

Tecnología

Oligo Prime®

RESULTADOS 2018-2023

Pierre Migner,
ingeniero agrónomo (jubilado), M.Sc., MBA

Agro 100®
cultivando la innovación

edición **agosto 2024**



ÍNDICE

1	**PROBLEMAS**		**3**
2	**NIVEL DE CONOCIMIENTO**		**5**
	2.1.	Estrés abiótico	**5**
	2.2.	El efecto de los herbicidas en la producción de las ROS	**7**
	2.3.	Tecnología Oligo Prime®	**8**
	2.3.1.	El papel de las señales metabólicas	**8**
	2.3.2.	El papel del ácido fúlvico y C-plex®	**9**
	2.3.3.	El papel del quitosano	**9**
3	**HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**		**10**
	3.1.	Hipótesis de investigación	**10**
4	**METODOLOGÍA**		**11**
	4.1.	Sitio	**11**
	4.1.1.	CEROM	**11**
	4.1.2.	Universidad de Guelph	**11**
	4.1.4.	BlackCreek Research	**11**
	4.1.5.	Eastern Crop Doctor	**11**
	4.2.	Protocolos	**12**
	4.2.1.	Ensayo con glifosato (grupo 9) en maíz	**12**
	4.2.2.	Ensayo con glifosato (grupo 9) en soja	**13**
	4.2.3.	Ensayo de herbicidas + bioestimulantes en maíz	**14**
	4.2.4.	Ensayo de herbicidas + bioestimulantes en soja	**15**
5	**RESULTADOS**		**16**
	5.1.	Ensayo con glifosato (grupo 9) en maíz	**16**
	5.2.	Ensayo con glifosato (grupo 9) en soja	**17**
	5.3.	Ensayo de herbicidas + bioestimulantes en maíz	**18**
	5.4.	Ensayo de herbicidas + bioestimulantes en soja	**19**
6	**CONCLUSIÓN**		**20**
7	**BIBLIOGRAFÍA**		**21**



PROBLEMAS 1

El aumento de la población mundial y los límites al crecimiento de la productividad agrícola preocupan a los expertos desde hace muchos años. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO por sus siglas en inglés), en sus Perspectivas Agrícolas 2021-2030, prevén un aumento del 40% de la demanda media de alimentos per cápita para 2030. Este aumento de la disponibilidad media de alimentos deberá lograrse principalmente aumentando el rendimiento agrícola (87%), incrementando la intensidad de los cultivos (7%) y ampliando las tierras cultivables (6%)[1*].

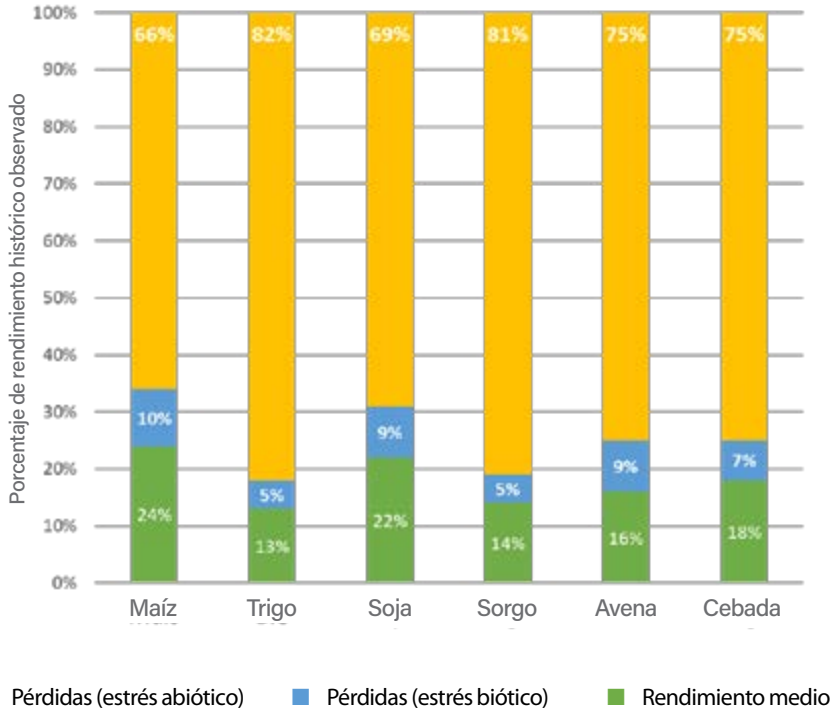
La sostenibilidad medioambiental de las prácticas agrícolas es un segundo reto al que se enfrenta la agricultura. El calentamiento global exige una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI); los gases de efecto invernadero emitidos por la industria agrícola ya representan un 7% neto de los GEI emitidos en Canadá[2]. Además, la aceptación social del uso de organismos modificados genéticamente, productos fitosanitarios y fertilizantes sintéticos es cada vez menor. Sabiendo que la conversión a la agricultura "ecológica" no logrará los objetivos de aumentar los rendimientos[3], los agricultores necesitan encontrar soluciones que aumenten la productividad minimizando el impacto medioambiental.

El aumento de la productividad de los cultivos podría provenir de la reducción de las pérdidas ligadas a los estreses bióticos y abióticos. Un análisis de los rendimientos observados en varias regiones del mundo muestra que los rendimientos del arroz, el maíz y el trigo son respectivamente del 59%, el 35% y el 65% del rendimiento máximo teórico. Los factores que contribuyen a estas diferencias de rendimiento son numerosos e incluyen la gestión de los nutrientes, el estrés hídrico, las inundaciones, los problemas del suelo (salinidad, toxicidad de metales pesados y productos químicos, pH, etc.), las enfermedades, los insectos, las malas hierbas, etc. [4]

Otra evaluación de las repercusiones del estrés biótico y abiótico realizada por Buchanan et al. (2000) indica que el rendimiento medio de los cultivos solo alcanza el 18% del máximo teórico, y que las pérdidas medias de rendimiento asociadas al estrés biótico oscilan entre el 5% y el 10%, mientras que las pérdidas asociadas al estrés abiótico (medio-ambiental) oscilan entre el 66% y el 82%. Los estreses abióticos más importantes siguen siendo el estrés hídrico (déficit de agua) y la salinidad del suelo[5].

* Estas cifras corresponden a la lista de obras numeradas que aparecen en la bibliografía.

Figura 1. Pérdidas de rendimiento asociadas al estrés biótico y abiótico[5]



Los agricultores no pueden controlar la frecuencia y el alcance del estrés ambiental. La introducción relativamente reciente de los bioestimulantes en el abanico de herramientas a disposición de los agricultores significa que podría reducirse el impacto negativo del estrés abiótico.

Un bioestimulante se define como:

«[…] sustancia o microorganismo utilizado en las plantas para mejorar la eficacia de su utilización de nutrientes, su resistencia a las tensiones abióticas y, por tanto, el rendimiento y la calidad de la cosecha, sin perjuicio del contenido de nutrientes. El término bioestimulantes también se refiere a productos que contienen mezclas de estas sustancias y/o microorganismos.»[6,7]

El trabajo realizado por Agro-100 Ltd se centró en el uso de hormonas vegetales para reducir el impacto del estrés abiótico causado por el uso de herbicidas en el rendimiento del maíz, la soja y el trigo. La adición de señales metabólicas a una mezcla de herbicidas y agua redujo las pérdidas de rendimiento asociadas al estrés por herbicidas. Estos resultados fueron confirmados por dos estudiantes de máster que demostraron que el uso de determinadas señales metabólicas permitía a las plantas corregir la tasa de fotosíntesis durante el periodo de estrés asociado a los herbicidas[8,9].

