de la soja en relación a la supresión de dos especies de malezas, (*Sorghum halepense* L.) y (*Secale cereale* L.). El experimento se llevó a cabo en laboratorio y consistió en la preparación de extractos acuosos procedentes del tallo y raíces de soja a diferentes concentraciones (100, 75, 50 y 25%) para medir el grado inhibitorio a cada concentración tomando como control agua destilada. Los resultados obtenidos en este estudio demostraron que los extractos procedentes del tallo eran más fitotóxicos que los extractos de raíz, dado que a todas las concentraciones se produjo inhibición del crecimiento y germinación en ambas especies (con una mayor inhibición en *S. halepense*), mientras que el extracto de raíz produjo una inhibición de crecimiento en *S. cereale* a una concentración del 100% (Mahmoodzadeh y Mahmoodzadeh, 2013).

El jopo de girasol (*Orobanche cumana* Wallr.) es una planta angiosperma holoparásita, que penetra en los tejidos vasculares de las raíces del girasol (*Helianthus annuus* L.), obteniendo así agua y nutrientes necesarios para su supervivencia. Esta planta parásita presenta una grave amenaza puesto que puede producir grandes pérdidas en los cultivos de girasol. Una posible solución es la utilización de cultivos cebo o trampa (Rodríguez Ojeda, 2016). El uso de cultivos cebo consiste en sembrar una especie que estimule la germinación del jopo para, una vez germinada, destruirlas antes de que el patógeno complete su ciclo, en cambio, los cultivos trampa, son cultivos poco afines con el jopo (no pueden ser parasitados por esta especie) capaces de inducir su germinación, pero al no haber implantación, las semillas mueren (Consejería de Agricultura y Ganadería de Castilla y León, 2009). Los principales compuestos aleloquímicos que estimulan la germinación del jopo de girasol son estrigolactonas, sesquiterpenolactonas y heliolactonas (Rodríguez Ojeda, 2016). En este estudio se evalúa la capacidad de la soja para hacer germinar al jopo y su posible uso como cultivo trampa en las plantaciones de girasol, comenzando con la siembra de catorce variedades de soja en macetas para preparar extractos metanólicos y acuosos de tallo, raíz y hojas con la finalidad de inocularlo a las placas Petri contenedoras de las semillas de jopo. Se

obtuvo como resultado que la tasa de germinación de las semillas de jopo osciló entre 70 y 80%, y se produjo la mayor tasa de germinación con los extractos metanólicos de raíces en comparación con los de tallos y hojas, lo que coincide con la hipótesis de que las estrigolactonas son sintetizadas en la raíz y forman parte de la actividad alelopática de la soja. Con todo ello, se concluyó que la soja tiene potencial alelopático para ser utilizada como cultivo trampa para el girasol, ya que los resultados indicaron que la soja puede producir la germinación del jopo en un alto porcentaje (Zhang et al., 2013).

4.10. Trébol

El trébol (*Trifolium* spp.) es un género que comprende un gran número de especies de la familia de las fabáceas, conocidas como tréboles, comúnmente usados como cultivo de forraje de buena calidad y apetecible para el ganado. La remolacha (*Beta vulgaris* L.) es un cultivo que necesita la aplicación de herbicidas químicos debido a la gran aparición de malezas en sus cultivos, por lo que este estudio se centra en la posible sustitución de éstos por mantillo a base de diferentes especies alelopáticas. Para ello se llevó a cabo un experimento de campo donde se analiza la capacidad supresora de varias especies de leguminosas y gramíneas, entre las cuales se encuentra *Trifolium subterraneum* L., trébol común en la Cuenca Mediterránea. El experimento consistió en plantar cobertura vegetal viva o mantillo vivo en el cultivo en dos etapas, la primera, dos días después de la siembra de remolacha y otra, treinta días después, para luego comparar el posible efecto alelopático producido al cultivo con una parcela a la que se le aplica herbicida químico. Los resultados obtenidos demostraron una mayor biomasa en el mantillo vivo plantado dos días después de la siembra de remolacha, pero no hubo correlación entre el tiempo de siembra y el grado de supresión de malezas. La especie alelopática con mayor supresión de malezas fue *T. subterraneum* con un 71% de supresión, mientras que, observando el rendimiento de remolacha, la parcela con herbicida obtiene el primer puesto con 12.6 toneladas por hectárea, sin embargo, *T. subterraneum* produjo 11.1 toneladas por hectárea, una cifra a considerar ya que la diferencia entre ambos es muy reducida (Kuntz et al., 2016).

El trébol rojo (*Trifolium pratense* L.) es una especie de trébol también utilizada como cultivo de forraje que presenta un alto contenido en proteínas y una alta tasa de fijación del nitrógeno, por lo que es común que se use con el objetivo de

aumentar la fertilidad del suelo. McKenna et al. (2018) llevaron a cabo una revisión donde contrastaron información relacionada con el uso del trébol rojo en la agricultura, donde concluyeron que es una especie capaz de suprimir un gran número de malezas como: *A. thaliana*, *Sinapis arvensis* L., *Zea mays* L., *Lamium amplexicaule* L., *Papaver rhoeas* L., *Chamomilla recutita* L., *Pyrola minor* L., *Stellaria media* L., *Galium aparine* L., *Convolvulus floridus* L.F, *Hypericum perforatum* L., *Viola arvensis* Murray, *Galium aparine* L., *Elytrigia repens* Desv. Asimismo, los cultivos asociados al trébol rojo no solo presentan mejoras en la aportación de nitrógeno, también pueden experimentar aumento de la materia orgánica, incremento de la actividad microbiana del suelo, fitorremediación, suministro de alimento para polinizadores, aumento de la agregación del suelo y su porosidad. Lo que conduce a un suelo más productivo para el cultivo (Mckenna et al., 2018).

