

INTERACCIONES PLANTA-HERBICIDA

*Ing. Agr. Juan Carlos Papa
Protección Vegetal, Manejo de Malezas
EEA Oliveros del INTA*

INTRODUCCIÓN

¿POR QUE HERBICIDAS?

Desde los comienzos de la agricultura, hace diez mil años, atrás, hasta mediados del siglo veinte, el arado y la azada, han sido los únicos medios empleados con intensidad para el control de las malezas. Otros métodos tenían una aplicación muy limitada.

A través del descubrimiento de los herbicidas orgánicos, se ha producido en pocas décadas un avance en el control de las malezas que supera ampliamente el logrado durante varios siglos.

Los herbicidas aparecen como una solución casi mágica, en donde cantidades relativamente pequeñas de producto son capaces de eliminar las plantas indeseables en forma selectiva. El progreso en este campo ha excedido las expectativas iniciales y las posibilidades futuras parecen ser mayores aún.

La facilidad relativa con que se ha descubierto un número muy elevado de sustancias herbicidas, parecería deberse a que las plantas presentarían numerosos "sitios metabólicos" expuestos al ataque de bioquímico de otras sustancias; produciendo un efecto tóxico en algunos casos o induciendo tolerancia en otros. Este hecho se ha atribuido a que las plantas han evolucionado dentro de un ambiente químicamente simple (agua, nutrientes, gases) para su existencia comparado con el ambiente químicamente complejo del que dependen los organismos heterótrofos. Por lo tanto, no habría existido para las plantas, la suficiente presión evolutiva necesaria para la elaboración de mecanismos de protección química que, por otro lado, no necesitaban y que aparentemente están presentes en organismos animales. Es así que se conoce un número relativamente mayor de herbicidas que de insecticidas.

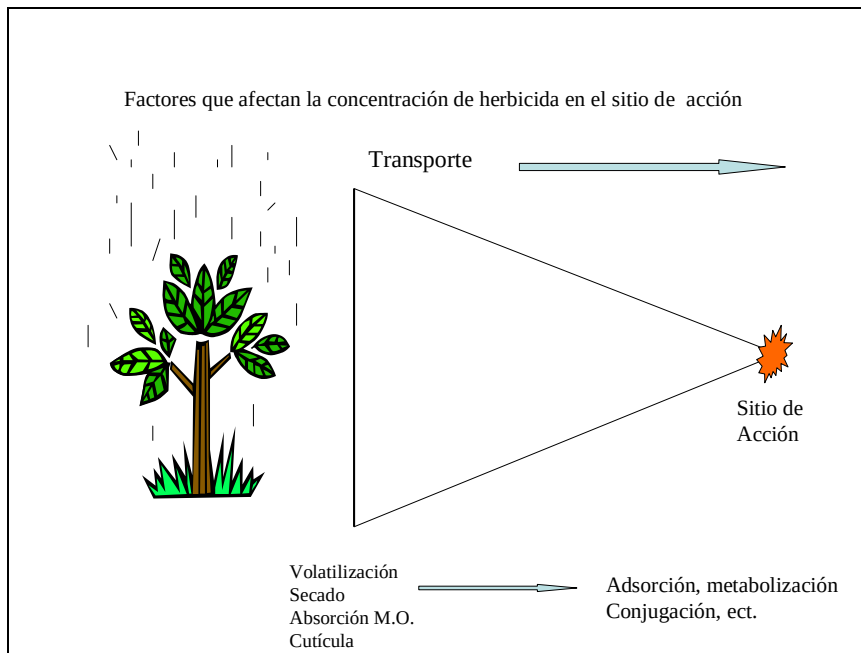
EL MODO DE ACCIÓN DE LOS HERBICIDAS

El modo de acción de los herbicidas se lo puede definir como la secuencia completa de eventos que culmina provocando algún daño en la planta que, eventualmente (pero no necesariamente) puede ser la muerte. Incluye todas las áreas de interacción entre el herbicida, el cultivo y la/s maleza/s. Estas interacciones son las que contribuyen en gran medida al éxito o fracaso del tratamiento y ocurren a nivel de la intercepción, el movimiento y el metabolismo de las plantas.

Se entiende por mecanismo de acción a la interferencia bioquímica o biofísica causada por un herbicida que determina el daño final a la planta y tiene lugar en el sitio de acción. Por ejemplo, para la atrazina, el mecanismo de acción es la interferencia en el transporte de electrones durante el proceso de la fotosíntesis, mientras que el modo de acción es la secuencia de eventos que comienza con la absorción del herbicida por el follaje y/o las raíces y culmina, con

la llegada al sitio de acción donde finalmente tiene lugar el mecanismo de acción. El sitio de acción es la proteína D1 quinona en el cloroplasto (López y Papa, 1989).

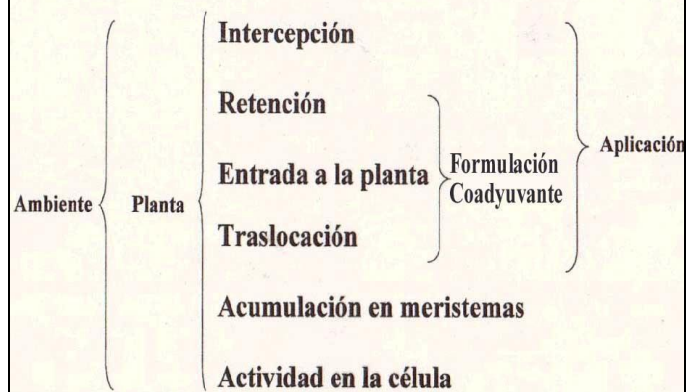
Durante trayecto del herbicida desde el blanco inicial de la aplicación hacia el sitio de acción, pueden ocurrir pérdidas debidas a la inmovilización del principio activo en distintas estructuras celulares, metabolización, etc. lo que determina que al sitio de acción pueda llegar sólo una fracción de lo que se aplicó, pero cuanto mayor sea la magnitud de esta fracción, tanto mayor será el impacto del tratamiento herbicida.



Por lo tanto para que un herbicida actúe deberá:

- Tomar un contacto adecuado con la planta (debe ser interceptado y retenido)
- Ser absorbido por la misma
- Movilizarse hasta el sitio de acción sin desactivarse
- Alcanzar el sitio de acción en una concentración tóxica (cuadro 1)

Cuadro 1: Etapas en la actividad de un herbicida y factores que las afectan



El blanco principal de la aplicación de un herbicida así como el momento de la aplicación va a estar íntimamente relacionado con su modo de acción: así por ejemplo, el metolaclor o la trifluralina que son principalmente absorbidos por los brotes o raíces de las plántulas en nacerencia, son normalmente aplicados al suelo en presiembra o en preemergencia mientras que herbicidas como el glifosato o el paraquat que son absorbidos por las hojas, son aplicados al follaje en postemergencia.

Absorción y Traslocación

La absorción y la traslocación son los dos primeros procesos involucrados en el modo de acción de los herbicidas. Cuanto mayor sea la magnitud de estos procesos tanto mayor será la concentración del herbicida en el sitio de acción y dicha magnitud va a depender de factores tales como las características físico químicas del herbicida, la formulación, el uso de coadyuvantes, las características de la planta, las condiciones ambientales, etc.

ABSORCIÓN

La absorción puede ser definida simplemente como el pasaje del herbicida desde el medio externo al medio interno de la planta, ésta puede efectuarse a través del follaje o a través de órganos subterráneos cuyo principal representante es el sistema radicular.