El objetivo es mejorar la capacidad de los cultivos para tolerar el estrés abiótico mediante el uso de bioestimulantes que reduzcan el impacto del estrés abiótico en el rendimiento de los cultivos.



NIVEL DE CONOCIMIENTO 2

2.1. Estrés abiótico

Las condiciones ambientales adversas provocadas por el cambio climático serán cada vez más frecuentes. Las altas temperaturas, el déficit hídrico y la salinidad son sólo algunas de las condiciones que tendrán un mayor impacto en el crecimiento de las plantas[10].

El estrés abiótico se define de varias maneras. Se define como "un factor ambiental que puede tener efectos nocivos en las plantas. Estos factores ambientales pueden incluir sequía, frío o calor extremos, vientos fuertes, ozono, radiación solar, metales pesados, salinidad del suelo, productos químicos, daños mecánicos, etc." [11]. La definición propuesta por Blumwald simplifica la noción de estrés abiótico a "cualquier condición ambiental que impida a las plantas alcanzar todo su potencial genético"[12]. Ben Ari y Lavi añaden a la definición la noción de "entorno específico". Como las plantas son sésiles, no pueden simplemente cambiar su entorno para evitar el estrés abiótico. Por ello, han desarrollado complejos sistemas de procesos fisiológicos y de desarrollo para garantizar su crecimiento y reproducción[13]. Así, un déficit hídrico o la salinidad del suelo provocarán inicialmente una reducción del potencial hídrico y la deshidratación celular; en segundo lugar, el cierre de los estomas y la reducción de la concentración de dióxido de carbono tendrán un impacto negativo en la fotosíntesis. Los electrones que ya no intervienen en la fijación del CO_2 darán lugar a la producción de especies reactivas del oxígeno[12] (consulte la Figura 2).

Una consecuencia directa o indirecta del estrés abiótico es la producción de especies reactivas del oxígeno (ROS)[14]. Estas moléculas contienen al menos un electrón libre en sus órbitas. Las principales formas de las ROS son el radical superóxido ($O_2^{\bullet -}$), el radical perhidroxilo ($HO_2^{\bullet}$), el radical hidroxilo ($^{\bullet}OH$), el radical peroxilo ($RO_2^{\bullet}$) y el radical alcoxilo ($RO^{\bullet}$), así como formas no radicales como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2)[15].

El radical superóxido ($O_2^{\bullet -}$) suele ser el primero en formarse en los cloroplastos. Aunque su semivida es corta (3,1-3,9 µs) y su distancia de difusión pequeña (190 nm), puede difundirse fuera del cloroplasto y alcanzar las membranas celulares para causar daños[16]. Sin embargo, es su papel como precursor de la formación del radical hidroxilo ($^{\bullet}OH$) y del oxígeno singlete ($^1O_2$), mucho más reactivos y tóxicos, el que tendrá mayor impacto en el daño celular, y más concretamente en la peroxidación de los lípidos de la membrana celular[17]. A pesar de una vida media corta de 3 µs y

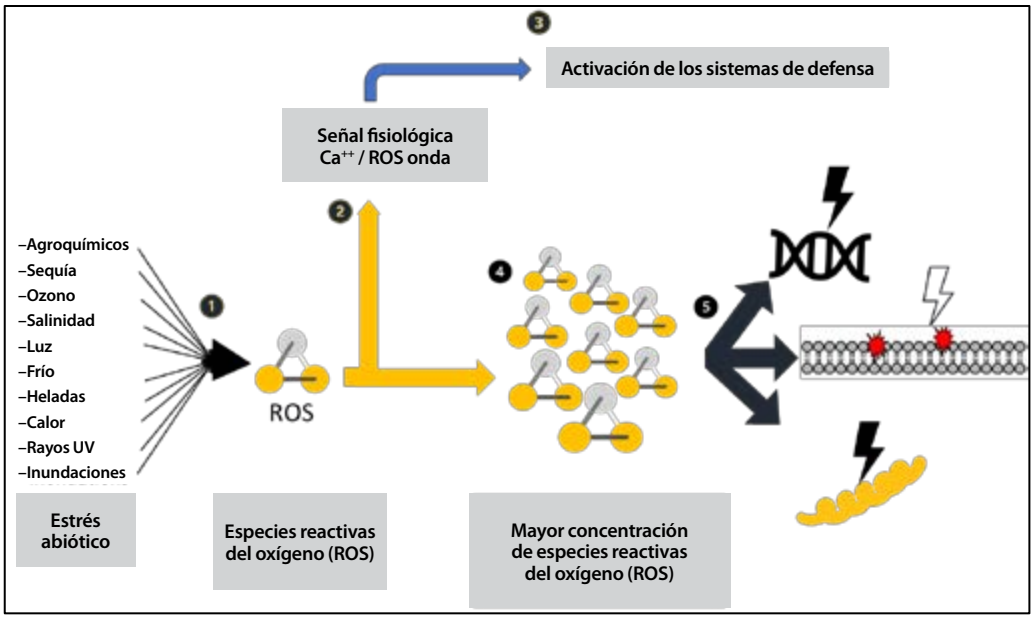


Figura 2. Secuencia de acontecimientos tras la aparición del estrés abiótico.

❶ El estrés abiótico provoca la producción de especies reactivas del oxígeno. ❷ Las ROS son principalmente señales que, junto con el Ca^{++}, se propagan por la planta para ❸ activar los mecanismos de defensa. ❹ La concentración de ROS aumenta y los mecanismos de defensa de la planta son incapaces de mantener el equilibrio en las células. ❺ Las ROS atacan las membranas celulares, el ADN y las proteínas, causando daños importantes a las plantas.

una pequeña distancia de difusión de 100 nm, el oxígeno singlete ($^1O_2$) causará daños en proteínas, pigmentos, ácidos nucleicos y lípidos[18].

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es una molécula moderadamente activa obtenida por reducción y protonación del radical superóxido ($O_2^{\bullet-}$). Esta molécula también puede ser producida directamente por el proceso de fotorrespiración en condiciones de estrés hídrico[19]. El peróxido de hidrógeno tiene una vida media relativamente larga (1 ms) y puede atravesar las membranas celulares. A bajas concentraciones, el peróxido de hidrógeno actúa como una señal que controla varios procesos fisiológicos (senescencia, fotorrespiración, fotosíntesis, movimiento estomático)[14]. Sin embargo, a concentraciones más elevadas, el peróxido de hidrógeno oxida la cisteína y la metionina, inactiva la enzima superóxido dismutasa (SOD) y reduce la actividad de varias enzimas en un 50%[17]. Por lo tanto, las especies reactivas de oxígeno son capaces de reaccionar rápidamente y oxidar diversos componentes celulares, como las proteínas, el ADN, el ARN y los lípidos[14,20].

Las plantas pueden reducir el impacto de las especies reactivas del oxígeno mediante sistemas de defensa naturales, que se dividen en dos categorías. Antioxidantes enzimáticos, como la Superóxido dismutasa (SOD), Catalasa CAT, Ascorbato Peroxidasa (APX), POX, Monodehidroascorbato Reductasa (MDHAR), Dehidroascorbato Reductasa (DHAR), Glutatión S-Transferasa (GST), Glutatión Peroxidasa (GPX), AOX, Peroxiredoxina (PRX) y Tiorredoxina (TRX) reducen la concentración de ROS transformándolas en H_2O_2 y, en última instancia, en H_2O[21].