5. DISCUSIÓN

En base a los resultados revisados, podemos considerar una serie de aplicaciones prácticas de las especies citadas anteriormente.

5.1. Aplicaciones del arroz

Dadas las características alelopáticas de las diferentes variedades de arroz, sería interesante aplicar las técnicas biotecnológicas para transmitir los rasgos alelopáticos relevantes, entre cultivos de la misma especie, o incluso proponerlo entre diferentes especies, ya que es posible detectar la presencia de rasgos alelopáticos mediante el uso de marcadores moleculares (Chou, 1999). Así, se podrían erradicar en gran medida las pérdidas de rendimiento y calidad del cultivo causado por malezas, que son unos de los mayores problemas para la producción de arroz en la actualidad. El desarrollo de cultivos con rasgos alelopáticos mejorados por modificación genética debe hacerse con cautela, teniendo en cuenta la evaluación del riesgo ecológico (no tóxico) y seguridad para los humanos y el ecosistema, ya que lo interesante es que la relación beneficio/coste sea rentable para la productividad del cultivo (Amb y Ahluwalia, 2016).

5.2. Beneficios de la quinoa

Las tensiones abióticas en la región mediterránea se están volviendo cada vez más comunes debido al cambiante clima al que nos enfrentamos. Se prevé que en esta zona se produzca una subida de las temperaturas junto con ambientes más secos,

propiciando la desertificación de suelos (Jacobsen, 2014). Por ello, es una buena opción presentar a la quinoa como un cultivo óptimo de futuro, ya que es una especie con una amplia capacidad de adaptación y de supervivencia, tolerante al estrés hídrico y salino, con un alto valor nutricional y económico. Además, presenta una amplia variedad de aplicaciones por lo que es considerado un cultivo primordial en zonas áridas y secas. Puede considerarse como cultivo de cobertura, usarse en rotación de cultivos y utilizar su grano para alimentación humana y animal, que ya se comercializa, desde hacer varios años, en algunos países americanos y europeos (Spehar y Santos, 2002; Bilalis et al., 2019).

5.3. Importancia del trigo con efectos alelopáticos

La selección de una gramínea como alternativa para la rotación de cultivos, por ejemplo, el trigo, favorece la disminución de enfermedades y plagas, ayudando a mejorar la calidad del suelo (mejor fertilización). En el estudio sobre el efecto alelopático del trigo sarraceno sobre la avena y otra variedad de trigo mencionado anteriormente, no se obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos de extractos acuosos de trigo sarraceno a diferentes concentraciones, incluso cuando la concentración aumentó, lo que quiere decir que incluso habiendo afectado a la germinación a la concentración de 10%, no causó una gran interrupción en el desarrollo inicial de las plantas con la aplicación de las demás concentraciones, lo que nos proporciona una ventaja a la hora de proponer su uso en la rotación de cultivos, ya que no detendría el desarrollo o crecimiento de la avena y trigo y no disminuiría su producción. Además, los resultados muestran que la alelopatía puede estar relacionada con la expresión de genes involucrados en la respuesta al estrés biótico o abiótico. Esto nos sugiere que las vías de respuesta frente aleloquímicos y estrés pueden converger, sin embargo, esto es solo una hipótesis por lo que se necesitan estudios para comprender mejor esta interacción y el modo de acción de los aleloquímicos (Simonetti et al. 2019).

5.4. Avena, ejemplo de fitotoxicidad alelopática

Dentro de una misma especie puede aparecer fitotoxicidad alelopática, como es el caso de la avena. La variedad de avena silvestre, *Avena fatua*, es capaz de proliferar e invadir los campos de avena de cultivo (*Avena sativa*) y de trigo. Dado los resultados obtenidos en los estudios mencionados anteriormente, la especie *A. fatua*

inhibe el crecimiento de trigo (*T. aestivum*), por lo que sería conveniente cultivar el trigo con alguna especie que impida la proliferación de la avena, evitando su desarrollo y efecto negativo sobre el trigo.

Aunque en estos estudios se haya demostrado el carácter alelopático de la *Avena fatua* frente a otros cultivos, habrá que seguir investigando hasta conseguir una aplicación eficiente. De cara al futuro, sería interesante la evaluación de soluciones acuosas de *Avena fatua*, incluso con especies procedentes de diversos ambientes. Esto ayudará a esclarecer cómo actúa dicha variedad y su efecto en otros organismos de tal forma que se pueda usar en la optimización de la agricultura actual (Liu et al., 2016).