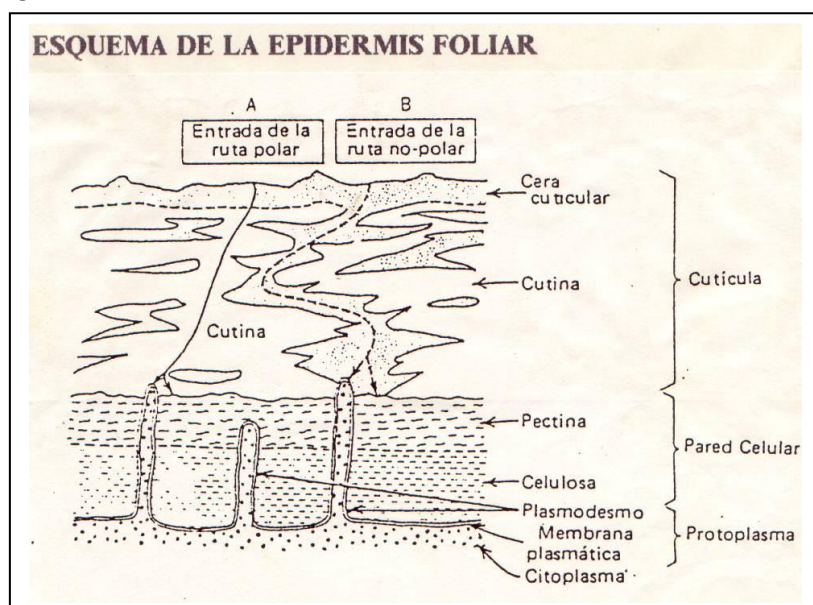
Absorción a Través del Follaje

En el caso de la absorción foliar, la primer barrera que debe atravesar el herbicida es la pared celular de las células de la epidermis foliar cuya capa más externa se encuentra impregnada de pectina y revestida por la cutícula. La cutícula es una membrana muy delgada que tapiza toda la superficie herbácea de

la planta expuesta al aire, incluso la cámara subestomática. Esta cumple una función protectora, contribuyendo a mantener el equilibrio hídrico en la planta y a dificultar o impedir el ingreso al medio interno de agentes externos con actividad biológicas (xenobióticos).

La cutícula está constituida por una matriz o esqueleto de cutina que es un compuesto semipolar, impregnado por cera que es un compuesto no polar y por lo tanto hidrofóbico, a su vez la superficie más externa está compuesta por una capa de cera de textura irregular, muy difícil de mojar que constituye la denominada epicutícula.

Figura 1



Debajo de la cutícula se encuentra la pared celular que consiste principalmente de celulosa y pectina. La celulosa es un polímero β -1,4-glucano y está presente en la pared celular en forma de estructuras ordenadas llamadas microfibrillas, siendo muy hidrofílica. La pectina es un polímero también hidrofílico formado principalmente por ácido galacturónico y predominando en las áreas de la pared cercanas a la superficie celular aunque puede aparecer insertada dentro de las partes inferiores de la cutícula, mientras que la celulosa es más abundante internamente.

La barrera final para la entrada del herbicida dentro del citoplasma es la membrana plasmática o plasmalema de naturaleza anfifílica. Las principales moléculas de dicha membrana son los lípidos y las lipoproteínas que interactúan tanto con los solventes orgánicos como con el agua.

El transporte de herbicidas a través de la membrana plasmática es generalmente pasivo (sin intervención de energía). La única excepción documentada a la difusión pasiva es la de los herbicidas fenólicos. La forma ácida sin disociar de estos herbicidas se transporta en forma pasiva pero la

formulación aniónica lo hace en forma activa (necesitando un suplemento de energía metabólica) utilizando un transportador o carrier.

Las vías de absorción foliar más importantes son: la vía hidrofílica o polar que es la que siguen principalmente los herbicidas polares o hidrofílicos y que está representada por los grupos polares de la cutina, la pectina y las paredes celulares y la vía lipofílica o no polar que es la vía que siguen principalmente los herbicidas no polares o lipofílicos y que está representada por las ceras de la cutícula y por los grupos no polares de la cutina (figura 1).

El mecanismo de absorción foliar es la difusión pasiva sin gasto de energía y la magnitud del mismo va a depender de:

- a) El coeficiente de partición del herbicida (K_{ow}): es una medida de la afinidad del herbicida por los compuestos orgánicos o la liposolubilidad del herbicida y está determinado por la relación entre la concentración del herbicida en octanol y la concentración del herbicida en agua a partir de una solución del herbicida en una mezcla de octanol y agua. En general la difusión se ve favorecida en los compuestos de alto K_{ow} . Este es un dato que comunmente se detalla en los manuales técnicos de los herbicidas.
- b) La temperatura: en general entre 5 y 30 grados centígrados a medida que aumenta la temperatura aumenta la magnitud de la difusión y por lo tanto aumenta la absorción.
- c) El gradiente de concentración, es decir de la diferencia entre la concentración del herbicida en el medio externo y la concentración en el medio interno. Así en el momento que la gota que porta el herbicida impacta en el blanco, este gradiente será máximo lo que determinará que la tasa de absorción también sea máxima; a medida que aumenta la concentración en el medio interno, el gradiente disminuye y también lo hará la absorción salvo que medie algún proceso por el cual el herbicida se disipe del medio interno, tal como la metabolización o el transporte.
- d) Las condiciones ambientales favorables, especialmente de luz, temperatura, humedad atmosférica y edáfica favorecen la absorción.
- e) La formulación y/o del empleo de coadyuvantes (tensioactivos, aceites coadyuvantes, correctores de calidad de agua, etc.) favorecen la absorción de los herbicidas debido a que permiten atravesar con mayor facilidad la barrera impuesta por la epidermis foliar o por sus anexos.

Absorción a Través de las Raíces

Las raíces cuentan con barreras a la absorción de los herbicidas similares a las de las hojas: cutícula, pared celular y plasmalemma, no obstante, a juzgar por el ritmo y la cantidad de herbicida absorbido, la epidermis de las raíces sería más permeable a los herbicidas que la de las hojas. Además, a nivel de la endodermis, encontramos las bandas de Cáspari, que constituyen una barrera adicional.

La absorción es más importante a través de los primeros 5 - 50 milímetros, a contar desde el ápice radicular, por tener un menor desarrollo de las bandas de Cáspari pero un desarrollo suficiente de las vías de conducción.

Los herbicidas penetran en la raíz por tres vías:

- 1) Vía apoplasto: el herbicida se mueve sólo a través de la paredes celulares y espacios intercelulares para llegar al xilema.
- 2) Vía simplasto: incluye la entrada inicial del herbicida en la pared celular para penetrar después al citoplasma de las células epidérmicas y/o corticales. Luego, secuencialmente y por medio de los plasmodesmos, el herbicida pasa de las células endodérmicas, a las células de la estela llegando finalmente al floema.
- 3) Vía apoplasto-simplasto o vía mixta: es similar a la vía simplasto con la diferencia de que el herbicida, después de salvar la zona de las bandas de Caspari, tiene la posibilidad de reingresar a la pared celular y de allí pasar al xilema.