Los antioxidantes no enzimáticos contribuyen a reducir la concentración de las ROS y constituyen la segunda línea de defensa. Esta categoría de compuestos incluye los carotenoides, el tocoferol, el ácido ascórbico, la melatonina, ciertos compuestos fenólicos y el glutatión[22]. El ácido ascórbico y el tocoferol recuperan los iones OH^- y $^1O_2$, protegiendo al mismo tiempo los cloroplastos[23]. El glutatión es un tripéptido que actúa como reductor y puede inactivar las ROS. Los compuestos fenólicos, como los flavonoides, los taninos y la lignina, actúan recuperando e inactivando las ROS en las células[22].

La cantidad de ROS producida por las células dependerá de la magnitud y la duración del estrés. Si el estrés se prolonga, la acumulación de las ROS superará la capacidad de los sistemas de defensa naturales de la planta[20]. Los sistemas de defensa celular deben mantener un equilibrio con las ROS.

Las especies reactivas de oxígeno actúan como una señal metabólica que comunica rápidamente la percepción de un evento estresante (lesión mecánica o química, enfermedad, etc.) y la acumulación de las ROS en toda la planta para permitir la aclimatación y la puesta en marcha de mecanismos de defensa[24].

Esta señal es transmitida por la onda Ca^{++}/ERO. Este proceso, acelerado por la proteína RBOHD, se propaga automáticamente de una célula a otra; cuando se desencadena en una célula, provoca la acumulación de ROS en las células vecinas y, finalmente, en toda la planta. Esta señal desencadena mecanismos de defensa en la planta que desvían recursos normalmente asignados al apoyo del crecimiento hacia un metabolismo de estrés y defensa[25]. También coordina la respuesta de los estomas al estrés hídrico o térmico[26]. La señal transmitida por las ROS no es específica de un estrés concreto, sino que va acompañada de otras señales que le confieren esta especificidad. Estos otros mecanismos o moléculas, como las señales eléctricas, las hormonas y las ondas de calcio, intervienen en la transmisión de señales de las raíces a las hojas y viceversa[27,28].

El aumento de la concentración de ROS en las células llevará a los orgánulos celulares a activar cascadas de señalización que permitirán a la planta resistir mejor el estrés abiótico. Las ROS pueden interactuar con intermediarios como el Ca^{++}, la MAPK, el ácido jasmónico, el ácido abscísico y el etileno para desencadenar otras vías de señalización que provocan cambios en la expresión génica[22]. El aumento de la concentración de Ca celular activa ciertas proteínas quinasas que regulan la expresión de determinados genes fosforilando o desfosforilando factores de transcripción[12]. Las hormonas vegetales como el ácido abscísico, la citoquinina, el ácido giberélico, la auxina, el ácido salicílico, el ácido jasmónico y los brasinoesteroides también desempeñan un papel importante en la aclimatación de las plantas al estrés abiótico[29]. Estas hormonas vegetales desempeñarán un papel importante en la gestión de las interferencias entre los mecanismos de defensa[12,30].



2.2. El efecto de los herbicidas en la producción de las ROS

Los herbicidas son pequeñas moléculas que actúan inhibiendo dianas moleculares específicas en las vías metabólicas primarias de las plantas, con consecuencias catastróficas y letales. El estrés inducido por herbicidas genera especies reactivas de oxígeno (ROS), pero se sabe poco sobre la relación entre cada modo de acción de los herbicidas y su respectiva capacidad para inducir la formación de ROS. De hecho, algunos herbicidas (grupos 5, 6, 10, 12, 13, 14, 18, 19, 22, 24 y 27) causan aumentos drásticos en las concentraciones de las ROS como parte de su modo de acción primario, mientras que otros herbicidas (grupos 1, 2, 9, 29 y 4) pueden generar ROS como efecto secundario del estrés que han impuesto a las plantas. (Traxler et al., 2023) (Caverzan et al., 2019).

La selectividad de los herbicidas se define como la relación entre la supervivencia de las malas hierbas y los daños a los cultivos. Es el mecanismo por el cual ciertas especies de plantas son preferentemente controladas o eliminadas mientras que otras permanecen inalteradas o menos afectadas por el herbicida. La selectividad de los herbicidas puede explicarse por una combinación de los siguientes mecanismos[31].

- Diferencias entre plantas en cuanto a interceptación y absorción de herbicidas.
- Metabolismo diferente entre cultivos y malas hierbas; las malas hierbas son menos capaces que los cultivos de metabolizar e inactivar el herbicida selectivo.
- Físico: los herbicidas pueden aplicarse en una zona diferente o en un momento distinto, minimizando el impacto en el cultivo.
- Uso de antídotos o protectores que hacen que el herbicida sea menos tóxico para el cultivo.

El metabolismo diferencial de los herbicidas es uno de los factores más importantes que explican su selectividad. Los cultivos tienen la capacidad de metabolizar los herbicidas más rápidamente, lo que les permite resistir la aplicación de herbicidas[32].

2.3. Tecnología Oligo Prime®

Los cultivos tienen la capacidad de defenderse de los daños causados por las ROS creadas durante situaciones de estrés abiótico o por las ROS generadas por los herbicidas. Los mecanismos de defensa contra las ROS incluyen componentes enzimáticos y no enzimáticos que sirven para equilibrar la producción y detoxificación de las ROS.

La **tecnología Oligo Prime®** está diseñada para aumentar la eficacia de los mecanismos de defensa naturales presentes en todas las plantas. Se basa en cuatro componentes:

1. **señales metabólicas**;
2. **tecnología C-plex®**;
3. **ácido fúlvico**;
4. **quitosano**.

La sinergia entre estas cuatro tecnologías significa que los productos que contienen la tecnología Oligo Prime® rinden más y ofrecen una rentabilidad económica muy superior a 3:1.

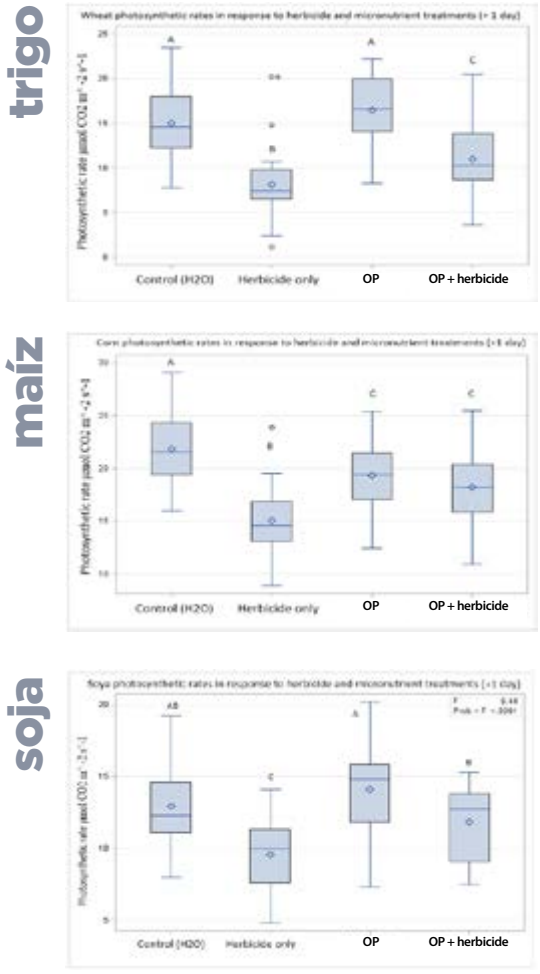
2.3.1. El papel de las señales metabólicas

Hasta hace poco, los estudios sobre fitohormonas se centraban en el papel del ácido jasmónico (JA), el ácido salicílico (SA), las giberelinas (GA) y el ácido abscísico (ABA). Ahora está claro que la señalización inducida por fitohormonas se produce a través de la regulación del genoma o el aumento de la producción de metabolitos secundarios.