5.5. Centeno para control de malezas en la agricultura

En los estudios contemplados acerca del uso del centeno como cobertura sobre cultivos de alfalfa (*Medicago sativa*), su aplicación fue positiva, dado que inhibió en un 80% la aparición de malezas, pero con el inconveniente de que también redujo de forma considerable la aparición de nuevas plántulas de alfalfa. Estos datos sugieren que es posible que el efecto alelopático del centeno solo se presente en la primera temporada, sin embargo, puede que las pérdidas económicas producidas por la reducción del rendimiento de cultivo supongan un enorme costo. Sería útil realizar futuros estudios en cultivos de alfalfa, con y sin centeno y en diferentes localizaciones, para determinar si existe una variación genética en la alfalfa sobre su tolerancia a la alelopatía del centeno (Adhikari et al., 2018). También sería interesante el estudio a nivel molecular de los componentes aleloquímicos del centeno, teniendo en cuenta que ha demostrado ser una especie con un alto potencial alelopático aplicable al control de malezas en la agricultura. Además, es un cultivo que puede ser consumido tanto por humanos como por animales, por lo que su participación en la rotación de cultivos puede aportar notables beneficios económicos, en vista de que en los últimos años ha aumentado considerablemente su comercialización.

5.6. Cebada de baja autotoxicidad

En los cultivos de cereales, la invasión de *Bromus diandrus* Roth y *Lolium rigidum* Gaudin se encuentra muy favorecida por diversos factores como el monocultivo, la inexistencia de técnicas de cultivo adecuadas, la ausencia de eficacia de los

métodos de control tradicionales y el uso de herbicidas genéricos (Souissi et al., 2000).

En cuanto a la autotoxicidad de la cebada, a día de hoy, no se ha demostrado cuales de sus partes son las que provocan esta autotoxicidad. En estudios previos, se llegó a la conclusión de que la autotoxicidad era causada por el efecto alelopático de sus residuos, pero la inexistencia de más estudios sobre ello deja la posibilidad de que las demás partes de la planta también provoquen algún efecto alelopático sobre el crecimiento de la cebada. Se deberán realizar más estudios para entender la capacidad alelopática de la cebada y el efecto de sus aleloquímicos en el ecosistema. El hecho de que la cebada sea menos susceptible a sus propios aleloquímicos que otras especies es también una cuestión que merece la pena investigar, además, estos aleloquímicos podrían formar parte de la dinámica del ecosistema, y su utilización como bioherbicidas merece una mayor consideración (Bouhaouel et al., 2014).

5.7. Rápido efecto supresor del Haba

Tras los resultados obtenidos en el primer experimento mencionado anteriormente, se puede decir que el haba (*Vicia Faba*) presenta grandes beneficios en su uso como abono verde, ya que la supresión de malezas en este caso fue inmediata y muy eficaz en cultivos de maíz, además de haber influido no solo en una especie, sino en varias especies de malezas. A sí mismo, la germinación y el desarrollo de las plantas de maíz no fueron perjudicados, sino que mejoró en comparación con el control (Álvarez-Iglesias et al., 2018).

Sin embargo, en el segundo experimento hubo un inconveniente en cuanto a la máxima concentración en la que fueron aplicados los extractos acuosos de *Vicia faba*, ya que a esa concentración no se produjo el máximo rendimiento del cultivo. Dado que a bajas y medias concentraciones los exudados dieron buenos resultados, el crecimiento de los cultivos fue mayor y no se vieron afectados, además de que la supresión de malezas fue óptima. Podemos considerar que el uso de la biomasa aérea de *Vicia faba* es un material prometedor como método de control de malezas en sistemas de cultivo sostenibles de maíz, lechuga y soja. De cara a futuras investigaciones sería conveniente proponer estudios donde se analizaran diferentes formas de *Vicia faba* para el control de malezas como mantillo de paja, exudados

radiculares o su uso en la rotación de cultivos de cara a aprovechar su fruto y a la vez sus propiedades como cultivo alelopático (Álvarez-Iglesias et al., 2014).

5.8. Judía como método específico de supresión

En el primer experimento se corroboró el alto potencial alelopático de *Mucuna pruriens* en los cultivos de la maleza *Lolium rigidum*, ya que inhibió su desarrollo y crecimiento. Si esto fuera empleado en grandes cultivos, sería una herramienta con una alta aplicabilidad, pero muy específica, ya que se centran en la supresión de una sola especie de maleza. Sería de gran interés proponer estudios que evaluaran la capacidad supresora de *Mucuna pruriens* a gran escala, aplicada en cultivos abiertos donde fuera posible el crecimiento de diversos tipos de malezas. En el segundo experimento relacionado con *M. pruriens*, el grado de supresión de malezas fue pequeño, pero en cambio la producción, crecimiento y desarrollo del cultivo de lechuga fueron notablemente más altas en comparación con la parcela control en la que no había inoculación de *M. pruriens*. En base a estos datos, se puede decir que la capacidad alelopática de esta especie no solo se reduce a la supresión de malezas, también existen otros beneficios que se pueden conseguir mediante su uso, por lo que su aplicación futura en modelos de herbicidas y/o potenciadores de cosecha puede ser una buena alternativa sostenible. La información obtenida en base a estos estudios no siempre es extrapolable a otras especies, ya que las relaciones alelopáticas pueden ser positivas o negativas y varían con cada una, pero gracias a ellos podemos intuir el éxito de su aplicación a gran escala (Travlos et al., 2018; Barbosa et al., 2018).