Algunos herbicidas pueden seguir sólo una vía, otros más de una, siendo las características físicas y químicas de cada herbicida las que determinan, principalmente, la ruta a seguir (Figura 2)

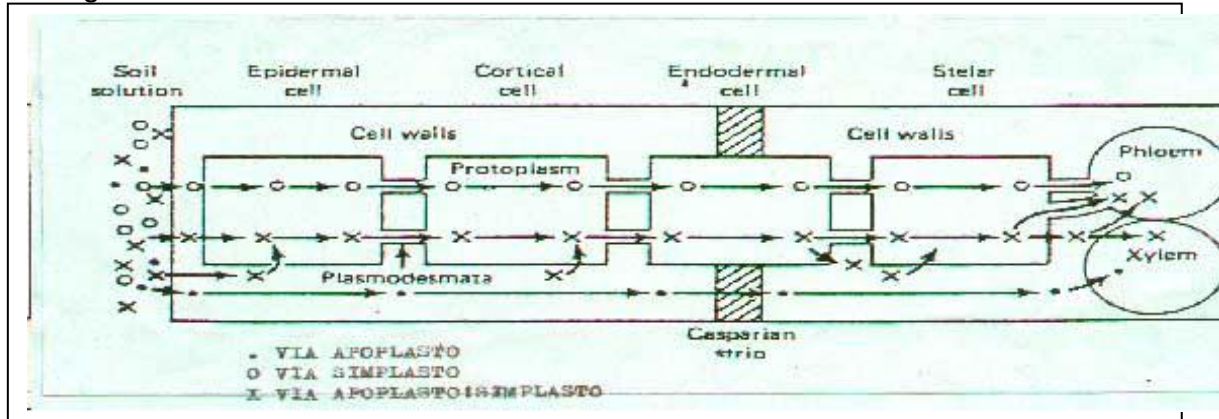
Respecto a los mecanismos de absorción radicular, numerosos estudios, han demostrado la existencia de una absorción inicial relativamente rápida seguida de una absorción continua a un ritmo más lento, lo que indicaría que la absorción inicial rápida se debería a un movimiento pasivo en los espacios internos libres y la absorción más lenta y continua se realizaría con un gasto de energía con movimiento y acumulación en el citoplasma; este último mecanismo independizaría al proceso de absorción del gradiente de concentración.

La absorción a través de las raíces va a depender de:

- 1) La disponibilidad de agua en el suelo la que es especialmente importante para los herbicidas que son absorbidos desde el suelo.
- 2) La proporción de coloides en el suelo: el tipo de arcilla y el tenor de materia orgánica pueden llegar a limitar la disponibilidad del herbicida para las raíces de las plantas.

- 3) La lipofilicidad del herbicida (Kow): en general los herbicidas liposolubles son absorbidos más fácilmente que los hidrosolubles.
- 4) El pH de la solución del suelo: el medio ácido (pH 4 – 5) favorece la absorción de los herbicidas a través de las raíces.

Figura 2: Vías de absorción a través de la raíz



2.2 TRASLOCACIÓN

Una vez que la absorción se ha completado, los herbicidas pueden actuar en las proximidades del lugar donde fueron aplicados (de contacto) o ser traslocados (sistémicos) o de ambas maneras a la vez. Luego de la absorción, la traslocación del herbicida hacia el sitio de acción constituye el proceso más importante involucrada en el modo de acción.

Los herbicidas se movilizan dentro de la planta a través del sistema simplasto y del sistema apoplasto. Algunos herbicidas son traslocados principalmente por el sistema simplasto, otros por el sistema apoplasto y otros son capaces de utilizar ambos sistemas simultáneamente. Algunos herbicidas son capaces de pasar de un sistema a otro durante el transporte (figura 3).

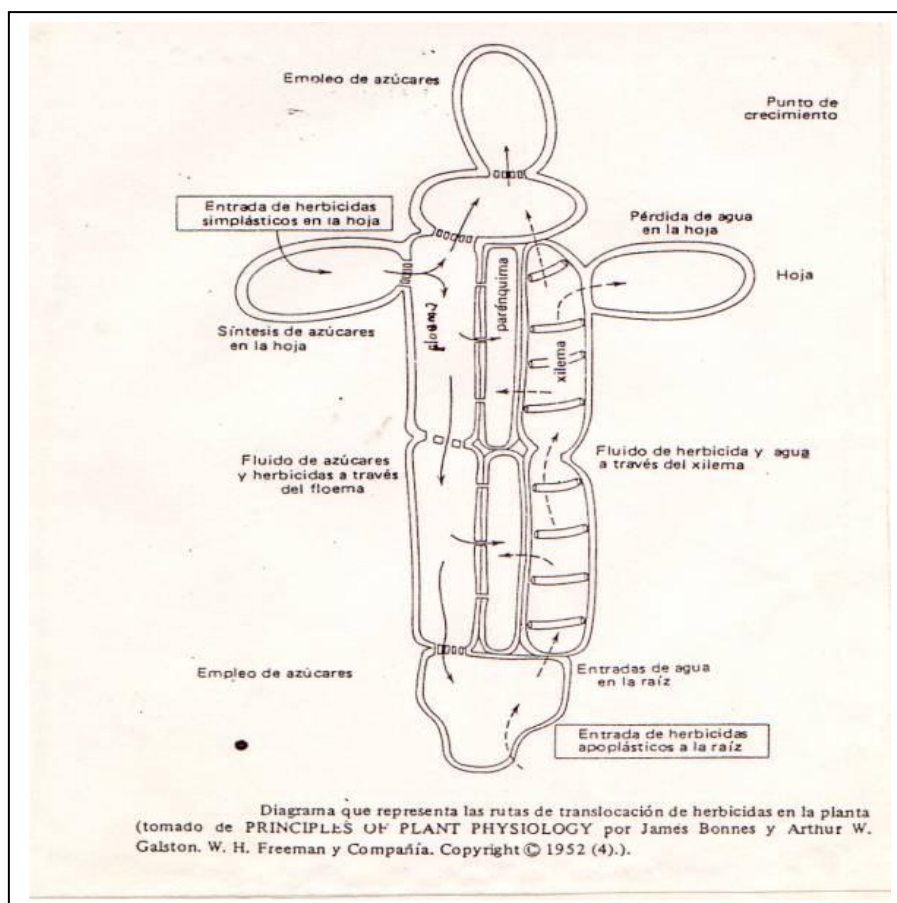
El sistema apoplasto está constituido por el *continuum* de los espacios intercelulares, paredes celulares y xilema, es considerada como la parte “no viva” de la planta. Los herbicidas que se movilizan por el apoplasto y que son absorbidos por las raíces, siguen el mismo camino que el agua, desplazándose hacia arriba con la corriente transpiratoria y actúan en forma sistémica. Cuando estos compuestos son absorbidos por las hojas, permanecen en el tejido tratado y tienen acción de contacto; a modo de ejemplo, podemos citar a la atrazina. El motor de este flujo es el gradiente de potencial agua existente entre el suelo y la atmósfera.

El sistema simplasto, está constituido por el *continuum* formado por el citoplasma celular, el plasmadesmata y el floema, se considera la parte “viva” de la planta. Los herbicidas móviles en esta vía y que son absorbidos por las hojas, se mueven junto con los fotoasimilados hacia los sitios que constituyen destinos

de los mismos como los meristemas, raíces, rizomas, bulbos, frutos, semillas, etc. Como ejemplo de herbicidas que se movilizan principalmente por esta vía podemos citar a al glifosato y al 2,4 D. El motor de este flujo es el gradiente de presión osmótica existente entre las hojas maduras, que son las fuentes de los fotosintatos y los destinos de los mismos.

Los herbicidas que son móviles empleando efectivamente ambas vías, serán sistémicos independientemente de si la absorción se produjo a través del follaje (traslocación por simplasto) o del sistema radicular (traslocación por simplasto). A modo de ejemplo de esta alternativa podemos citar a las sulfonilureas (metsulfurón metil, clorimurón etil) y a las imidazolinonas (imazaquín, imazetapir).

Figura 2: esquema de las vías de traslocación de los herbicidas dentro de la planta.

