

Quesada-Cabezas et al. 2024. Respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaza a herbicidas

**UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS**

Respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaza a los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona (solos y en mezclas), usados en plantaciones de piña de la región Huetar Norte de Costa Rica.

Trabajo Final de Graduación bajo la modalidad de Artículo Científico para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agronómica con énfasis en Agricultura Alternativa

Estudiante

Bach. Osvaldo Quesada Cabezas

Tutor

Dr. Fernando Ramírez Muñoz

Asesores

M.Sc. José Alonso Calvo Araya

M.Sc. Walter Peraza Padilla

Campus Omar Dengo
Heredia, 2024

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN GENERAL	6
Resumen	9
Introducción	11
Materiales y métodos.....	13
Localización de biotipos de <i>P. maximum</i> cv. Mombaza	13
Método de recolección de semillas, escarificación y trasplante	14
Condiciones de los experimentos bajo invernadero.....	15
Diseño y establecimiento de los experimentos	15
Evaluación de los tratamientos y procesamiento de datos	19
Resultados.....	20
Discusión	29
Conclusiones	32
Agradecimientos	34
Referencias	35

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos sin mezclas y dosis empleadas en la primera fase de la investigación sobre biotipos S-P y R de <i>P. maximum</i> cv Mombaza.	16
Cuadro 2. Tratamientos en mezclas y dosis empleadas en la primera fase de la investigación sobre biotipos S-P y R de <i>P. maximum</i> cv Mombaza	16
Cuadro 3. Dosis de diuron, ametrina, cletodim y hexazinona empleadas para determinar la respuesta de biotipos de <i>P. maximum</i> cv. Mombaza.	18
Cuadro 4. Peso fresco (14 dda) de las plantas del biotipo R tratadas con los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona (solos y en mezclas).....	20
Cuadro 5. Peso fresco (14 dda) de las plantas del biotipo S-P tratadas con los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona (solos y en mezclas).....	21
Cuadro 6. Valor de DE ₅₀ y error estándar de biotipos de <i>P. maximum</i> (R y S) al diuron, ametrina, cletodim y hexazinona provenientes de diferentes zonas de Costa Rica.....	22
Cuadro 7. Índice de resistencia (IR) de biotipos de <i>P. maximum</i> provenientes de diferentes zonas de Costa Rica.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Respuesta de biotipos de <i>P. maximum</i> a dosis crecientes de diuron en kilogramos de ingrediente activo por hectárea (14dda): a) biotipo R, b) biotipo S-C, c) biotipo S-M y d) biotipo S-P.	23
Figura 2. Respuesta de biotipos de <i>P. maximum</i> a dosis crecientes de ametrina en kilogramos de ingrediente activo por hectárea (14dda): a) biotipo R, b) biotipo S-C, c) biotipo S-M y d) biotipo S-P.	24
Figura 3. Respuesta de biotipos de <i>P. maximum</i> a dosis crecientes de cletodim en kilogramos de ingrediente activo por hectárea (14dda): a) biotipo R, b) biotipo S-C, c) biotipo S-M y d) biotipo S-P.	25
Figura 4. Respuesta de biotipos de <i>P. maximum</i> a dosis crecientes de hexazinona en kilogramos de ingrediente activo por hectárea (14dda): a) biotipo R, b) biotipo S-C, c) biotipo S-M y d) biotipo S-P.	26
Figura 5. Curva de respuesta a dosis crecientes de diuron, ametrina, cletodim y hexazinona de los biotipos R y S.	27
Figura 6. Porcentaje de daño visual 14 dda con dosis crecientes de diuron, ametrina, cletodim y hexazinona de los biotipos R y S.	28

Quesada-Cabezas et al. 2024. Respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaza a herbicidas

Respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaza a los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona (solos y en mezclas), usados en plantaciones de piña de la región Huetar Norte de Costa Rica.