Los metabolitos secundarios se sintetizan en diferentes compartimentos celulares e incluyen compuestos fenólicos, terpenoides y alcaloides cuyas principales funciones incluyen la protección contra el estrés biótico y abiótico.

La adición de metabolitos secundarios a la tecnología Oligo Prime® reduce el impacto negativo del estrés por herbicidas en la fotosíntesis. La tasa de fotosíntesis descendió un 50% cuando se utilizó el herbicida (trigo: bromoxinil/MCPA, maíz: glifosato, soja: glifosato) solo, la tasa de fotosíntesis descendió un 44% para el trigo, un 30% para el maíz y un 20% para la soja cuando se midió un día después de la aplicación. La adición de metabolitos secundarios a los herbicidas reduce el descenso de la tasa de fotosíntesis al 22% en el caso del trigo, al 16% en el del maíz y al 10% en el de la soja[8] (consulte la figura 3).

Figura 3. Efecto de los metabolitos secundarios en la tasa de fotosíntesis



Los metabolitos secundarios incluidos en la tecnología Oligo Prime® también tienen un impacto en el genoma de la planta y activan la producción de 71 proteínas y enzimas defensivas que desempeñan un papel en la reducción del impacto de las ROS[33].

2.3.2. El papel del ácido fúlvico y C-plex®

Las sustancias húmicas se dividen en distintas categorías: ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas. Históricamente, se consideraba que los ácidos húmicos eran moléculas más grandes, con pesos moleculares de hasta cien mil daltones, mientras que los ácidos fúlvicos suelen tener sólo unos pocos miles de daltones. Como ya se ha mencionado, se considera que el ácido fúlvico es la fracción orgánica del suelo que es soluble tanto en álcali como en ácido. Los ácidos fúlvicos tienen una mayor acidez total, un mayor número de grupos carboxilo y mayores capacidades de adsorción e intercambio catiónico que el ácido húmico. Los ácidos fúlvicos son responsables de la quelación y movilización de iones metálicos, incluidos el Fe y el Al. Debido a su pequeño tamaño molecular, los ácidos fúlvicos pueden atravesar los microporos de los sistemas de membranas biológicas o artificiales, a diferencia de los ácidos húmicos[6].

La capacidad del ácido fúlvico para mejorar la absorción de nutrientes se ha descrito en diversos sistemas. Los primeros trabajos registraron un aumento de la absorción de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe y Zn en plantas de pepino cultivadas en solución Hoagland. Se ha señalado que los ácidos fúlvicos mejoran la absorción de fosfato ^{32}P en el trigo y varios estudios se han centrado en la interacción de los ácidos fúlvicos con el Fe. En un sistema de suelo modelo sin plantas, se observó que el ácido fúlvico formaba un complejo Fe^{3+} en el suelo en forma soluble que podía ser absorbido por las plantas[6].

La capacidad de los materiales húmicos para formar cationes complejos se ha demostrado con el ácido fúlvico. C-plex® es una molécula derivada del ácido fúlvico de menor tamaño y mayor capacidad de intercambio catiónico. Este menor tamaño se consigue mediante un proceso digestivo exclusivo que produce moléculas de unos cientos de daltones. Este pequeño tamaño hace que puedan ser absorbidas rápida y fácilmente por la planta y que tengan una capacidad complejante muy elevada.

2.3.3. El papel del quitosano

El quitosano es un biopolímero natural modificado a partir de la quitina que actúa como bioestimulante y elicitor en la agricultura. No es tóxico, es biodegradable y biocompatible, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones. Mejora la respuesta fisiológica y reduce los efectos nocivos del estrés abiótico. El tratamiento con quitosano estimula la tasa de fotosíntesis y el cierre estomático, aumenta la concentración de enzimas antioxidantes e induce la producción de ácidos orgánicos, azúcares, aminoácidos y otros metabolitos que son necesarios para el control estomático, la producción de señales metabólicas de estrés y la gestión de la energía bajo estrés[34].



El quitosano activa varios genes, proteínas y metabolitos secundarios en las plantas. El quitosano provoca la producción de señales y aumenta la concentración de moléculas secundarias como el peróxido de hidrógeno y el óxido nítrico. Bajo estrés biótico, el quitosano puede estimular las fitoalexinas, las proteínas relacionadas con la patogénesis y los inhibidores de la proteinasa. El tratamiento preventivo con quitosano antes de la exposición al estrés abiótico aumenta el crecimiento de las plantas, la producción de enzimas antioxidantes y de metabolitos secundarios que promueven la producción de enzimas defensivas y de ácido abscísico (ABA). Sin embargo, las respuestas de las plantas dependen del tipo de quitosano, de las concentraciones y de las fases de desarrollo del cultivo[35].

La adición de quitosano a la tecnología Oligo Prime® aumenta la capacidad de las células para producir las enzimas defensivas necesarias para inactivar las ROS causadas por los herbicidas.



HIPÓTESIS Y OBJETIVOS 3

3.1. Hipótesis de investigación

El uso de herbicidas provoca un aumento de la producción de las ROS. La tecnología Oligo Prime® promueve un aumento de la concentración de enzimas específicas para la inactivación de las ROS y una mejor movilización de los oligoelementos necesarios para el crecimiento de las plantas. Las hipótesis específicas puestas a prueba en esta propuesta de investigación son:

- el uso de Oligo Prime® en una mezcla con el herbicida glifosato (grupo 9) aumentará el rendimiento de los cultivos;
- el uso de Oligo Prime® en una mezcla con herbicidas que generan grandes cantidades de ROS aumentará el rendimiento de los cultivos.



Figura 4. Localización de los centros de investigación

METODOLOGÍA 4

4.1. Sitios

Los ensayos se llevaron a cabo en granjas de investigación de Quebec y Ontario entre 2018 y 2023.

4.1.1. CEROM

La granja de investigación CEROM está situada en 740, chemin Trudeau, Saint-Mathieu-de-Beloeil (Quebec) J3G 0E2. Para el periodo comprendido entre el 1 de abril y el 31 de octubre, la acumulación media (entre 1979 y 2008) de grados-día (base 0) se sitúa entre 3002 y 3189. El número de unidades calorícas de maíz se sitúa entre 2900 y 3100 (8 años de cada 10).

4.1.2. Universidad de Guelph

La Granja de Investigación de la Universidad de Guelph está situada en 12088 Baker Road, Winchester, Ontario, K0C 2K0.