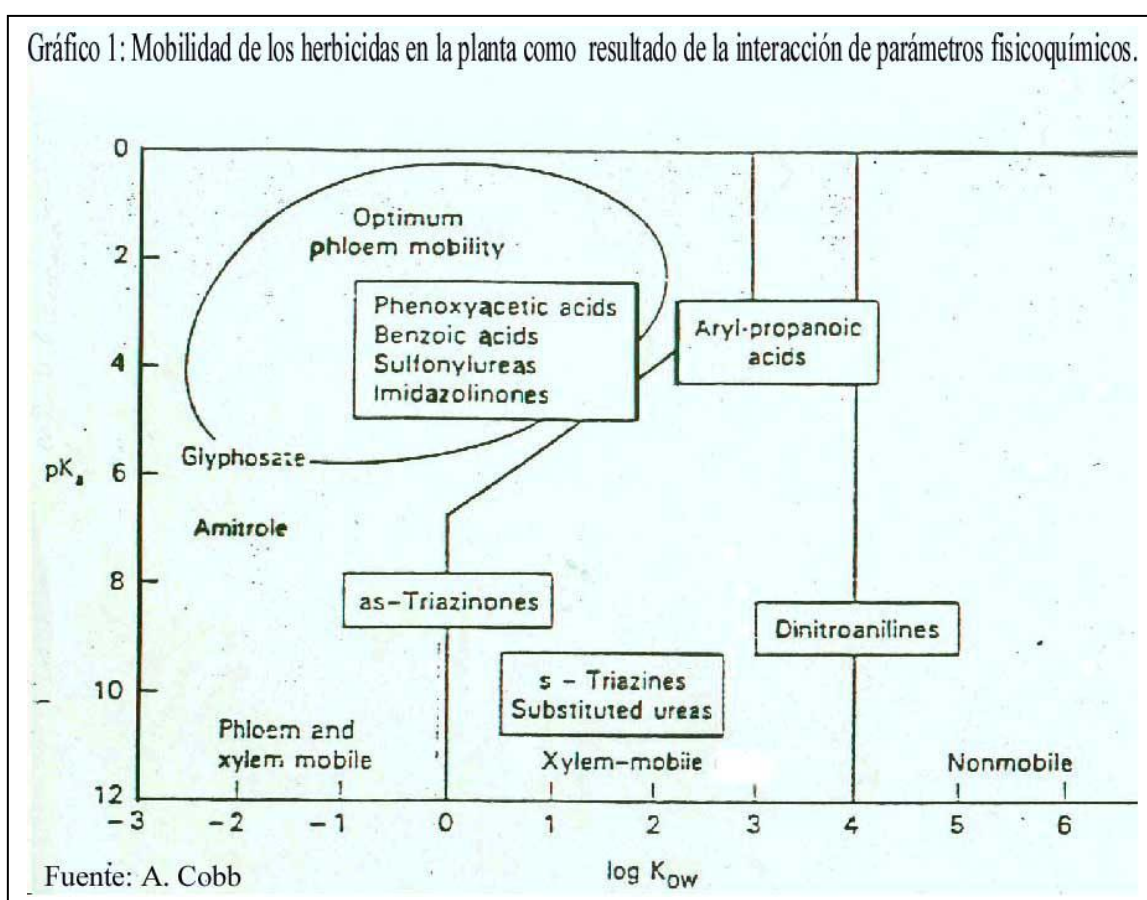


La interacción entre parámetros fisicoquímicos como la liposolubilidad del herbicida (K_{ow}) y la tendencia de sus moléculas a disociarse en un medio acuoso, expresada a través de la constante de disociación (K_a) va a determinar en gran medida su movilidad dentro de la planta (gráfico 1):

- Los herbicidas de baja liposolubilidad serán capaces de movilizarse tanto en apoplasto como en simplasto p.e. aminotriazol. Aquéllos, dentro de este

grupo que posean una constante de disociación alta, tendrán una movilidad óptima en el simplanto p.e. fenoxiderivados, sulfonilureas, glifosato.

- Los herbicidas de liposolubilidad intermedia serán aptos para moverse en el apoplasto p.e. triazinas simétricas. Dentro de este grupo, aquéllos que tengan una constante de disociación alta tendrán una movilidad leve en simplanto p.e. ariloxifenoxipropionatos.
- Los herbicidas de liposolubilidad alta serán prácticamente inmóviles independientemente de su constante de disociación p.e. dinitroanilinas.



ASPECTOS RELACIONADOS CON LA ACTIVIDAD DE LOS HERBICIDAS

Actividad de los Herbicidas Aplicados al follaje

La eficacia de este tipo de herbicidas está particularmente asociada al uso de una tecnología de aplicación adecuada, que asegure un número suficiente de impactos sobre el follaje.

En las aplicaciones de postemergencia la dosis o cantidad del herbicida que se capte y entre en la planta dependerá de las relaciones tanto físicas como química que se logre entre el herbicida y la superficie del follaje. Estas relaciones van a estar influenciadas por factores tales como el tamaño de la planta, su edad, procesos de estrés, la temperatura del aire, la humedad relativa, etc.

El agregado de aditivos, como aceites concentrados, tensioactivos o fertilizantes líquidos (por ejemplo, el UAN) puede incrementar la absorción del herbicida por la planta. Por el contrario, la cantidad de herbicida absorbido puede disminuir cuando el producto se aplica sobre malezas grandes, dañadas o viejas, o con condiciones de alta temperatura o sequía.

2.3.2 Actividad de los Herbicidas Aplicados al Suelo

Para que estos productos sean efectivos es importante que al aplicar el herbicida se lo ubique en los primeros centímetros del suelo (1 a 5 cm), ya que la mayoría de las semillas son pequeñas y germinan dentro de una capa entre 0,5 y 2,5 cm de profundidad.

Una vez que se aplicó el herbicida, la “activación” del mismo se puede lograr mediante incorporación mecánica o en forma natural, por efecto de las precipitaciones. Lo más importante es que, una vez que se incorporó, debe tomar contacto con la planta para que lo absorba a través de las raíces y/o brotes. En el caso que el producto se absorba por raíces su disponibilidad disminuye a medida que aumenta la profundidad que alcanzan las mismas. Por ello, las plantas pueden sobrevivir cuando los ápices de las raíces logran pasar la zona donde se encuentra el herbicida, del mismo modo que las semillas que pueden germinar desde profundidades mayores.

Muchos herbicidas que son aplicados al suelo se absorben a través de los brotes de las plántulas, mientras ellas aún están bajo la superficie, por lo que se pueden dañar o morir antes de que emerjan. Los herbicidas volátiles, tales como los ditiocarbamatos (EPTC) y dinitroanilinas (trifluralina), pueden ser absorbidos en fase gaseosa.

Los herbicidas menos volátiles, como las acetanilidas (alaclor, acetoclor) o los no volátiles como el imazaquín o el flumetsulam pueden ser absorbidos desde la solución del suelo. Las condiciones ambientales que favorecen la emergencia y el crecimiento rápido del cultivo reducen el tiempo que la planta está en contacto con el suelo tratado con el herbicida y, por lo tanto, la posibilidad de daño.

Los herbicidas que se aplican al suelo difieren en su aptitud para moverse dentro de la planta. Así las dinitroanilinas son inmóviles y, por lo tanto los síntomas de daño se localizan o quedan confinados al lugar por donde entran. Otros se movilizan dentro de la planta, como, por ejemplo, la atrazina aplicada al suelo se absorbe por las raíces de las plantas y asciende con el agua, se transporta junto con ella por el apoplasto y se concentra en las hojas. Allí, por ser el lugar donde se concentra el herbicida, los síntomas de daño serán más pronunciados.