5.9. La soja y sus grandes propiedades

En el primer estudio, la soja redujo significativamente la germinación y el crecimiento de *S. halepense* y *S. cereale*, aunque esta última especie necesitó una concentración máxima de extracto de soja para su inhibición, por tanto, se puede considerar que la soja es una buena herramienta en la supresión de malezas. Este resultado puede deberse a los compuestos fenólicos procedentes del tallo y raíz de la soja, ya que son sustancias con un alto potencial alelopático y pueden encontrarse en una amplia gama de tejidos vegetales, aunque el extracto de tallo de *G. max* tuvo una mayor tasa de inhibición que el extracto de raíz. Esto podría estar relacionado con una mayor concentración de aleloquímicos solubles en las partes

aéreas de la soja, o con una variación en la composición química entre los tejidos (Mahmoodzadeh y Mahmoodzadeh, 2013).

En cuanto a la aplicación de la soja en el control de plantas parasitas, podemos decir que se ha demostrado un alto potencial germinativo de la soja hacia *O. cumana*, junto con una gran capacidad para reducir el banco de semillas de este parásito. Sería interesante llevar la investigación hacia cultivos de campo para determinar si verdaderamente es viable su uso y catalogar la soja como cultivo trampa o cebo, ya que la capacidad de ser hospedador es determinante en cada uno. Por otra parte, también sería de gran interés la investigación enfocada al aislamiento de aleloquímicos como las estrigolactonas, sesquiterpenolactonas y heliolactonas, que podría suponer un gran descubrimiento para la realización de sustancias promotoras de la germinación de *O. cumana* (Rodríguez Ojeda, 2016).

5.10. Beneficios del Trébol como forraje

En base a los resultados obtenidos se ha demostrado que el uso de herbicida químico en la remolacha, a pesar de proporcionar una mayor producción al cultivo, no merece la pena, ya que el rendimiento del cultivo utilizando mantillo vivo a base de trébol (*T. subterraneum*) es prácticamente igual al anterior. Al ser una planta característica de zonas mediterráneas, presenta un potencial alto para convertirse en una herramienta útil, aunque es necesaria una investigación de mayor rango que comprenda la aplicación de la cobertura vegetal viva o mantillo vivo en diferentes condiciones ambientales y estudiar las diferentes especies adecuadas para cada cultivo con el fin de evitar efectos adversos antes de que sean extrapolados a sistemas de cultivo modernos (Kuntz et al., 2016). Mientras tanto, *T. pratense*, en la revisión de McKenna et al. (2018), otorga una gran cantidad de beneficios al suelo y al sistema de cultivo. Las estrategias de gestión de esta especie en la agricultura pueden ser diversas y, al tratarse de un fertilizante barato con un gran aporte de minerales, puede ser de gran importancia en zonas empobrecidas económicamente o aumentar la rentabilidad de aquellos sistemas de cultivo que hagan uso de dicha cobertura vegetal.

6. CONCLUSIÓN

Son numerosos los inconvenientes que conlleva el uso de herbicidas convencionales, entre ellos podemos mencionar la resistencia desarrollada por las malezas debido a su uso, los problemas ocasionados a la salud humana, ambiental y animal, su costo, la pérdida de biodiversidad y de suelo, etc. Estos problemas se podrían solucionar con el progreso de la alelopatía, aprovechando su potencial natural para garantizar el desarrollo agrícola sostenible y ecológico, investigando los sistemas de cultivo que emplean la influencia estimuladora/inhibidora de la alelopatía para regular el crecimiento y desarrollo de las plantas, tratando de evitar la autotoxicidad alelopática. La investigación centrada en la alelopatía ha evolucionado lentamente en comparación con otras áreas de la ciencia, por ello, y debido a que la alelopatía provoca efectos difíciles de predecir en el cultivo, es necesario proponer líneas de investigación que se centren en la posible combinación de especies alelopáticas (estimulantes del cultivo e inhibitorias de malezas), ya que existen barreras genéticas que impiden la asociación de determinadas especies. De igual modo, es importante ampliar la comprensión del papel de los aleloquímicos en la naturaleza, ya que establecen redes de comunicación entre diferentes organismos importantes para el mantenimiento del ecosistema. En consecuencia, una investigación enfocada al aislamiento, identificación y síntesis de aleloquímicos supondría un cambio disruptivo en la agricultura ecológica. Esta línea de investigación es muy cara y no hay avances suficientes para aislar aleloquímicos complejos, pero mediante el aislamiento de aleloquímicos de estructura simple, se podrían sintetizar herbicidas y pesticidas ecológicos de reducido coste y de fácil extracción para su posterior comercialización.

Hoy en día sabemos que el cambio climático afectará de forma directa a la agricultura, debido a cambios como el aumento de las temperaturas, la prolongación de las épocas de sequía, el aumento de dióxido de carbono, etc. Sabiendo esto, es precisa una búsqueda inminente de cultivos adaptados a estas condiciones, que tengan una mayor capacidad de contrarrestar los efectos del cambio climático ofreciendo un enfoque adaptativo. Este papel pueden desempeñarlo los cultivos alelopáticos que, gracias a la producción de aleloquímicos, suprimen las malezas de forma natural pudiendo reducir el uso de herbicidas. Esta selección de cultivos