4.1.3. Universidad Laval

La granja de investigación de la Universidad Laval se encuentra en 521, QC-138, Saint-Augustin-de-Desmaures (Quebec) G3A 1W7. Para el periodo comprendido entre el 1 de abril y el 31 de octubre, la acumulación media (entre 1979 y 2008) de días-grado (base 0) se sitúa entre 2.627 y 2.814. El número de unidades calorícas de maíz se sitúa entre 2.300 y 2.500 (8 años de cada 10).

4.1.4. BlackCreek Research

La granja BlackCreek Research está situada en 886613 Oxford Rd 8, Bright, Ontario N0J 1B0.

4.1.5. Eastern Crop Doctor

La granja de investigación de Eastern Crop Doctor se encuentra en 11343 Vancamp Road, Winchester, Ontario, K0C 2K0.



4.2. Protocolos

Los ensayos se realizaron en campos de maíz y soja. Los cultivares e híbridos utilizados se eligieron en función de la zona; en todos los casos, se trataba de cultivares e híbridos resistentes al glifosato. Las dosis de siembra se situaron entre 75.000 y 84.000 plantas/hectárea para el maíz y entre 250.000 y 290.000 plantas/hectárea para la soja. La siembra se realizó con sembradoras de precisión a profundidades de 3,5 a 5 cm.

4.2.1. Ensayo con glifosato (grupo 9) en maíz

CropBooster OP, un bioestimulante foliar (15% N - 3% P_2O_5 - 6% K_2O con 2% S, 0,02% B, 0,05% Mn, 0,05% Mo, 0,05% Zn, 0,5% EDTA) enriquecido con tecnología Oligo Prime® (0, 34% C-plex®, 0,12% ácido fúlvico, 0,25% señales metabólicas, 0,1% quitosano) se añadió a una mezcla herbicida que contenía glifosato (*RoundUp Weathermax*, 900 g a. i./hectárea). Los herbicidas del grupo 9 inhiben la producción de la enzima EPSPS y la formación de aminoácidos esenciales. Contribuyen a la producción de grandes cantidades de las ROS.

Los tratamientos se indican en el cuadro 1.

El tratamiento de control fue glifosato (*RoundUp Weathermax*, 900 g i.a./hectárea) aplicado solo. La pulverización resultante se aplicó a razón de 200 litros/hectárea. Los tratamientos se realizaron entre los estadios V3 y V8. Los tratamientos se repitieron 4 o 6 veces y se organizaron en bloques completamente aleatorizados. Los análisis estadísticos se realizaron con R 4.2.2[36]. Se realizó un análisis de la varianza y una comparación de las medias obtenidas, utilizando la función *TukeyHSD* del programa estadístico.

Cuadro 1. Lista de tratamientos del ensayo de **maíz** del Grupo 9

N° TRT	Tratamiento	Clasificación HRAC (grupo)	Tasa de aplicación	
1	Weedy Control	—	—	—
2	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	aditivo	0,2	% v/v
3	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	aditivo	0,2	% v/v
	CropBooster OP	bioestimulante	2	l/ha



4.2.2. Ensayo con glifosato (grupo 9) en soja

CropBooster OP, un bioestimulante foliar (15% N - 3% P_2O_5 - 6% K_2O con 2% S, 0,02% B, 0,05% Mn, 0,05% Mo, 0,05% Zn, 0,5% EDTA) enriquecido con tecnología Oligo Prime® (0, 34% C-plex®, 0,12% ácido fúlvico, 0,25% señales metabólicas, 0,1% quitosano) se añadió a un herbicida que contenía glifosato (*RoundUp Weathermax*, 900 g a. i./hectárea). El glifosato genera grandes cantidades de las ROS.

Los tratamientos se indican en el cuadro 2.

El tratamiento de control fue glifosato (*RoundUp Weathermax*, 900 g i.a./hectárea) aplicado solo. La mezcla de pulverización resultante se aplicó a razón de 200 litros/hectárea. Los tratamientos se aplicaron entre los estadios V3 y V4 de la soja. Los tratamientos se repitieron 4 o 6 veces y se dispusieron en bloques completamente aleatorizados. Los análisis estadísticos se realizaron con R 4.2.2[36]. Se realizó un análisis de la varianza y una comparación de las medias obtenidas, utilizando la función *TukeyHSD* del programa estadístico.

Cuadro 2. Lista de tratamientos del ensayo de **soja** del Grupo 9

soja

N° TRT	Tratamiento	Clasificación HRAC (grupo)	Tasa de aplicación	
1	Weedy Control	—	—	—
2	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	aditivo	0,2	% v/v
3	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	aditivo	0,2	% v/v
	CropBooster OP	bioestimulante	2	l/ha

4.2.3. Ensayo de herbicidas + bioestimulantes en maíz

CropBooster OP, un bioestimulante foliar (15% N - 3% P_2O_5 - 6% K_2O con 2% S, 0,02% B, 0,05% Mn, 0,05% Mo, 0,05% Zn, 0,5% EDTA) enriquecido con tecnología Oligo Prime® (0, 34% C-plex®, 0,12% ácido fúlvico, 0,25% señales metabólicas, 0,1% quitosano) se añadió a herbicidas identificados como pertenecientes a los grupos 5, 15 y 27.

Los herbicidas del grupo 5 inhiben la proteína D1 del sistema fotosintético II y favorecen la producción de grandes cantidades de las ROS. Los herbicidas del grupo 14 inhiben una enzima (PPO) implicada en la fotosíntesis. Los herbicidas del grupo 15 inhiben la formación de ácidos grasos; estos herbicidas generan pocas ROS. Los herbicidas del grupo 27 inhiben la producción de la enzima 4-hidroxifenilpiruvato dioxigenasa (4-HPPD). Esta enzima es necesaria para la producción de carotenoides por las plantas. Los herbicidas de estos grupos generan grandes cantidades de las ROS[37].

El cuadro 3 muestra los tratamientos utilizados en estos ensayos.

Los tratamientos de control fueron herbicidas aplicados solos (tratamientos 2, 4 y 6). La mezcla de pulverización resultante se aplicó a razón de 200 litros/hectárea. Los tratamientos se realizaron entre los estadios V3 y V8 del maíz. Los tratamientos se repitieron 4 o 6 veces y se dispusieron en bloques completamente aleatorizados. Los análisis estadísticos se realizaron con R 4.2.2[36]. Se realizó un análisis de la varianza y una comparación de las medias obtenidas, utilizando la función *TukeyHSD* del programa estadístico.