SELECTIVIDAD

El proceso de selectividad consiste en la capacidad que tiene un herbicida de controlar a una especie vegetal (maleza) sin dañar a otras especies vegetales (cultivos). La selectividad depende de factores intrínsecos de las especies, de características del medio ambiente, de propiedades del herbicida y de aspectos relacionados con el manejo.

El margen de la selectividad puede ser muy estrecho, sólo lo suficiente como para lograr un control adecuado de las malezas sin dañar al cultivo; esta es una situación indeseable debido a que pequeñas alteraciones en la actividad del herbicida (por ejemplo bajo diferentes condiciones ambientales) pueden dar como resultado un pobre control de malezas y/o fitotoxicidad al cultivo. Por otro lado el margen para la selectividad puede ser muy amplio como en el caso de los cultivos biotecnológicamente modificados tolerantes a herbicidas como el glifosato.

La selectividad puede estar asociada características tales como la intercepción diferencial del herbicida, absorción diferencial del herbicida, diferencias en la tasa de metabolización o en la vía metabólica, sensibilidad diferencial de la proteína o enzima blanco del herbicida, habilidad diferencial para tolerar los efectos tóxicos del herbicida (tabla 1).

El mecanismo de selectividad más frecuente es la metabolización diferencial (p.e. especies tolerantes a las sulfonilureas), seguido por diferencias en el sitio de acción o en la proteína blanco (especies latifoliadas que son capaces de tolerar a cicloexanodionas o bien cultivos transgénicos tolerantes a glifosato).

Tabla 1: Mecanismos de selectividad de los herbicidas (Fuente: A. Cobb)

<i>Proceso responsable de la selectividad</i>	<i>Mecanismo de selectividad</i>
Intercepción/Absorción del herbicida	Angulo de la hoja, características de la superficie foliar (composición de la cutícula o presencia de tricomas).
Posición o lixiviación del herbicida en el suelo	Selectividad posicional relacionada con la distribución de las raíces en el suelo.
Metabolización del herbicida	Presencia de enzimas que metabolizan el herbicida.
Interacciones a nivel del sitio de acción	Diferencias a nivel de la estructura de la proteína.
Habilidad para tolerar los efectos tóxicos	Presencia de un sistema enzimático de detoxificación; reservas almacenadas que permiten a la planta sobreponerse al daño.

Existen situaciones en las cuales un cultivo es dañado por un herbicida que normalmente es tolerado, porque la planta no tuvo la capacidad suficiente para

metabolizarlo y degradarlo. Esto puede deberse a diferentes causas, como el momento inadecuado de aplicación, condiciones ambientales desfavorables o errores operativos; también pueden estar asociados al empleo de mezclas antagónicas como p.e. la mezcla de sulfonilureas e insecticidas órganofosforados en la cual el insecticida afecta negativamente la capacidad de las plantas del cultivo para metabolizar el herbicida y como resultado de esto manifiestan síntomas de fitotoxicidad propios del herbicida.

INTERACCIONES HERBICIDAS

En la tabla 2 se presentan casos informados de interacción entre herbicidas.

Los herbicidas antagónicos del grupo I son inhibidores de la división celular y del crecimiento celular. La absorción radicular y movilidad del herbicida “actuante” se ve reducida debido a que el crecimiento de las raíces es pobre como consecuencia de la acción del herbicida “interactuante”. El resultado es una disminución en la actividad herbicida de esta combinación.

Los herbicidas del grupo II interactúan positivamente. Los herbicidas “interactuantes” de este grupo afectan la síntesis de lípidos y en particular la de ceras epicuticulares de las hojas de las plantas tratadas; esto conduce a un incremento de la tasa de transpiración favoreciendo la movilización de los herbicidas que emplean la vía apoplasto así como la absorción de los herbicidas aplicados al follaje.

Las combinaciones de herbicidas de los grupos III, IV y V muestran aumentos o disminuciones de la actividad herbicida según aumente o disminuya la tasa de detoxificación.

En general, los herbicidas detallados en el grupo VI no fueron detalladamente estudiados. Además la magnitud de sus interacciones, en algunas circunstancias, no es muy marcada.

Tabla 2: Interacciones Herbicida-Herbicida.

Herbicida 1 “Actuante”	Herbicida 2 “Interactuante”	Plantas	+/- Posibles mecanismos
<u>Grupo I</u> Metribuzín, atrazina, simazina, prometrina, linurón	Trifluralina, pendimetalina, orizalin, napropamida, alaclor	Soja, tomate, arveja, maíz, malezas varias	(-) Reducción del sistema radicular por 2; reducción de la absorción y el transporte de 1

<u>Grupo II</u> Desmedifan, atrazina, 2,4 D, diquat	TCA, dialato	Arveja, remolacha	(+) Reducción de los depósitos de cera en las hojas por 2; aumento en la absorción foliar y radicular de 1.
<u>Grupo III</u> Diclofop-metil, famprop ester	2,4 D, MCPA, dicamba, bromoxinil	Avena, maíz	(-) Se incrementa la tasa de conjugación de 1
<u>Grupo IV</u> Bensulfurón	Tiobencarb, dimepiperato	Arroz	(-) Se incrementa la tasa de detoxificación de 1 en presencia de 2
<u>Grupo V</u> Atrazina	Tridifan	Setaria y otras.	(+) Se inhibe la detoxificación de 1 por 2
<u>Grupo VI</u> Atrazina	Alaclor	Echinochloa	(+) Desconocido
Trifluralina	Alaclor	Ipomoea	(+) Desconocido
Glifosato	Simazina, Atrazina	Maiz, poroto	(-) Unión física en el la solución de 1 por 2
Glifosato	2,4 D, Dicamba	<i>Convolvulus arvensis</i>	(+) Incremento en la absorción y transporte de 1
Ioxinil	mecoprop	<i>Stellaria media</i>	(+) Desconocido
Mefluidide	Bentazón	Arroz	(-) Desconocido
Lenacil	Pirazón	Avena	(+) Desconocido
Barban	Flamprop	Avena	(+) Incremento en la absorción
Barban	2,4 D	Poroto, <i>Cirsium arvense</i>	(-) Reducción en la síntesis de ADN

CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES GRUPOS DE HERBICIDAS

HERBICIDAS MIMETIZADORES DE AUXINAS O REGULADORES DEL CRECIMIENTO

Este grupo de herbicidas se lo denomina también auxínicos u hormonales pues su acción es similar a las auxinas que son hormonas naturales, como el ácido indol acético (IAA) y cuyo papel es fundamental en la división, diferenciación y elongación de las células vegetales. Aplicados a dosis muy bajas su acción es similar a la de las hormonas naturales pero en dosis elevadas son tóxicos y actúan como herbicidas produciendo efectos que alteran el desarrollo normal de las plantas. Estos efectos se manifiestan por un crecimiento en forma exagerada, desordenada y desproporcionada, lo que da como resultado distintos cambios morfológicos.

Los herbicidas de este grupo son usados principalmente para el control de malezas de hoja ancha en cultivos de gramíneas anuales y perennes. Son muy raros los casos de malezas resistentes. Pueden causar daños en gramíneas si no se los aplica en el momento de crecimiento adecuado.

Este grupo de herbicidas esta integrado por:

- a) Fenoxiderivados: 2,4-D, MCPA, 2,4-DB
 - b) Derivados del Ácido Benzoico : DICAMBA
 - c) Derivados del Acido Picolínico: PICLORAM, TRICLOPIR, FLUROXIPIR
- MODO DE ACCIÓN**

Los herbicidas hormonales pueden ser absorbidos por hojas y raíces pero la vía principal de entrada son las hojas. La absorción varía con la formulación, así los ésteres (no polares) son más fácilmente absorbidos que las sales (polares).