Bach. Osvaldo Quesada Cabezas

Trabajo final de graduación modalidad artículo científico sometido a consideración del tribunal examinador de la Escuela de Ciencias Agrarias para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía con énfasis en Agricultura Alternativa

Quesada-Cabezas et al. 2024. Respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv.
Mombaza a herbicidas

**Trabajo final de Graduación presentado como requisito parcial para optar al grado
de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía con énfasis en Agricultura Alternativa**

Tribunal Examinador

M.Sc. Freylan Mena Torres
Representante del Decanato Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

M. Sc. Andrés Alpízar Naranjo
Director Escuela de Ciencias Agrarias

Dr. Fernando Ramírez Muñoz
Director de Tesis

M.Sc. José Alonso Calvo Araya
Asesor

M.Sc. Walter Peraza Padilla
Asesor

Bach. Osvaldo Quesada Cabezas
Sustentante

INTRODUCCIÓN GENERAL

P. maximum cv. Mombaza es un pasto perenne y cespitoso de porte alto (1,6–1,7 m de altura), con un crecimiento erecto, perteneciente a la familia de las poáceas. Su origen genético se encuentra en África, fue introducida a América en 1967 y liberado desde Brasil como pasto forrajero mejorado en 1993 (Márquez, 2014). En Costa Rica, el pasto Mombaza se utiliza principalmente como forraje en sistemas ganaderos. Sin embargo, *P. maximum* se reporta como especie de alto riesgo en Hawái y como invasora en más de 21 países, dentro de estos Costa Rica (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2017).

La familia Poaceae cuenta con diferentes especies consideradas como arvenses en diversos agroecosistemas y donde figuran como un grupo de malezas muy importantes a nivel mundial (Gámez *et al.*, 2014). En el Herbario Nacional de Costa Rica hay registradas 521 especies de poáceas de las cuales 110 son introducidas (Lobo, 2021). Asimismo, dentro de los principales géneros que presenta esta familia se encuentra *Panicum*, el cual cuenta con aproximadamente 500 especies en el mundo y 34 en Costa Rica, incluyendo *P. maximum* (Rodríguez *et al.*, 2015).

Los nueve casos reportados de malezas resistentes a herbicidas en Costa Rica (Heap, 2022), involucran cinco especies de plantas de la familia Poaceae y son resistentes a varios herbicidas en diversos cultivos o actividades: *Echinochloa colona* (L.) resistente a propanil, cihalofop butil, fenoxaprop etil, azimsulfuron, imazapyr, imazapic y bispiribac sodio en arroz; *Eleusine indica* (L.) Gaertn. y *Paspalum paniculatum* L. resistente a glifosato en plantaciones de banano, plátano, pejibaye y palmito; *Ixophorus unisetus* (J. Presl) Schldl. resistente a imazapyr en bordes de caminos y *Oryza sativa* var *sylvaticum* resistente a imazapyr e imazapic en campos de arroz.

En Costa Rica, Rodríguez *et al.*, (2015) concluyeron que biotipos de *Poa annua* L. son resistentes al herbicida cletodim. Además, Muñoz (2017) localizó la presencia de 3 biotipos de *P. paniculatum* resistentes al glifosato en la Región del Caribe del país. Asimismo, Herrera (2018) encontró plantas de *Rottboellia cochinchinensis* [Lour.] Clayton resistentes

al cletodim, fluazifop-p-butil y cyhalofop butil en el cultivo de frijol en la región Huetaar Norte.

En los últimos años se ha incrementado a nivel mundial la cantidad de biotipos de malezas resistentes a herbicidas. En 1980 habían reportadas 26 especies de hoja ancha y 6 de hoja angosta que presentaban resistencia a las triazinas; para el 2009 se encontraban registrados 332 biotipos, pertenecientes a 189 especies, resistentes a diferentes grupos de herbicidas (Valverde y Heap, 2010). Igualmente, en el 2014 se obtuvieron 432 casos de resistencia a herbicidas por sitio de acción, en 235 especies (Rodríguez *et al.*, 2015). Actualmente hay un total de 511 casos únicos de resistencia a herbicidas por sitio de acción, representados por 266 especies (153 dicotiledóneas y 113 monocotiledóneas). Estas malezas han desarrollado resistencia a 21 sitios de acción de herbicidas (Heap, 2022).