alelopáticos traerá a la larga una reducción de la contaminación, la optimización de los costes y una producción sostenible de alimentos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abenavoli, M. R., Lupini, A., Oliva, S., Sorgona, A. (2010). Allelochemical effects on net nitrate uptake and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize seedlings. *Biologia Plantarum*, 54(1), 149-153
- Abenavoli, M. R., Sorgona, A., Sidari, M., Badiani, M., Fuggi, A. (2003). Coumarin inhibits the growth of carrot (*Daucus carota* L. cv. Saint Valery) cells in suspension culture. *Journal Plant Physiology*, 160(3), 227-237
- Adhikari, L., Mohseni-Moghadam, M., Missaoui, A. (2018) Allelopathic effects of cereal Rye on weed suppression and forage yield in alfalfa. *American Journal of Plant Sciences*, 9, 685-700
- Adolf, V. I., Jacobsen, S.-E., Shabala, S. (2013). Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Environmental and Experimental Botany*, 92, 43-54
- Albuquerque, M. B., Santos, R. C., Lima, L. M., Melo Filho, P. de A., Nogueira, R. J. M. C., Da Câmara, C. A. G., Ramos, A. de R. (2010). Allelopathy, an alternative tool to improve cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(2), 379-395
- Álvarez-Iglesias, L., Puig, C. G., Garabatos, A., Reigosa, M. J., Pedrol, N. (2014). *Vicia faba* aqueous extracts and plant material can suppress weeds and enhance crops. *Allelopathy Journal*, 34(2), 299-314.
- Álvarez-Iglesias, L., Puig, C. G., Revilla, P., Reigosa, M. J., Pedrol, N. (2018). Faba bean as green manure for field weed control in maize. *Weed Research*, 58(6), 437-449
- Amb, M. K., Ahluwalia, A. S. (2016). Allelopathy: potential role to achieve. New milestones in rice cultivation. *Rice Science*, 23(4), 165-183
- An, M., Pratley, J., Haig, T. (1998). Allelopathy: from concept to reality. *Proceedings of the 9th Australian Agronomy Conference*. Agronomy, Growing a greener future. Environmental and Analytical Laboratories, Wagga Wagga, Australia.

- Andrew, I. K. S., Storkey, J., Sparkes, D. L. (2015). A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management. *Weed Research*, 55(3), 239-248
- Azcón-Bieto, J., Talón, M. (2008). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana de España
- Bais, H. P., Weir, T. L., Perry, L. G., Gilroy, S., Vivanco, J. M. (2006). The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology*, 57(1), 233-266
- Barbosa, J. D., Franke, D. E., Ferreira, S. D., Salvalaggio, A. C., da Costa, N. V. (2018). Manejo da mucuna-preta na supressão de plantas daninhas na cultura da alface-crespa. *Revista de Agricultura Neotropical*, 5(2), 13-18
- Barto, E. K., Cipollini, D. (2009). Half-lives and field soil concentrations of *Alliaria petiolata* secondary metabolites. *Chemosphere*, 76, 71-75.
- Bertholdsson, N.O. (2004). Variation in allelopathic activity over 100 years of barley selection and breeding. *Weed Research*, 44, 78-86
- Bhadoria, P. (2011). Allelopathy: a natural way towards weed management. *American Journal of Experimental Agriculture*, 1(1), 7-20.
- Bianchini, A. (2017). Efeito alelopático de plantas de cobertura na inibição de plantas daninhas ocorrentes em soja (tesis de maestria). Universidad Tecnológica Federal, Paraná (Brasil).
- Bilalis, D. J., Roussis, I., Kakabouki, I., Folina, A. (2019). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) crop under Mediterranean conditions: a review. *Ciencia e Investigación Agraria*, 46(2), 51-68
- Bilalis, D.J., Travlos, I.S., Karkanis, A., Gournaki, M., Katsenios, G., Hela, D., Kakabouki, I. (2013). Evaluation of the allelopathic potential of quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd). *Romanian Agricultural Research*, 30, 359-364
- Blanco, Y. (2006). La utilización de la alelopatía y sus efectos en diferentes cultivos agrícolas. *Cultivos Tropicales*, 27(3), 5-16

- Bouhaouel, I., Gfeller, A., Fauconnier, M.-L., Rezgui, S., Slim Amara, H., Du Jardin, P. (2014). Allelopathic and autotoxicity effects of barley (*Hordeum vulgare* L. ssp. *vulgare*) root exudates. *BioControl*, 60(3), 425-436
- Burgos, N. R., Talbert, R. E., Kim, K. S., Kuk, Y. I. (2004). Growth inhibition and root ultrastructure of cucumber seedlings exposed to allelochemicals from rye (*Secale cereale*). *Journal of Chemical Ecology*, 30(3), 671-689
- Cai, S. L., Mu, X. Q. (2012). Allelopathic potential of aqueous leaf extracts of *Datura stramonium* L. on seed germination, seedling growth and root anatomy of *Glycine max* (L.) Merrill. *Allelopathy Journal*, 30(2), 235-246
- Chaimovitsh, D., Rogovoy Stelmakh, O., Altshuler, O., Belausov, E., Abu-Abied, M., Rubin, B., Sadot, E., Dudai, N. (2012). The relative effect of citral on mitotic microtubules in wheat roots and BY2 cells. *Plant Biology*, 14(2), 354-364
- Cheema, Z. A., Khaliq, A., Saeed, S. (2004). Weed control in maize (*Zea mays* L.) through sorghum allelopathy. *Journal of Sustainable Agriculture*, 23(4), 73-86
- Cheng, F., Cheng, Z. (2015). Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1020.
- Cheng, Z., Xu, P. (2013). Lily (*Lilium* spp.) root exudates exhibit different allelopathies on four vegetable crops. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 63(2), 169-175.
- Chou, C.H. (1999). Roles of allelopathy in plant biodiversity and sustainable agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 18(5), 609-636
- Consejería de Agricultura y Ganadería de Castilla y León. (2009). Boletín Fitosanitario 2009/2. El jopo, *Orobanche* ssp. Junta de Castilla y León. Recuperado de <https://agriculturaganaderia.jcyl.es/web/jcyl/AgriculturaGanaderia/es/Plantilla100Detalle/1241432326693/Publicacion/1284254258454/Redaccion>
- Einhellig, F. A. (1995). Allelopathy: current status and future goals. En Inderjit, K. M. M. Dakshini y F. A. Einhellig. (Eds.), *Allelopathy: Organisms, Processes, and Applications* (pp. 1-24). Washington, Estados Unidos: American Chemical Society.
- Farhoudi, R., Lee, D.J. (2013). Allelopathic effects of barley extract (*Hordeum vulgare*) on sucrose synthase activity, lipid peroxidation and antioxidant enzymatic activities of