Son compuestos sistémicos, cuyo movimiento dentro de la planta se realiza principalmente por el simplasto, conjuntamente con los fotoasimilados desde la fuente de producción a la de destino (consumo o almacenamiento). También es posible su ingreso a través de las raíces como el caso de dicamba, el que se puede traslocar por apoplasto, lo mismo que el piclorán. Estimulan el crecimiento en forma desproporcionada; aumentan la respiración, la división celular y el alargamiento celular.

MECANISMO DE ACCIÓN

No es totalmente conocido, pero se sabe que hay numerosos efectos fisiológicos en múltiples sitios de acción. Se produce un rápido y sostenido flujo de protones desde la célula que resulta en un alargamiento celular; importante acumulación de iones potasio en las células estomáticas determinando su apertura y por consiguiente la estimulación de la fotosíntesis. Simultáneamente, se produce una rápida movilización de azúcares y proteínas celulares de reserva,

esto coincide con un rápido incremento de ARN y de la tasa de síntesis de proteínas. Se incrementa la producción de etileno y se produce una disrupción progresiva de las membranas intracelulares, culminando con la fragmentación del plasmalemma, destrucción de orgánulos y colapso de los tejidos; luego se produce la desintegración radicular, clorosis en hojas y senescencia la cual es seguida rápidamente por la muerte de la planta.

MECANISMO DE SELECTIVIDAD

La selectividad se debe fundamentalmente a la metabolización y conjugación del herbicida con azúcares y aminoácidos. El 2,4-DB no es transformado a 2,4-D por las leguminosas, resultando así selectivo para esta familia.

USOS

2,4D: cereales, pasturas, barbecho químico antes de la siembra de soja, maíz y trigo. Además se aplica en áreas no cultivadas,
2,4-DB: en leguminosas.

HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA EPSPs (enolpirubil shiquímico fosfato sintetasa)

Dentro de este grupo tenemos al herbicida glifosato que es el nombre genérico de una serie de herbicidas que tiene como base al ácido N fosfonometil glicina. Algunas sales de este ácido son las que tienen acción herbicida tales como la sal isopropilamina (varias marcas comerciales), la sal monoamónica (Round Up Max), la sal trimetilsulfonio y la sal potásica (Sulfosato y Sulfosato Touchdown respectivamente)

El glifosato es uno de los herbicidas no selectivos y postemergentes más usados en circunstancias donde se requiere el control total de la vegetación.

Controlan a casi todas las especies pero la susceptibilidad depende de la dosis de ingrediente activo. Así *Amaranthus* sp. es controlado con 0,3 kg./ha y *Cyperus rotundus* con 1,5 kg/ha.

MODO DE ACCIÓN

El glifosato es altamente sistémico. Es absorbido por el follaje y traslocado por el apoplasto y el simplasto. Actúa inhibiendo la síntesis de aminoácidos aromáticos: *tirosina*, *fenilalanina* y *triptofano*.

La acción de este producto es lenta. Según la dosis y la especie, los síntomas visuales aparecen entre los 3 y 8 días después de la aplicación.

En el suelo se inactiva rápidamente al adsorberse a las micelas y/o por acción de los microorganismos que lo utilizan como sustrato.

MECANISMOS DE ACCIÓN

Este grupo de herbicidas actúa bloqueando la enzima EPSPS (enolpiruvil shikimato fosfato sintetasa) que cataliza la biosíntesis de los aminoácidos aromáticos como fenilalanina, tirosina y triptofano. Además hay acumulación de ácido shiquímico que resulta fitotóxico.

MECANISMO DE SELECTIVIDAD

Recientemente, se han logrado cultivos resistentes al glifosato, entre ellos la soja. Esta resistencia se ha logrado mediante la inclusión en el genoma de la soja de un gen que determina la producción de EPSPS que no es afectada por el glifosato. La soja resistente produce ambas enzimas, pero en presencia de glifosato, sólo es bloqueada la enzima susceptible. La marca comercial más conocida es el Roundup, pero hay más de 70 marcas comerciales .

USOS

Barbechos químicos, área no cultivadas, soja tolerante a glifosato y alfalfa implantada cortada y/o pastoreada.

HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA ALS (*aceto lactato sintetasa*)

Estos herbicidas irrumpieron en la década del 80, caracterizándose por tener una gran actividad biológica, por ser de amplio espectro y por tener una selectividad y residualidad variable en función de sus características físicas y/o químicas. Dentro de este grupo tenemos a las **sulfonilureas**, las **imidazolinonas** y las **triazolpirimidinas**, son compuestos químicamente diferentes, pero el modo de acción es el mismo para todos: son sistémicos y actúan inhibiendo la enzima **aceto lactato sintetasa**, fundamental para la biosíntesis de aminoácidos de cadena ramificada como son la *valina*, *leucina* e *isoleucina*. Estos, son aminoácidos forman parte de las proteínas, por ello se afecta todo el proceso de crecimiento y desarrollo de las plantas.

Los inhibidores de la ALS poseen destacadas propiedades herbicidas. Son capaces de controlar un amplio espectro de malezas gramíneas y latifoliadas, anuales y perennes. La mayoría de las formulaciones tienen actividad foliar y en el suelo. Son de muy baja toxicidad para mamíferos. A nivel mundial y también en nuestro país se han registrado casos de malezas resistentes.

La selectividad de estos compuestos en general, se debe a una capacidad de metabolización diferencial entre el cultivo y la maleza.

SULFONILUREAS

Clorimurón: Soja, Alfalfa

Metsulfurón: Barbecho químico y cultivos de Trigo, Arroz, Pasturas, Caña de azúcar y lino.

Nicosulfurón: Maíz.

Primisulfurón: Maíz
Triasulfurón: Trigo
Rimsulfurón: Maíz
Oxasulfurón: Soja
Tifensulfurón metil: Soja
Halosulfurón: Maíz
Etc.

IMIDAZOLINONAS

Imazethapyr: Soja, maní, alfalfa.
Imazaquín: Soja.
Imazapyr: Areas no cultivadas.
Imazamox: Soja
Imazapic
Etc.

TRIAZOLPIRIMIDINAS

Flumetsulam: Soja, maíz, pasturas.
Cloransulam: Soja
Diclosulam: Soja
Etc.

HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA ACCasa (acetil coenzima A carboxilasa)

Son los graminicidas selectivos. Dentro de este grupo encontramos a los ariloxifenoxipropionatos y las ciclohexadionas

Dentro de los **ariloxifenoxis** tenemos los siguientes compuestos: Haloxifop, Quizalofop, Propaquizafop, Fluazifop, Fenoxaprop, Diclofop, Clodinafop y Pirifenop. Dentro de las **ciclohexadionas** disponemos de los siguientes compuestos: Setoxidim, Cletodim y Butroxidim.

MODO DE ACCIÓN

La absorción de estos compuestos se realiza por el follaje y es bastante rápida completándose la absorción de la dosis activa entre 30 y 120 minutos. La adición de aceites favorece significativamente la actividad de este tipo de compuestos. Condiciones ambientales desfavorables y el estado de crecimiento y desarrollo de la maleza pueden influir significativamente sobre la eficacia de los graminicidas lo mismo que las mezclas con algunos herbicidas latifolicidas.