Uno de los principales grupos de herbicidas con más casos de resistencia son los inhibidores de la fotosíntesis en el fotosistema II, con un total de 87 especies resistentes. Algunos ejemplos de herbicidas con dicho modo de acción son ametrina, diuron y hexazinona (Pitty, 2018; Heap, 2022). De igual modo, el grupo de herbicidas inhibidores de la Acetil-coenzima A carboxilasa (ACCase), se encuentra dentro de los 4 grupos con más casos de resistencia en el mundo, al presentar 50 especies resistentes. Dicho modo de acción lo posee el herbicida cletodim (Rodríguez *et al.*, 2015; Heap, 2022).

Diversas investigaciones encontraron la presencia de biotipos de poáceas tales como *Lolium rigidum* Gaudin, *Avena fatua* L. y *Lolium multiflorum* Lam, resistentes a herbicidas inhibidores de la ACCase, incluyendo al cletodim para el caso de *L. multiflorum*. Esta arvense además presenta resistencia múltiple a herbicidas inhibidores de la Acetolactato Sintetasa (ALS) e inhibidores de la Sintetasa de Fosfato de Enolpiruvilo Shikimato (EPSP Sintetasa) (Espinoza y Zapata, 2000; Espinoza y Rodríguez, 2013). Para *P. maximum* cv. Mombaza actualmente no se encuentra reportado ningún caso de resistencia a herbicidas en la base de datos internacional de malezas resistentes a herbicidas (Heap, 2022), por lo que este estudio podría representar un posible primer reporte de un biotipo resistente.

Para poder cuantificar el efecto de los herbicidas en aquellos biotipos en los que se sospecha resistencia, se debe determinar el valor de la DE50 (dosis de herbicida que es capaz de reducir el crecimiento de la planta en peso fresco a la mitad en relación con el testigo sin

tratar), los cuales son calculados con base a la curva de respuesta de los biotipos a dosis crecientes del herbicida. De acuerdo con la razón de los valores de DE50 del biotipo presuntamente resistente y el presuntamente sensible se obtiene el Índice de Resistencia (IR), que si es superior a 2 se considera al biotipo evaluado como resistente (Vila-Aiub, 2021).

Jiménez, N (comunicación personal, 30 de julio de 2021) mencionó que *P. maximum* es una especie problemática en algunos sistemas productivos de piña de la región Huetar Norte de Costa Rica. Para su manejo en el cultivo, se ha empleado especialmente ametrina, diuron y cletodim, utilizándose la hexazinona como preemergente. Dichos herbicidas son utilizados para el control de malezas de hoja ancha y angosta, con excepción del cletodim, que actúa específicamente como gramínicida, todos están registrados o autorizados en el país para su uso en el cultivo de piña (Servicio Fitosanitario del Estado [SFE], 2022).

Actualmente, se presentan deficiencias en el control de esta maleza en la finca de estudio, principalmente con los primeros tres herbicidas mencionados a la dosis comercial recomendada, lo que lleva a sospechar la posible existencia de biotipos de *P. maximum* con resistencia a uno o varios de los herbicidas citados. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación será evaluar la respuesta que presenta dicho biotipo a la acción de los herbicidas.

Respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaza a los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona (solos y en mezclas), usados en plantaciones de piña de la región Huetar Norte de Costa Rica

Response of *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaza biotypes to the ametryn, diuron, clethodim and hexazinone (alone and in mixtures) herbicides, in pineapple fields in Huetar Norte region of Costa Rica

Oswaldo Quesada-Cabezas¹, Fernando Ramírez-Muñoz², José Alonso Calvo-Araya³, Walter Peraza-Padilla⁴