Hordeum spontaneum and *Avena ludoviciana*. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 83(3), 447-452

- Fernández, C., Santonja, M., Gros, R., Monnier, Y., Chomel, M., Baldy, V., Bousquet-Mélou, A. (2013). Allelochemicals of *Pinus halepensis* as drivers of biodiversity in Mediterranean open mosaic habitats during the colonization stage of secondary succession. *Journal of Chemical Ecology*, 39(2), 298-311
- Fitter, A. H. Hay, R. M. (2002). *Environmental Physiology of plants* (3^o ed.). London: Academic press.
- Fragasso, M., Iannucci, A., Papa, R. (2013). Durum wheat and allelopathy: toward wheat breeding for natural weed management. *Frontiers in Plant Science*, 4, (375).
- Gamarra, C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortiz, M., Galeano, M., Cabrera Cardús, A. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(46), 4-26.
- Gealy, D. R., Moldenhauer, K. A. K. (2012). Use of ¹³C isotope discrimination analysis to quantify distribution of barnyardgrass and rice roots in a four-year. Study of Weed-Suppressive Rice. *Weed Science*, 60(1), 133-142.
- Gealy, D. R., Yan, W. (2012). Weed suppression potential of 'Rondo' and other Indica rice germplasm lines. *Weed Technology*, 26, 517-524
- Geng, G. D., Zhang, S. Q., Cheng, Z. H. (2009). Effects of different allelochemicals on mineral elements absorption of tomato root. *China Vegetables*, 4, 48–51
- Ghimire, B. K., Yu, C. Y., Ghimire, B., Seong, E. S., Chung, I. M. (2019). Allelopathic potential of phenolic compounds in *Secale Cereale* cultivars and its relationship with seeding density. *Applied Sciences*, 9, 3072.
- Gioria, M., Osborne, B. A. (2014). Resource competition in plant invasions: emerging patterns and research needs. *Frontiers in Plant Science*, 5(501)
- Golis, A., Sugano, M., Fujii, Y. (2008). Microarray expression profiling of *Arabidopsis thaliana* L. in response to allelochemicals identified in buckwheat. *Journal of Experimental Botany*, 59(11), 3099-3109
- Golldack, D., Li, C., Mohan, H., Probst, N. (2014). Tolerance to drought and salt stress in plants: Unraveling the signaling networks. *Frontiers in Plant Science*, 5(151).

- Graña, E., Sotelo, T., Diaz-Tielas, C., Araniti, F., Krasuska, U., Bogatek, R., Reigosa, M. J., Sánchez-Moreiras, A. M. (2013). Citral induces auxin and ethylene-mediated malformations and arrests cell division in *Arabidopsis thaliana* roots. *Journal of Chemical Ecology*, 39(2), 271-282.
- Gu, Y., Wang, P., Kong, C. H. (2009). Urease, invertase, dehydrogenase and polyphenoloxidase activities in paddy soil influenced by allelopathic rice variety. *European Journal of Soil Biology*, 45, 436-441
- Haider, G., Cheema, Z. A., Farooq, M., Wahid, A. (2015). Performance and nitrogen use of wheat cultivars in response to application of allelopathic crop residues and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate. *International Journal of Agriculture and Biology*, 17(2), 261-270
- Hallak, A. M. G., Davide, L. C., Souza, I. F. (1999). Effects of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) root exudates on the cell cycle of the bean plant (*Phaseolus vulgaris* L.) root. *Genetics and Molecular Biology*, 22(1), 95-99
- Hinojosa, L., González, J., Barrios-Masias, F. H., Fuentes, F., Murphy, K. M. (2018). Quinoa Abiotic Stress Responses: A Review. *Plants*, 7(106)
- Iannucci, A., Fragasso, M., Platani, C., Papa, R. (2013). Plant growth and phenolic compounds in the rhizosphere soil of wild oat (*Avena fatua* L.). *Frontiers in Plant Science*, 4(509).
- Ihsan, M. Z., Khaliq, A., Mahmood, A., Naeem, M., El-Nakhlawy, F., Alghabari, F. (2015). Field evaluation of allelopathic plant extracts alongside herbicides on weed management indices and weed-crop regression analysis in maize. *Weed Biology and Management*, 15, 78-86
- Inderjit, Nilsen, E. T. (2003). Bioassays and field studies for allelopathy in terrestrial plants: progress and problems. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22(3-4), 221-238
- Jabran, K., Mahajan, G., Sardana, V., Chauhan, B. S. (2015). Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Protection*, 72, 57–65
- Jacobsen, S.E. (2014). New climate-proof cropping systems in dry areas of the Mediterranean region. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200(5), 399-401