En los ariloxifenoxis, sólo el isómero dextrógiro tiene actividad herbicida. En el tejido foliar se produce la desesterificación, liberándose el ácido que es el compuesto activo fitotóxico. Son sistémicos traslocándose por el floema y xilema

hacia los meristemas donde ejercen su acción. Este grupo de herbicidas actúa inhibiendo la síntesis de ácidos grasos que son indispensables para la formación de los lípidos, componentes esenciales de las membranas celulares, lo que determina la desorganización de los tejidos.

En general, los ariloxifenoxis son absorbidos más rápidamente que las ciclohexadionas las cuales a su vez son susceptibles de fotodescomposición

Mecanismo de Acción

Estos herbicidas actúan inhibiendo la acción de la Acetil Coenzima A Carboxilasa (ACCase) impidiendo la formación de malonilcoenzima A y bloqueando la reacción inicial de la vía metabólica de síntesis de lípidos. Estos herbicidas también podrían actuar afectando la permeabilidad de las membranas celulares.

MECANISMO DE SELECTIVIDAD

La selectividad de estos compuestos se debe a su metabolización, conjugación (trigo), insensibilidad de la enzima ACCase lo que ocurre en (soja y hoja ancha en general) y poca absorción en (arroz)

USOS

Cultivos de hoja ancha en general: Soja, Girasol, Algodón, Maní, Papa, Frutales.

Cultivos de gramíneas: Haloxifop y Fenoxaprop en arroz.

Diclofop, Clodinafop y Fenoxaprop: en trigo.

INHIBIDORES DE LA GLUTAMINOSINTETASA

Dentro de este grupo el único producto es el Glufosinato de Amonio cuyo nombre comercial es Basta o Basta SL o Liberty Es un herbicida postemergente no selectivo, de contacto con una muy pobre traslocación. El transporte ocurre solamente entre las hojas, predominantemente de las inferiores a las superiores. El glufosinato actúa inhibiendo la síntesis de glutamina, con acumulación de amoníaco en los tejidos, destruyendo las células e inhibiendo la fotosíntesis.

MECANISMO DE ACCIÓN

El glufosinato actúa bloqueando a la enzima glutamina SINTETASA, que es fundamental para la asimilación del nitrógeno en las plantas. Al no actuar esta enzima, se acumula amoníaco en los tejidos, lo cual determina la rápida muerte de las plantas tratadas

MECANISMO DE SELECTIVIDAD

No es selectivo naturalmente, si lo es en cultivos modificados a través de técnicas de biotecnología. Por ejemplo el maíz y la soja tolerante a glufosinato de amonio que son capaces de metabolizar el compuesto.

USOS

Glufosinato de amonio: (Basta, Liberty, etc). Se utiliza para el control de malezas en áreas no cultivadas y aplicaciones dirigidas en montes frutales. En la actualidad existen cultivos como el maíz o soja biotecnológicamente modificados, que son capaces de tolerar este herbicida.

HERBICIDAS INHIBIDORES DEL FOTOSISTEMA 1

Comprende herbicidas de contacto no selectivos utilizados para el control malezas anuales en tratamientos de postemergencia de las malezas.

Dentro de este grupo tenemos a los bipiridilos como el diquat y el paraquat

MODO DE ACCIÓN

Estos herbicidas son rápidamente absorbidos por el follaje. Los bipiridilos una vez que han penetrado, son relativamente inmóviles y no son metabolizados.

Mecanismo de Acción

Los bipiridilos, tienen un alto potencial reductor (paraquat 446 mV y diquat 349 mV) lo que les permite recibir los electrones oriundos del fotosistema 1 y más específicamente del P 700 en vez de la ferredoxina, de esta manera no hay formación de NADPH en los cloroplastos. Cuando la molécula del bipiridilo recibe electrón se convierte en un radical catión el cual es inestable y tiende a reaccionar con el oxígeno formando superóxido y regenerándose la molécula del bipiridilo. Los cloroplastos, detoxifican el superóxido a través de la enzima superóxido dismutasa, dando agua oxigenada y el agua oxigenada puede ser detoxificada por una peroxidasa y dos reductasas. Pero estas reacciones de detoxificación ocurren a una muy baja intensidad y son insuficientes para proteger a los cloroplastos de los efectos nocivos de los radicales libres que producen la peroxidación de los lípidos con los consiguientes daños a las membranas; dando lugar a la aparición de síntomas necróticos en bastante poco tiempo.

HERBICIDAS INHIBIDORES DEL FOTOSISTEMA 2

Estos herbicidas son empleados principalmente para tratamientos de preemergencia para controlar latifoliadas anuales en varios cultivos. No obstante también pueden ser empleadas en tratamientos de postemergencia sobre malezas en estado de plántula. También tienen efecto sobre algunas gramíneas. Dentro de este grupo tenemos a las triazina como la atrazina, el metribuzín, etc., ureas como el diurón, linurón, etc. y uracilos como terbacil o el bromacil.

MODO DE ACCIÓN

Cuando estos herbicidas son aplicados al suelo, en condiciones adecuadas, son rápidamente absorbidos por las raíces y se traslocan vía apoplasto, siguiendo la corriente transpiratoria, hacia las hojas y demás órganos verdes donde actúan. En las aplicaciones foliares, la absorción es menos intensa que a través de las raíces pero con buenas condiciones ambientales y con el agregado de un coadyuvante las plántulas pueden absorber el herbicida bastante rápidamente y su movilidad se limita, en este caso, a seguir la corriente transpiratoria desde el lugar donde el herbicida penetró hacia la periferia.

Los Inhibidores del F.S. 2 son metabolizados rápidamente por las plantas tolerantes.

Mecanismo de Acción

El mecanismo de acción tiene lugar en el cloroplasto, al bloquear el herbicida a la proteína D1 que transfiere electrones a la quinona Qb, interrumpiéndose el flujo de electrones en el fotosistema 2; no obstante, la clorofila continúa absorbiendo energía, y adquiere un estado denominado de "Triplete", esta clorofila sobrecargada puede reaccionar con el oxígeno dando radicales oxígeno que producen la peroxidación de los lípidos de las membranas o bien la clorofila en estado de Triplete puede reaccionar directamente con los lípidos. Por supuesto, es imprescindible la presencia de luz para que este tipo de herbicida pueda funcionar.

Los herbicidas del grupo de los nitrilos como el bromoxinil y los benzotiadiazoles como el bentazón tienen un mecanismo de acción similar, difieren de los anteriores en el hecho de que no son móviles en el suelo y por lo tanto no pueden ser absorbidos por las raíces por lo tanto son activos sólo en aplicaciones foliares.

INHIBIDORES DE LA PROTOXIDOPORFIRINOGEN OXIDASA (PROTOX)

Los herbicidas inhibidores de PROTOX son empleados para el control selectivo de malezas dicotiledoneas anuales en tratamientos de postemergencia

de las malezas en estado de plántula, no obstante, algunos productos de este grupo son activos en aplicaciones al suelo.

Podemos citar:

Difeniléteres: acifluorfen, fomesafen, fluoroglicofen, lactofen, oxifluorfen (este último también puede ser aplicado al suelo).

Ftalamidas: flumiclorac pentil, flumioxazin (este último activo en aplicaciones al suelo y al follaje)

Triazolinonas: sulfentrazone (para aplicaciones al suelo).

MODO DE ACCIÓN

Estos herbicidas son absorbidos rápidamente por las hojas y con menor intensidad, por las raíces. Las aplicaciones foliares requieren de coadyuvantes para optimizar su acción. Los herbicidas de este grupo aplicados al suelo son absorbidos fundamentalmente por el hipocótilo, cotiledones, epicótilo y coleoptilo durante la germinación. Son poco traslocados por la planta pudiendo moverse por la vía apoplasto. Son metabolizados por los cultivos tolerantes.