Cuadro 3. Lista de tratamientos para el ensayo herbicida + bioestimulante en **maíz**

maíz

Nº TRT	Tratamiento	Clasificación HRAC (grupo)	Tasa de aplicación	
1	Weedy Control	—	—	—
2	Glifosato/s-metolachlor/mesotrione	9/15/27	4,2	l/ha
	Atrazine	5	0,6	l/ha
	Agral 90	aditivo	0,2	% v/v
3	Glifosato/s-metolachlor/mesotrione	9/15/27	4,2	l/ha
	Atrazine	5	0,6	l/ha
	Agral 90	aditivo	0,2	% v/v
	CropBooster OP	bioestimulante	2	l/ha
4	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Tembotrione (Laudis)	27	65	g a.i./ha
	Atrazine	5	576	g a.i./ha
	Hasten	aditivo	1,75	l/ha
5	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Tembotrione (Laudis)	27	65	g a.i./ha
	Atrazine	5	576	g a.i./ha
	Hasten	aditivo	1,75	l/ha
	CropBooster OP	bioestimulante	2	l/ha
6	S-metolachlor/mesotrione/bicyclopyrone	15/27/27	3,952	l/ha
	Glifosato	9	900	g a.i./ha
7	S-metolachlor/mesotrione/bicyclopyrone	15/27/27	3,952	l/ha
	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	CropBooster OP	bioestimulante	2	l/ha
8	S-metolachlor/atrazine	15/5	3,5	l/ha
	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Saflufenacil	14	75	g a.i./ha
9	S-metolachlor/atrazine	15/5	3,5	l/ha
	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Saflufenacil	14	75	g a.i./ha
	CropBooster OP	bioestimulante	2	l/ha

4.2.4. Ensayo de herbicidas + bioestimulantes en soja

CropBooster OP, un bioestimulante foliar (15% N - 3% P_2O_5 - 6% K_2O con 2% S, 0,02% B, 0,05% Mn, 0,05% Mo, 0,05% Zn, 0,5% EDTA) enriquecido con tecnología Oligo Prime® (0, 34% C-plex®, 0,12% de ácido fúlvico, 0,25% de señales metabólicas, 0,1% de quitosano) se añadió a herbicidas identificados utilizados habitualmente en la producción de soja. El glifosato es un herbicida del grupo 9. El clorimurón-etilo es un herbicida del grupo 2; este grupo de herbicidas inhibe la producción de enzimas ALS, deteniendo la producción de aminoácidos. Los herbicidas del grupo 4 regulan ciertos genes responsables de la producción de auxina. Los herbicidas del grupo 14 inhiben una enzima (PPO) implicada en la fotosíntesis. Los herbicidas de los grupos 2, 4, 9 y 14 generan grandes cantidades de las ROS.

El cuadro 4 muestra los tratamientos realizados.

Los tratamientos de control fueron herbicidas aplicados solos (tratamientos 2, 4 y 6). La mezcla de pulverización resultante se aplicó a razón de 200 litros/hectárea. Los tratamientos se aplicaron entre los estadios V3 y V4 de la soja. Los tratamientos se repitieron 4 o 6 veces y se dispusieron en bloques completamente aleatorizados. Los análisis estadísticos se realizaron con R 4.2.2[36]. Se realizó un análisis de la varianza y una comparación de las medias obtenidas, utilizando la función *TukeyHSD* del programa estadístico.

Cuadro 4. Lista de tratamientos para el ensayo herbicida + bioestimulante en **soja**

soja

Nº TRT	Tratamiento	Clasificación HRAC (grupo)	Tasa de aplicación	
1	Weedy Control	—	—	—
2	Chlorimuron-ethyl	2	9	g a.i./ha
	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	aditivo	0,2	% v/v
3	Chlorimuron-ethyl	2	9	g a.i./ha
	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Agral 90	aditivo	0,2	% v/v
	CropBooster OP	bioestimulante	2	l/ha
4	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	2,4-D choline	4	817	g a.i./ha
	Agral 90	aditivo	0,2	% v/v
5	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	2,4-D choline	4	817	g a.i./ha
	Agral 90	aditivo	0,2	% v/v
	CropBooster OP	bioestimulante	2	l/ha
6	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Fomesafen	14	240	g a.i./ha
	Turbocharge	aditivo	0,25	% v/v
7	Glifosato	9	900	g a.i./ha
	Fomesafen	14	240	g a.i./ha
	Turbocharge	aditivo	0,25	% v/v
	CropBooster OP	bioestimulante	2	l/ha

5.1. Ensayo con glifosato (grupo 9) en maíz

El objetivo de este ensayo era verificar el efecto de la tecnología Oligo Prime® en el rendimiento del maíz cuando se utiliza en mezcla con glifosato. El rendimiento obtenido cuando se aplicó glifosato con CropBooster OP fue significativamente mayor que cuando se aplicó glifosato solo. La diferencia fue de 752 kg/ha (12 bu/acre).

El impacto positivo de la tecnología Oligo Prime® se ha confirmado en todos los centros y en todos los años.

Maíz

	2018 (kg/ha)	**2019** (kg/ha)	**2021** (kg/ha)	**2022** (kg/ha)	**2023** (kg/ha)	**Media** 2018-2023 (kg/ha)	
Glifosato solo	**12 247**	**6091**	**11 359**	**17 869**	**15 723**	**12 890**	
Glifosato con CropBooster OP	**13 585**	**6975**	**11 404**	**18 437**	**16 069**	**13 641**	
Efecto de la tecnología CropBooster OP	**1338**	**884**	**46**	**568**	**346**	**752**	***

Maíz

	2018 (kg/ha)	**2019** (kg/ha)	**2021** (kg/ha)	**2022** (kg/ha)	**2023** (kg/ha)	**Media** 2018-2023 (kg/ha)
Glifosato con CropBooster OP	**13 585**	**6975**	**11 404**	**18 437**	**16 069**	**13 641**
Beloeil	11 974	6975	11 404	—	—	10 118
Bright	—	—	—	18 437	14 698	16 567
Winchester ECD	14 659	—	—	—	—	14 659
Winchester UOG	—	—	—	—	17 898	17 898
Glifosato solo	**12 247**	**6091**	**11 359**	**17 869**	**15 723**	**12 890**
Beloeil	11 740	6091	11 359	—	—	9730
Bright	—	—	—	17 869	14 497	16 183
Winchester ECD	12 584	—	—	—	—	12 584
Winchester UOG	—	—	—	—	17 358	17 358

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Traitement	1	8189803.066	8189803.066	7.450628475	0.0091	**
Annee_Site	6	727832191.1	121305365.2	110.3568915	7.37699E-25	***
Traitement x Annee_Site	6	7557709.135	1259618.189	1.145930747	0.3523	ns
Residuals	44	48365226.65	1099209.697	NA	NA	

5.2. Ensayo con glifosato (grupo 9) en soja

El objetivo de este ensayo era verificar el efecto de la tecnología Oligo Prime® en el rendimiento de la soja cuando se utiliza en mezcla con glifosato. El rendimiento obtenido cuando se aplicó glifosato con CropBooster OP fue mayor que cuando se aplicó glifosato solo. La diferencia fue de 107 kg/ha (1,6 bu/acre). Esta diferencia no fue significativa. Las dificultades encontradas por el cultivo de soja en 2022 y 2023 explican estos resultados.

Soja

	2018 (kg/ha)	2019 (kg/ha)	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Media 2018-2023 (kg/ha)	
Glifosato sin CropBooster OP	**3530**	**3883**	**6603**	**3510**	**4642**	**4434**	
Glifosato con CropBooster OP	**3665**	**4038**	**6786**	**3566**	**4653**	**4541**	
Efecto de la tecnología CropBooster OP	**135**	**155**	**183**	**55**	**11**	**107**	**ns**

Soja

	2018 (kg/ha)	2019 (kg/ha)	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Media 2018-2023 (kg/ha)
Glifosato con CropBooster OP	**3665**	**4038**	**6786**	**3566**	**4653**	**4541**
Beloeil	3261	4038	6786	—	—	4695
Bright	—	—	—	3566	4193	3879
St-Augustin	2546	—	—	—	—	2546
Winchester ECD	4680	—	—	—	—	4680
Winchester UOG	—	—	—	—	5113	5113
Glifosato sin CropBooster OP	**3530**	**3883**	**6603**	**3510**	**4642**	**4434**
Beloeil	3146	3883	6603	—	—	4604
Bright	—	—	—	3510	4062	3786
St-Augustin	2459	—	—	—	—	2459
Winchester ECD	4718	—	—	—	—	4718
Winchester UOG	—	—	—	—	5222	5222

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Traitement	1	12304.98	12304.98	0.241625	0.625275	ns
Annee_Site	7	91218552	13031222	255.8862	9.47E-36	***
Traitement:Annee_Site	7	142277.8	20325.4	0.399118	0.898154	ns
Residuals	48	2444441	50925.85	NA	NA	

5.3. Ensayo de herbicidas + bioestimulantes en maíz

El objetivo de este ensayo era verificar el efecto de la tecnología Oligo Prime® en el rendimiento del maíz cuando se utiliza en mezcla con herbicidas que generan altas concentraciones de ROS. Los rendimientos obtenidos cuando estos herbicidas se aplicaron con CropBooster OP fueron mayores que cuando estos herbicidas se aplicaron solos. La diferencia observada fue de 658 kg/ha (10,5 bu/acre). Esta diferencia es significativa.