Resumen

Introducción. La evolución de resistencia de malezas a herbicidas se encuentra en constante aumento, lo que constituye una preocupación mundial. El grupo de herbicidas Inhibidores de la fotosíntesis en el fotosistema II lidera el segundo lugar con mayores casos de resistencia. **Objetivo.** Evaluar bajo condiciones de invernadero la respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaza a los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona a través de aplicaciones solos y en mezcla para la determinación de una posible resistencia a nivel de campo. **Materiales y métodos.** Durante octubre 2022 a diciembre 2023 se llevó a cabo un ensayo en invernadero en Barva de Heredia y en Tambor de Alajuela para evaluar la respuesta de biotipos de *P. maximum* a los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona aplicados solos y en mezcla para evaluar el índice de resistencia (IR). Los biotipos procedieron de fincas ganaderas y productoras de piña de

¹ Universidad Nacional de Costa Rica, Escuela de Ciencias Agrarias, Heredia, Costa Rica. osvaldo.quesada.cabezas@gmail.com

² Universidad Nacional, Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Apartado Postal 86-3000 framirez@una.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0003-0904-0204>).

³ Universidad Nacional, Escuela de Ciencias Agrarias, Laboratorio de Fitopatología, Heredia, Costa Rica. Apartado Postal 86-300 alonso.calvo.araya@una.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0001-7294-6426>).

⁴ Universidad Nacional, , Escuela de Ciencias Agrarias, Laboratorio de Nematología, Heredia, Costa Rica. Apartado Postal 86-3000 walter.peraza.padilla@una.cr (<https://orcid.org/0000-0003-4651-5555>).

Mombaza a herbicidas

diferentes localidades de Alajuela. A las plantas se les aplicaron dosis crecientes de los herbicidas y se evaluó el porcentaje de daño visual y su peso fresco a los 14 días después de la aplicación (dda) para calcular los valores de la DE_{50} e IR. **Resultados.** Se encontró un biotipo de *P. maximum* resistente a los herbicidas diuron y ametrina, requiriendo de 2.00 o más veces más herbicida para generar una reducción del 50% de su peso fresco con respecto al biotipo más sensible. Las mezclas que involucraron al herbicida cletodim a dosis comerciales fueron capaces de provocar la mortalidad total de las plantas del biotipo resistente. **Conclusión.** Persistir en el uso de herbicidas como ametrina y diuron, así como otros inhibidores de la fotosíntesis en el fotosistema II, podría propiciar la selección y aumento del índice de resistencia en las poblaciones de plantas menos sensibles. Esta práctica intensificaría aún más la problemática de resistencia, lo que agravaría la situación actual.

Palabras clave: resistencia, malezas, poaceae, ametrina, diuron, cletodim, hexazinona.

Abstract

Introduction. The evolution of weed resistance to herbicides is constantly increasing, which is a worldwide concern. Herbicides that inhibit Photosystem II lead the second place with the highest cases of resistance. The evolution of weed resistance to herbicides is an increasing global issue, with the group of Inhibitors of Photosystem II being the second group with the highest cases of resistance. **Objective.** To evaluate under greenhouse conditions the response of *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaza biotypes to ametryne, diuron, clethodim and hexazinone herbicides through applications alone and in mixtures to determine possible resistance in field. **Materials and methods.** The response of *P. maximum* biotypes to ametryne, diuron, clethodim and hexazinone herbicides applied alone and in mixtures under greenhouse conditions in Barva, Heredia and in Tambor, Alajuela to evaluate the resistance index (RI) during the period from October 2022 to December 2023. The biotypes came from cattle and pineapple farms in different locations of Alajuela. The plants were applied increasing doses of the herbicides and the percentage of visual damage and fresh weight 14 days after application were evaluated to calculate the DE_{50} and RI values. **Results.** One of the of *P. maximum* biotypes was resistant to diuron and ametryn herbicides, requiring 2.00 or more times more herbicide to generate a 50% reduction in fresh weight with respect to the most sensitive biotype. Mixtures involving the herbicide clethodim at commercial doses were able to cause total plant mortality of the resistant biotype. **Conclusion.** Persisting in the use to ametryn and diuron herbicides as well as other

photosynthesis inhibitors in photosystem II, could lead to selection and an increase in the rate of resistance in less sensitive plant populations. This practice would further intensify the resistance problem and aggravate the current situation.