MECANISMO DE ACCIÓN

Estos herbicidas actúan bloqueando la enzima protóxidoporfirinogen oxidasa que interviene en la biosíntesis de clorofila catalizando el pasaje de protoporfirinogen IX a protoporfirina IX. El protoporfirinogen, en ausencia de la enzima se acumula en el citoplasma donde se transforma en protoporfirina la cual reacciona con el oxígeno dando lugar a radicales oxígeno que producen la peroxidación de los lípidos de las membranas destruyéndolas.

INHIBIDORES DE LA BIOSÍNTESIS DE PIGMENTOS CAROTENOIDES

Los herbicidas de este grupo son generalmente empleados en tratamientos de preemergencia para el control selectivo de especies mono y dicotiledoneas anuales y algunas perennes. Estos herbicidas producen una sintomatología característica e inconfundible que es el blanqueado de las hojas de las plantas sensibles.

Dentro de este grupo podemos citar al clomazone, norfluorazón, fluorocloridona, isoxaflutole, mesotrione, topramezone.

MODO DE ACCIÓN

Estos herbicidas son absorbidos fácilmente por los tejidos meristemáticos en el follaje y en las raíces. Son traslocados vía apoplasto y se acumulan en los cloroplastos. Estos herbicidas son metabolizados rápidamente por las especies tolerantes.

MECANISMO DE ACCIÓN

Estos herbicidas actúan en la ruta de síntesis de los terpenoides. Esta ruta metabólica es muy importante porque provee a las plantas con ésteres, ácido giberélico, ácido abscísico, vitamina E (tocoferol), vitamina K, carotenoides, titol, plastoquinona, etc.

Los pigmentos carotenoides, están presentes en la membrana del cloroplasto y tienen como función disipar en forma de calor, el exceso de energía química acumulado por las clorofilas. Los carotenos y la vitamina E también evitan la acción tóxica de los radicales libres. El efecto de estos herbicidas puede ser explicado, en parte, por la ausencia de carotenoides en los cloroplastos y la consecuente peroxidación de los lípidos y destrucción de las membranas y muerte de las plantas. Un efecto indirecto de estos herbicidas, puede tener lugar por la falta de ácido abscísico, lo que limita el cierre de los estomas cuando la planta está sometida a stress hídrico, por lo tanto la planta no puede limitar las pérdidas de agua desecándose rápidamente.

Las plantas emergen del suelo con una coloración blanca pero la morfología no sufre alteraciones.

HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA POLIMERIZACIÓN DE TUBULINAS

Estos herbicidas son moderadamente volátiles, susceptibles de fotodescomposición e insolubles en agua, estando su movilidad limitada a la fase de vapor. Controlan principalmente gramíneas anuales y algunas latifoliadas anuales. Generalmente son empleados para el control selectivo de malezas como un tratamiento de presembrado incorporado o preemergencia antes de la germinación de las malezas ya que no actúan sobre malezas ya nacidas en el momento de la aplicación.

Dentro de este grupo tenemos herbicidas de la familia de las dinitroanilinas como el pendimetalín, la trifluralina, el orizalín, etc.

MODO DE ACCIÓN

Estos herbicidas son absorbidos por las raíces y también por la parte aérea de las plántulas en nacerencia cuando están atravesando la región del suelo que contiene el herbicida. En general, las dinitroanilinas no son metabolizadas por las plantas con la excepción de algunas especies como el girasol, el chamico, etc. La selectividad se debe principalmente a su poca movilidad en el suelo y en la planta.

MECANISMO DE ACCIÓN

Estos herbicidas actúan bloqueando las tubulinas que son las proteínas que se polimerizan para formar los microtúbulos que intervienen durante la mitosis en la separación de los cromosomas. También se los denomina venenos mitóticos porque interrumpen la división celular.

Las dinitroanilinas actúan principalmente a nivel de las raíces bloqueando su crecimiento y dando lugar a un engrosamiento manifiesto en la zona meristemática. Como consecuencia de la falta de raíces, la parte aérea queda atrofiada.

HERBICIDAS INHIBIDORES DEL CRECIMIENTO DE LA PARTE AÉREA

Comprende a herbicidas selectivos para una gran diversidad de cultivos en preemergencia (amidas) o en presiembra incorporada (tiocarbamatos). Son eficaces principalmente sobre gramíneas anuales y algunas latifoliadas anuales de semilla pequeña. También son efectivos sobre algunas ciperáceas.

Dentro de este grupo encontramos a:

Amidas: acetoclor, alaclor, metolaclor, dimetenamida, butaclor, napropamida.

Tiocarbamatos: EPTC, butilato, molinate, tiobencarb.

MODO DE ACCIÓN

Estos herbicidas son absorbidos por el coleoptile, cotiledones, epi e hipocótilo de las plántulas en nacencia. Son incapaces de actuar sobre plantas ya nacidas en el momento de la aplicación. La traslocación es reducida en las amidas pero no así en los tiocarbamatos, no obstante ésta carece de importancia ya que, normalmente la acción se ejerce en las proximidades del lugar donde entró. Estos herbicidas son metabolizados rápidamente en las plantas tolerantes o bien se conjugan con glutatión.

MECANISMO DE ACCIÓN

El mecanismo de acción exacto no es conocido completamente. Estos herbicidas actuarían inhibiendo la síntesis de lípidos, también inhibirían la síntesis de giberelinas, de flavonoides y de proteínas.

Normalmente las plántulas afectadas no alcanzan a emerger. Las que logran emerger lo hacen con sus hojas muy deformadas y con una coloración predominantemente verde oscuro.

Bibliografía

Ashton, F. M. and Crafts, A.S. 1981 Absortion and translocation of herbicides. Recent advances in herbicides.

Camacho, RF; Mosher, L.J. 1991. Absorption, translocation and activity of CGA-136872, DPX-V9360 and Glyphosate in rhizome Johnsongrass (Sorghum halepense. L. Pers). Weed Science. 39: 354-357.

Cobb, A. 1992. Herbicides and Plant Physiology. Ch. 2. Chapman and Hall.

Devine, M.D.; Duke,O. and Fedtke, C. 1993. Phsiology of herbicide action. P.R.T. Prentice Hall. Englewood Clifs. New Jersey. EE.UU.

Falcón, Luisa F. de y Papa, J.C. 2001. El modo de acción de los herbicidas y su relación con los síntomas de daño. EEA Paraná el INTA y EEA Oliveros del INTA. Centros Regionales Paraná y Santa Fe del INTA.

Gauvrit, G. and Cabanne, F. (1993). Oils for weed control: Uses and Mode of Action. Pestic. Sci, 37 147-153.

Gunsolus, J.. and curran, W.S. 1994. Herbicide Mode of action and injury symptoms. North Central Regional Extension. EE. UU. Publication 337.

Harz, J.; Guggenheim, R.; Schulee, G. and Falk, R. H. (1991). The leaf surface of mayor weeds. Weeds. Sandoz Agro Ltd.

Klingman, G.C., (1980). Estudio de las plantas nocivas. Principios y prácticas. Cap.3, p. 58-74. Editorial Limusa. México.

Papa, J.C y Massaro, R.A. 1999. Evaluación de la fitotoxicidad sobre maíz de nicosulfurón aplicado solo y en mezcla con clorpirifos. Maíz, Para mejorar la producción, número 10. EEA Oliveros INTA. Pp. 63 – 66.

Victoria Filho, R. (1985). Fatores que influenciam a absorcao foliar dos herbicidas. Controle de Plantas Daninhas- II. Inf.Agropecuaria, Belo Horizonte.