Estas diferencias positivas se repitieron en todos los años y en todos los sitios.

La comparación de los rendimientos obtenidos al someterlos a distintos programas de herbicidas no resultó significativa. No hubo interacción entre los herbicidas y los tratamientos con bioestimulantes.

Maíz

	2021 (kg/ha)	**2022** (kg/ha)	**2023** (kg/ha)	**Media** 2021-2023 (kg/ha)	
Herbicida sin CropBooster OP	12 390	7487	16 094	12 039	
Herbicida con CropBooster OP	**15 785**	**8101**	**16 505**	**12 698**	
Efecto de la tecnología CropBooster OP	**3395**	**613**	**411**	**658**	***

Maíz

	2021 (kg/ha)	**2022** (kg/ha)	**2023** (kg/ha)	**Media** 2021-2023 (kg/ha)
Herbicida con CropBooster OP	**15 785**	**8101**	**16 505**	**12 698**
Glifosato + tembotrione (Laudis) + atrazine (Aatrex)	15 894	8125	16 672	12 786
Mesotrione/s-metolachlor/atrazine/bicyclopyrone (Acuron) + glifosato	16 427	8003	16 571	12 858
S-metolachlor/mesotrione/glifosato (Halex GT) + atrazine	15 034	8175	16 273	12 448
Herbicida sin CropBooster OP	**12 390**	**7487**	**16 094**	**12 039**
Glifosato + tembotrione (Laudis) + atrazine (Aatrex)	10 211	—	16 518	12 152
Mesotrione/s-metolachlor/atrazine/bicyclopyrone (Acuron) + glifosato	15 821	7802	15 620	12 327
S-metolachlor/mesotrione/glifosato (Halex GT) + atrazine	13 861	7173	16 144	11 647

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	1	8995514.355	8995514.355	7.771923578	0.006719979
Traitementherbicide	2	4557692.492	2278846.246	1.968872281	0.1467643666
Annee_Site	2	1319227604	659613802.2	569.8915992	4.43E-46
Traitement:Traitementherbicide	2	563533.3052	281766.6526	0.243440097	0.784543447
Residuals	75	86807798.59	1157437.315	NA	NA

5.4. Ensayo de herbicidas + bioestimulantes en soja

El objetivo de este ensayo fue verificar el efecto de la tecnología Oligo Prime® sobre el rendimiento de la soja cuando se utiliza en mezclas con herbicidas que generan altas concentraciones de ROS. Los rendimientos obtenidos cuando estos herbicidas se aplicaron con CropBooster OP fueron mayores que cuando estos herbicidas se aplicaron solos. La diferencia observada fue de 167 kg/ha (2,5 bu/acre). Esta diferencia es significativa.

Estas diferencias positivas se repitieron en 2021 y 2022, pero no en 2023.

La comparación de los rendimientos obtenidos con distintos programas de herbicidas es significativa. Este análisis muestra que determinados programas de herbicidas dieron lugar a rendimientos más elevados. La interacción entre herbicidas y tratamientos bioestimulantes no fue significativa.

Soja

	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Media 2021-2023 (kg/ha)	
Herbicida sin CropBooster OP	**4347**	**3130**	**4822**	**4181**	
Herbicida con CropBooster OP	**4594**	**3364**	**4751**	**4349**	
Efecto de la tecnología CropBooster OP	**247**	**233**	**-72**	**167**	***

Soja

	2021 (kg/ha)	2022 (kg/ha)	2023 (kg/ha)	Media 2021-2023 (kg/ha)	
Herbicida con CropBooster OP	**4594**	**3364**	**4751**	**4349**	
S-metolachlor/metribuzin (Boundary LQD) + glifosato	4222	—	—	4222	
Fomesafen/glifosato (Flexstar)	4732	3296	4713	4333	
Chlorimuron-ethyl (Classic) + glifosato	4734	3431	4301	4203	
2,4-D choline (Enlist)	—	—	5277	5277	
Herbicida sin CropBooster OP	**4347**	**3130**	**4822**	**4181**	
S-metolachlor/metribuzin (Boundary LQD) + glifosato	4194	—	—	4194	
Fomesafen/glifosato (Flexstar)	4492	3130	4784	4171	
Chlorimuron-ethyl (Classic) + glifosato	4316	3130	4180	3890	
2,4-D choline (Enlist)	—	—	5523	11 647	
Efecto de la tecnología CropBooster OP	**247**	**233**	**-72**	**167**	**

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Traitement	1	685634.2325	685634.2325	8.279121954	0.005056829
Traitementherbicide	3	1206772.14	4022924.046	48.57732768	1.84E-18
Annee_Site	4	53164980.56	13291245.14	160.4935025	5.04E-39
Traitement:Traitementherbicide	3	607333.7567	202444.5856	2.44454453	0.069449722
Residuals	86	7122076.994	82814.84877	NA	NA



CONCLUSIÓN 6

Según la evaluación de Buchanan et al. (2000) sobre el impacto del estrés biótico y abiótico, el rendimiento medio de los cultivos sólo alcanza el 18% de su máximo teórico. Dado que las pérdidas de rendimiento asociadas al estrés abiótico oscilan entre el 66% y el 82%, frente al 5-10% del estrés biótico, el aumento de la productividad de los cultivos no puede ignorar el estrés abiótico (medioambiental)[5].

Por supuesto, los agricultores no pueden controlar la frecuencia y la amplitud de las tensiones ambientales que afectan a las plantas y los cultivos.

La introducción relativamente reciente de bioestimulantes como los que ofrece la tecnología Oligo Prime® permite reducir el impacto negativo del estrés abiótico en los rendimientos.

Al trabajar con la planta, la tecnología Oligo Prime® estimula y aumenta la eficacia de los mecanismos de defensa naturales presentes en todas las plantas, dándoles más posibilidades de alcanzar y maximizar todo el potencial genético de producción de sus cultivos.

Los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados en campos de maíz y soja nos permiten extraer estas conclusiones principales.

- **Eficacia**. os ensayos realizados entre 2018 y 2023 han demostrado la eficacia de la tecnología Oligo Prime® cuando se utiliza en CropBooster OP.
- **Impacto de la tecnología Oligo Prime®**. Las diferencias de rendimiento observadas pueden explicarse por el impacto de la tecnología en la fotosíntesis y en el aumento de la concentración de proteínas y enzimas necesarias para reducir la concentración de las ROS en el cultivo.