- Johnson, D. E., Wopereis, M. C. S., Mbodj, D., Diallo, S., Powers, S., Haefele, S. M. (2004). Timing of weed management and yield losses due to weeds in irrigated rice in the Sahel. *Field Crops Research*, 85, 31-42
- Jung, W. S., Kim, K. H., Ahn, J. K., Hahn, S. J., Chung, I. M. (2004). Allelopathic potential of rice (*Oryza sativa* L.) residues against *Echinochloa crus-galli*. *Crop Protection*, 23, 211-218
- Kato-Noguchi, H., Ota, K., Ino, T. (2008). Release of momilactone A and B from rice plants into the rhizosphere and its bioactivities. *Allelopathy Journal*, 22(2), 321-328
- Khanh, T. D., Chung, I. M., Tawata, S., Xuan, T. D. (2006). Weed suppression by *Passiflora edulis* and its potential allelochemicals. *Weed Research*, 46, 296-303
- Kong, C. H., Hu, F. (2001). Allelopathy and its Application. Pekín, China: Chinese agricultural press.
- Kong, C. H., Wang, P., Gu, Y., Xu, X. H., Wang, M. L. (2008). Fate and Impact on microorganisms of rice allelochemicals in paddy soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(13), 5043-5049
- Korres, N. E., Norsworthy, J. K., Tehranchian, P., Gitsopoulos, T. K., Loka, D. A., Oosterhuis, D. M., Gealy, D. R., Moss, S. R., Burgos, N. R., Miller, M. R., Palhano, M. (2016). Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 12
- Kremer, R. J., Ben-Hammouda, M. (2009). Allelopathic plants. 19. Barley (*Hordeum vulgare* L.). *Allelopathy Journal*, 24(2), 225-242
- Kuntz, C., Sturm, D. J., Peteinatos, G. G., Gerhards, R. (2016). Weed suppression of living mulch in sugar beets. *Gesunde Pflanzen*, 68(3), 145-154
- Leão, P. N., Engene, N., Antunes, A., Gerwick, W. H., Vasconcelos, V. (2012). The chemical ecology of cyanobacteria. *Natural Product Reports*, 29, 372-391
- Li, S. T., Zhou, J. M., Wang, H. Y., Chen, X. Q. (2002). Research surveys of allelopathy in plants. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 10, 72-74
- Li, X., Ding, C., Hua, K., Zhang, T., Zhang, Y., Zhao, L., Yang, Y., Liu, J., Wang, X. (2014). Soil sickness of peanuts is attributable to modifications in soil microbes

- induced by peanut root exudates rather than to direct allelopathy. *Soil Biology and Biochemistry*, 78, 149–159
- Li, Z. H., Wang, Q., Ruan, X., Pan, C. D., Jiang, D. A. (2010). Phenolics and plant allelopathy. *Molecules*, 15(12), 8934-9495
- Liu, X., Tian, F., Tian, Y., Wu, Y., Dong, F., Xu, J., Zheng, Y. (2016). Isolation and identification of potential allelochemicals from aerial parts of *Avena fatua* L. and their allelopathic effect on wheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(18), 3492-3500
- Macias, F. A., Galindo, J. C. G. Molinillo, J. M. G. (2000). Plant biocommunicators: application of allelopathic studies. En T. J. C. Luijendijk (Ed), *2000 years of natural products research: past, present and future*. (pp. 137-161). Leiden, Noruega: Phytoconsult.
- Mahmoodzadeh, H., Mahmoodzadeh, M. (2013). Allelopathic potential of soybean (*Glycine max* L.) on the germination and root growth of weed species. *Life Science Journal*, 10, 63-69
- McKenna, P., Cannon, N., Conway, J., Dooley, J. (2018). The use of red clover (*Trifolium pratense*) in soil fertility-building: A Review. *Field Crops Research*, 221, 38-49
- Mishra, S., Nautiyal, C. S. (2012). Reducing the allelopathic effect of *Parthenium hysterophorus* L. on wheat (*Triticum aestivum* L.) by *Pseudomonas putida*. *Plant Growth Regulation*, 66(2), 155-165
- Mishra, S., Upadhyay, R. S., Nautiyal, C. S. (2013). Unravelling the beneficial role of microbial contributors in reducing the allelopathic effects of weeds. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(13), 5659-5668
- Narwal, S. S. (2000). Weed management in rice: wheat rotation by allelopathy. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 19(3), 249-266
- Nowak, V., Du, J., Charrondière, U. R. (2016). Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chemistry*, 193, 47-54
- Owatworakit, A., Townsend, B., Louveau, T., Jenner, H., Rejzek, M., Hughes, R. K., Saalbach, G., Qi, X., Bakht, S., Ded Roy, A., Mugford, S. T., Goss, R. J. M., Field, R.