Keywords: resistance, weeds, Poaceae, ametryn, diuron, clethodim, hexazinone.

Introducción

P. maximum cv. Mombaza es un pasto perenne y cespitoso de porte alto (1,6 –1,7 m de altura), con un crecimiento erecto, perteneciente a la familia *Poaceae*. Su centro de origen se encuentra en África, siendo introducida en el continente americano en 1967 y liberado desde Brasil como pasto forrajero mejorado en 1993 (Márquez, 2014). En Costa Rica, el pasto Mombaza se utiliza principalmente como forraje en sistemas ganaderos. Sin embargo, *P. maximum* se reporta como especie de alto riesgo en Hawái y como especie invasora en más de 21 países, dentro de estos Costa Rica (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2017).

Dentro de la familia Poaceae se encuentran diferentes especies consideradas como malas hierbas en diversos agroecosistemas y donde figuran como un grupo de arvenses muy importantes a nivel mundial (Gámez et al., 2014). En el Herbario Nacional de Costa Rica hay registradas 521 especies de poáceas de las cuales 110 son introducidas (Lobo, 2021). Asimismo, dentro de los principales géneros que presenta esta familia se encuentra *Panicum*, el cual cuenta con aproximadamente 500 especies en el mundo y 34 en Costa Rica, incluyendo *P. maximum* (Rodríguez et al., 2015).

Los nueve casos reportados de malezas resistentes a herbicidas en Costa Rica (Heap, 2024), involucran cinco especies de plantas de la familia Poacea y son resistentes a varios herbicidas en diversos cultivos o actividades: *Echinochloa colona* (L.) resistente a propanil, cihalofop butil, fenoxaprop etil, azimsulfuron, imazapyr, imazapic y bispiribac sodio en arroz; *Eleusine indica* (L.) Gaertn. y *Paspalum paniculatum* L. resistente a glifosato en plantaciones de banano, plátano, pejibaye y palmito; *Ixophorus unisetus* (J. Presl) Schltld. resistente a imazapyr en bordes de caminos y *Oryza sativa* var *sylvaticum* resistente a imazapyr e imazapic en campos de arroz.

Es conveniente diferenciar a las malezas tolerantes de las resistentes a herbicidas. La tolerancia a un herbicida es la capacidad natural hereditaria que presenta una especie para sobrevivir y reproducirse aún después de ser tratada con el ingrediente activo y que además no ha sido manipulada o sometida a selección genética para que sea tolerante. Dichas especies nunca han sido controladas efectivamente por el herbicida. Por otro lado, la resistencia es la capacidad heredable de una población o biotipo para sobrevivir y reproducirse posterior a ser expuesta a la aplicación de un herbicida en una dosis a la que normalmente la población original era sensible (Balossino, 2017).

En Costa Rica, Rodríguez et al. (2015), concluyeron que biotipos de *Poa annua* L. son resistentes al herbicida cletodim. Además, Ramírez-Muñoz (2017), localizó la presencia de tres biotipos de *P. paniculatum* resistentes al glifosato en la Región del Caribe del país. Por otra parte, Herrera (2018) encontró plantas de *Rottboellia cochinchinensis* [Lour.] Clayton resistentes al cletodim, fluazifop-p-butil y cyhalofop butil en el cultivo de frijol en la región Huetar Norte.

En los últimos años se ha incrementado a nivel mundial la cantidad de biotipos de malezas resistentes a herbicidas. En 1980 habían reportadas 26 especies de hoja ancha y 6 de hoja angosta que presentaban resistencia a las triazinas. Ya en el 2009, se encontraban registrados 332 biotipos resistentes a diferentes grupos de herbicidas pertenecientes a 189 especies (Valverde & Heap, 2010). En 2014 se documentaron 432 casos de resistencia a herbicidas por sitio de acción, en 235 especies (Rodríguez et al., 2015). Actualmente, hay un total de 530 casos únicos de resistencia a herbicidas por sitio de acción, representados por 272 especies (155 dicotiledóneas y 117 monocotiledóneas). Estas malezas han desarrollado resistencia a 21 mecanismos de acción de herbicidas (Heap, 2024).