Los ensayos continuarán en 2024.

La tecnología Oligo Prime® es, por tanto, una herramienta eficaz a disposición de los agricultores. Y no perdamos nunca de vista que el objetivo es mejorar la capacidad de los cultivos para tolerar el estrés abiótico mediante el uso de bioestimulantes que reduzcan el impacto del estrés abiótico en el rendimiento de los cultivos. Y un aumento del rendimiento de los cultivos facilitará satisfacer el aumento del 40% de la demanda media de alimentos per cápita de aquí a 2030[1].

¿No es ese nuestro objetivo común?...



BIBLIOGRAFÍA 7

1 OCDE et ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE. *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2021-2030*. (OECD, 2021). doi:10.1787/e32fb104-fr.

2 AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. Document de discussion : Réduction des émissions découlant de l'application d'engrais dans le secteur agricole canadien. https://agriculture.canada.ca/fr/ministere/transparence/recherche-opinion-publique-consultations/faites-connaitre-vos-idees-reduction-emissions-attribuables-aux-engrais/discussion (2022).

3 GIAMPIERI, F. *et al.* Organic vs conventional plant-based foods: A review. *Food Chem.* 383, (2022).

4 LOBELL, D. B., CASSMAN, K. G. et FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34, 179–204 (2009).

5 BUCHANAN, B. B., GRUISSEM, W. et JONES, R. L. Biochemistry and Molecular Biology of Plants. *American Society of Plant Physiologists*, Rockville, Md., (2000).

6 CALVO, P., NELSON, L. et KLOEPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil* 383, 3–41 (2014).

7 du JARDIN, P. Plant biostimulants : Definition, concept, main categories and regulation. *Sci. Hortic.* 196, 3–14 (2015).

8 HALEY, O. The Role of a Foliar Nutrient Product in Relieving Herbicide-Induced Defects in Crop Growth and Development in Zea mays, Triticum aestivum, and Glycine max. McGill University, Montreal, Qc, (2017.)

9 PALL, A. Mitigation of Glyphosate-Induced Plant Stress in Soybean Using Salicylic Acid - ProQuest. McGill University, Montreal, Qc, (2019).

10 KUMAR, S. Abiotic Stresses and Their Effects on Plant Growth, Yield and Nutritional Quality of Agricultural Produce. *Int. J. Food Sci. Agric*. 4, 367–378 (2020).

11 GULL, A. *et al. Biotic and Abiotic Stresses in Plants. Abiotic and Biotic Stress in Plants* (IntechOpen, 2019). doi:10.5772/intechopen.85832.

12 BLUMWALD, E. Abiotic Stress. in *Plant physiology and development* (eds. Taiz, L. et Zeiger, Eduardo) Sinauer associates, Sunderland, Massachusetts, (2018).

13 BEN-ARI, G. et LAVI, U. 11 - Marker-assisted selection in plant breeding. in *Plant Biotechnology and Agriculture* (eds. Altman, A. & Hasegawa, P. M.) 163–184 (Academic Press, San Diego, 2012). doi:10.1016/B978-0-12-381466-1.00011-0.

14 DAS, K. et ROYCHOUDHURY, A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Front. Environ. Sci.* 2, (2014).

15 PARENT, C., CAPELLI, N. et DAT, J. Formes réactives de l'oxygène, stress et mort cellulaire chez les plantes. *C. R. Biol.* 331, 255–261 (2008).

16 HASANUZZAMAN, M. *et al.* Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress : Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. *Antioxidants* 9, 681 (2020).

17 HALLIWELL, B. Reactive Species and Antioxidants. Redox Biology Is a Fundamental Theme of Aerobic Life. *Plant Physiol.* 141, 312–322 (2006).

18 HATZ, S., LAMBERT, J. D. C. et OGILBY, P. R. Measuring the lifetime of singlet oxygen in a single cell: addressing the issue of cell viability. *Photochem. Photobiol. Sci.* 6, 1106–1116 (2007).

19 GILL, S. S. et TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem*. 48, 909–930 (2010).

20 CHOUDHURY, F. K., RIVERO, R. M., BLUMWALD, E. et MITTLER, R. Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *Plant J*. 90, 856–867 (2017).

21 SACHDEV, S., ANSARI, S. A., ANSARI, M. I., FUJITA, M. et HASANUZZAMAN, M. Abiotic Stress and Reactive Oxygen Species: Generation, Signaling, and Defense Mechanisms. *Antioxidants* 10, 277 (2021).

22 SINGH, D. Juggling with reactive oxygen species and antioxidant defense system – A coping mechanism under salt stress. *Plant Stress* 5, 100093 (2022).

23 AHMAD, P., SARWAT, M. et SHARMA, S. Reactive oxygen species, antioxidants and signaling in plants. *J. Plant Biol.* 51, 167–173 (2008).

24 PELÁEZ-VICO, M. Á. *et al.* ROS and redox regulation of cell-to-cell and systemic signaling in plants during stress. *Free Radic. Biol. Med*. 193, 354–362 (2022).

25 FOYER, C. H. *et al.* On the move: redox-dependent protein relocation in plants. *J. Exp. Bot.* 71, 620–631 (2020).

26 DEVIREDDY, A. R., ARBOGAST, J. et MITTLER, R. Coordinated and rapid whole-plant systemic stomatal responses. *New Phytol.* 225, 21–25 (2020).

27 FICHMAN, Y. et MITTLER, R. Rapid systemic signaling during abiotic and biotic stresses: is the ROS wave master of all trades? *Plant J.* 102, 887–896 (2020).

28 GILROY, S. *et al.* A tidal wave of signals: calcium and ROS at the forefront of rapid systemic signaling. *Trends Plant Sci.* 19, 623–630 (2014).

29 LV, Z.-Y. *et al.* Phytohormones jasmonic acid, salicylic acid, gibberellins, and abscisic acid are key mediators of plant secondary metabolites. *World J. Tradit. Chin. Med*. 7, 307 (2021).

30 MITTLER, R., ZANDALINAS, S. I., FICHMAN, Y. et VAN BREUSEGEM, F. Reactive oxygen species signalling in plant stress responses. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 23, 663–679 (2022).

31 CARVALHO, S. J. P. DE, NICOLAI, M., FERREIRA, R. R., FIGUEIRA, A. V. de O. et CHRISTOFFOLETI, P. J. Herbicide selectivity by differential metabolism: considerations for reducing crop damages. *Sci. Agric.* 66, 136–142 (2009).

32 DEVINE, M.D., DUKE, S.O. et FEDTKE, C. Physiology of Herbicide Action. *Weed Technol.* 8, 418–419 (1994).

33 SMITH, D.L. *Minimizing Crop Stress with Micronutrients: Mechanisms and Technologies*. (2018).

34 HIDANGMAYUM, A., DWIVEDI, P., KATIYAR, D. et HEMANTARANJAN, A. Application of chitosan on plant responses with special reference to abiotic stress. *Physiol. Mol. Biol. Plants* 25, (2019).

35 MUKARRAM, M. *et al.* Chitosan-induced biotic stress tolerance and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. *Front. Plant Sci.* 14, (2023).

36 R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing. (2013).

37 CAVERZAN, A., PIASECKI, C., CHAVARRIA, G., STEWART, C. N. et VARGAS, L. Defenses Against ROS in Crops and Weeds: The Effects of Interference and Herbicides. *Int. J. Mol. Sci.* 20, 1086 (2019).