- A., Osbourn, A. (2013). Glycosyltransferases from oat (*Avena*) implicated in the acylation of avenacins. *The Journal of Biological Chemistry*, 288(6), 3696-3704
- Pawlowski, A., Kaltchuk-Santos, E., Zini, C. A., Caramao, E. B., Soares, G. L. G. (2012). Essential oils of *Schinus terebinthifolius* and *S. mole* (Anacardiaceae): Mitodepressive and aneugenic inducers in onion and lettuce root meristems. *South African Journal of Botany*, 80, 96-103
- Rabbani, N., Bajwa, R., Javaid, A. (2001). Interference of five problematic weed species with rice growth and yield. *African Journal of Biotechnology*, 10(10), 1854-1862
- Rabotnov, T. A. (1974). On the allelopathy in the phytocenoses. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR Seriya Biologicheskaya*, 6, 811-820
- Rice, E. L. (1974). *Allelopathy*. Nueva York, Estados Unidos: Academic Press
- Rice, E. L. (1984). *Allelopathy* (2º ed.). Londres, Reino Unido: Academic Press
- Rodríguez Ojeda, M. I. (2016). Estudios genéticos y de biología reproductiva en *Orobanche cumana* Wallr. (tesis doctoral). Universidad de Córdoba, Andalucía, España.
- Ruiz, K. B., Biondi, S., Martínez, E. A., Orsini, F., Antognoni, F., Jacobsen, S.E. (2015). Quinoa – a model crop for understanding salt-tolerance mechanisms in halophytes. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 150(2), 357-371
- Sampietro, D. A. (2003). Alelopatía: Concepto, características, metodología de estudio e importancia. *Sitio Argentino de Producción Animal*, 19. Recuperado de: <http://www.produccion-animal.com.ar/>
- Schulz, M., Marocco, A., Tabaglio, V., Macias, F. A., Molinillo, J. M. (2013). Benzoxazinoids in rye allelopathy - from discovery to application in sustainable weed control and organic farming. *Journal of Chemical Ecology*, 39(2), 154-174
- Silva, R. M. G., Brigatti, J. G. F., Santos, V. H. M., Mecina, G. F., Silva, L. P. (2013). Allelopathic effect of the peel of coffee fruit. *Scientia Horticulturae*, 158, 39-44
- Simonetti, A. P. M. M., Ferreira, B. F., Melo de, A. M. C. (2019). Efeitos alelopáticos da semente de trigo mourisco no desenvolvimento inicial do trigo e aveia. *Revista*

Técnico-Científica do CREA-PR, Edição especial Fotovoltaica. Recuperado de:
<http://creaprw16.creaprr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/542>

- Soltys, D., Rudzinska-Langwald, A., Gniazdowska, A., Wisniewska, A., Bogatek, R. (2012). Inhibition of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) root growth by cyanamide is due to altered cell division, phytohormone balance and expansin gene expression. *Planta*, 236(5), 1629-1638
- Souissi, T., Belhadjsalah, H., Mhafdhi, M., Latiri, K. (2000). Non chemical control of *Bromus diandrus* Roth. in wheat in Tunisia. En: Proceedings of the XI International Conference on Weed Biology. Association Française de Protection des Plantes, Dijon, France, pp 417-424
- Spehar, C. R., Santos, R. L. de B. (2002). Quinoa BRS Piabiru: alternativa para diversificar os sistemas de produção de grãos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(6), 889-893
- Sunmonu, T. O., Van Staden, J. (2014). Phytotoxicity evaluation of six fast-growing tree species in South Africa. *South African Journal of Botany*, 90, 101-106.
- Taiz, L. Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology*, (3^o ed.). Massachusetts, Estados Unidos: Sinauer Associates
- Travlos, I., Roussis, I., Roditis, C., Semini, C., Rouvali, L., Stasinopoulou, P., Cheimona, N., Vlassopoulou, C., Bilalis, D. (2018). Allelopathic potential of velvet bean and chia against rigid ryegrass. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 46(1), 173-176
- Wink, M., Latz-Brüning, B. (1995). Allelopathic properties of alkaloids and other natural products: Possible modes of action. En Inderjit, K. M. M. Dakshini, y F. A. Einhellig (Eds.), *Allelopathy: Organisms, Processes, and Applications* (pp. 117-126). Washington, Estados Unidos: American Chemical Society
- Wu, Z., Yang, L., Wang, R., Zhang, Y., Shang, Q., Wang, L., Ren, Q., Xie, Z. (2015). *In vitro* study of the growth, development and pathogenicity responses of *Fusarium oxysporum* to phthalic acid, an autotoxin from *Lanzhou lily*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(8), 1227-1234.

- Xuan, T. D., Shinkichi, T., Khanh, T. D., Min, C. I. (2005). Biological control of weeds and plant pathogens in paddy rice by exploiting plant allelopathy: an overview. *Crop Protection*, 24(3), 197-206
- Yu, J. H., Zhang, Y., Niu, C. X., Li, J. J. (2006). Effects of two kinds of allelochemicals on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Solanum melongena* L. seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 1629-1632
- Zeng, R. S. (2014). Allelopathy - the solution is indirect. *Journal of Chemical Ecology*, 40(6), 515-516
- Zhang, W., Ma, Y., Wang, Z., Ye, X., Shui, J. (2013). Some Soybean Cultivars Have Ability to Induce Germination of Sunflower Broomrape. *PLoS ONE*, 8(3), e59715