Uno de los principales grupos de herbicidas con más casos de resistencia son los inhibidores de la fotosíntesis en el fotosistema II, con un total de 92 especies resistentes a nivel mundial. Algunos ejemplos de herbicidas con dicho modo de acción son ametrina (2-etilamino-4-isopropilamino-6-metiltio-s-atrazina), diuron (3-(3,4-diclorofenil)-1,1-dimetilurea) y hexazinona (3-ciclohexil-6-(dimetilamino)-1-metil-1,3,5-triazina-2,4 (1H, 3H)-diona) (Pitty, 2018; Heap, 2024). De igual modo, dentro del grupo de herbicidas inhibidores de la Acetil-coenzima A carboxilasa (ACCasa), uno de los 4 grupos con más casos de resistencia en el mundo (51 especies) se tiene al herbicida cletodim ((5RS)-2-[(E)-1-[(2E)-3-

Quesada-Cabezas et al. 2024. Respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv.

Mombaza a herbicidas

cloroaliloxiimino]propil]-5-[(2RS)-2-(etiltio)propil]-3-hidroxiciclohex-2-en-1-ona) (Heap, 2024; Rodríguez et al., 2015).

Diversas investigaciones encontraron la presencia de biotipos de poáceas tales como *Lolium rigidum* Gaudin, *Avena fatua* L. y *Lolium multiflorum* Lam, resistentes a herbicidas inhibidores de la ACCasa, incluyendo al cletodim para el caso de *L. multiflorum*. Esta maleza además presenta resistencia múltiple a herbicidas inhibidores de la Acetolactato Sintetasa (ALS) e inhibidores de la Enolpiruvil Shikimato Fosfato Sintetasa (EPSPS) (Espinoza & Rodríguez, 2013; Espinoza & Zapata, 2000). Para *P. maximum* cv. Mombaza actualmente no se encuentra reportado ningún caso de resistencia a herbicidas en la base de datos sobre malezas resistentes a herbicidas (Heap, 2024).

En algunos sistemas productivos de piña de la región Huetar Norte de Costa Rica, *P. maximum* es mencionada como una especie problemática (Jiménez, 2021. Comunicación personal). Para su manejo en este cultivo, se han utilizado los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona. Estos herbicidas son empleados para el control de malezas de hoja ancha y angosta, todos están registrados o autorizados en el país para su uso en el cultivo de piña (Servicio Fitosanitario del Estado [SFE], 2024).

En la finca de estudio se presentan deficiencias en el control de *P. maximum*, principalmente con la ametrina y el diuron a la dosis comercial recomendada, lo que llevó a sospechar la posible existencia de biotipos con resistencia a uno o varios de los herbicidas citados. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar bajo condiciones de invernadero la respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaza a los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona a través de aplicaciones solos y en mezcla para la determinación de una posible resistencia a nivel de campo.

Materiales y métodos

Localización de biotipos de *P. maximum* cv. Mombaza

Para determinar la respuesta de biotipos de *P. maximum* cv Mombaza a los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona, se llevaron a cabo análisis en condiciones de invernadero con plantas enteras cultivadas a partir de semillas obtenidas en fincas dedicadas a diversas actividades agrícolas y pecuarias, principalmente de plantaciones de piña (*Ananas comosus* L.), donde se han observado deficiencias en el

control químico de dicha maleza y se sospecha de resistencia a uno o varios de los herbicidas del estudio (biotipo R) y de fincas ganaderas donde la población no ha sido expuesta a los herbicidas en cuestión (biotipos S).

Las semillas del biotipo presuntamente resistente se recolectaron en la finca El Concho, ubicada en El Concho de Pocosol, San Carlos, Alajuela, donde la población ha sido constantemente expuesta por más de cinco años a los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona, generalmente aplicados en mezcla. Para el caso de los biotipos presuntamente sensibles, se recolectaron de dos fincas dedicadas a la ganadería: una ubicada en San Miguel de Alajuela (biotipo S-M) y otra localizada en El Concho de Pocosol, Alajuela (biotipo S-C). El tercer biotipo (biotipo S-P) fue obtenido a través de semilla comercial adquirida en Insumos Agrogan S.A., ubicado en Pital, San Carlos, Alajuela.

Método de recolección de semillas, escarificación y trasplante

Las recolectas se realizaron manualmente de plantas con inflorescencias maduras en etapa de desprendimiento de las semillas. Para el caso del biotipo presuntamente resistente se marcó con cintas amarillas un total de 8 cepas dentro del cultivo de piña, de la población sobreviviente a la aplicación de herbicidas y se cosechó semilla cada semana durante dos meses hasta obtener una cantidad suficiente para los experimentos. Las semillas de los biotipos S-M y S-C se cosecharon una única vez de plantas con inflorescencias maduras en las fincas respectivas hasta completar una cantidad semejante de semillas a las del biotipo R.

Las semillas se colocaron en bolsas de papel, se etiquetaron y se llevaron al Laboratorio de Recursos Fitogenéticos de la Universidad Nacional, (UNA) ubicada en Heredia, Costa Rica, para su limpieza y escarificación. La escarificación se realizó sometiendo a las semillas en un horno a temperaturas constantes de 35°C durante 16 horas. Posteriormente, fueron colocadas en bandejas con una mezcla comercial de sustrato de crecimiento (marca Pindstrup, Dinamarca) y suelo (Ultisol) obtenido de la finca El Concho (50/50) bajo un invernadero protegido con malla anti áfidos, techo de plástico transparente y riego aplicado 2 veces al día.

Una vez que las plántulas alcanzaron al menos 3 hojas verdaderas, se trasplantaron en macetas con un volumen de 100 dm³ llenas con la misma mezcla empleada en las bandejas, trasplantando 2 plantas por maceta. El suelo utilizado para las macetas fue suplementado con fertilizante químico granulado 10-30-10 a razón de 2g por maceta.

Dichas plántulas crecieron en un invernadero protegido por malla anti áfidos y techo plástico transparente, riego aplicado dos veces al día, luz natural cerca de 12 horas y temperatura diarias promedio de 30° C.

Condiciones de los experimentos bajo invernadero

La investigación se llevó a cabo en 2 fases. La primera consistió en la realización de pruebas preliminares de eficacia biológica y sinergia de los herbicidas aplicados al biotipo R y biotipo S-P en invernaderos de la Finca Experimental Santa Lucía (FESL), de la Escuela de Ciencias Agrarias (ECA) Universidad Nacional, ubicada en Santa Lucía de Barva, Heredia (10°01'19"N 84°06'43"W). Esta finca se encuentra a una altitud de 1 159 msnm, con temperaturas entre 15°C y 25°C y precipitaciones anuales media de aproximadamente 2 854 mm (Municipalidad de Barva, 2014). El propósito de esta fase fue determinar la secuencia de dosis a usar de cada herbicida en los experimentos finales.

La segunda fase se basó en las pruebas de evaluación de la respuesta de todos los biotipos a los diferentes herbicidas, ejecutadas en invernaderos de la empresa IDEA tropical (Investigación y Desarrollo en Agricultura Tropical), ubicada en Tambor de Alajuela. (10°02'29.0"N 84°14'11.5"W), a una altitud de 968 msnm, con temperaturas entre 15°C y 30°C y precipitación anual media de aproximadamente 2 699 mm (Estación meteorológica de Fabio Baudrit, UCR, 2024).

Diseño y establecimiento de los experimentos

En la primera fase, para evaluar la eficacia biológica y presencia de sinergia entre los herbicidas se tuvieron 12 tratamientos: Ametrina (T1), Diuron (T2), Hexazinona (T3), Cletodim (T4), Ametrina + Diuron (T5), Ametrina + Hexazinona (T6), Ametrina + Cletodim (T7), Diuron + Hexazinona (T8), Diuron + Cletodim (T9), Hexazinona + Cletodim (T10), Ametrina + Diuron + Cletodim (T11) y Ametrina + Diuron + Hexazinona (T12); cada tratamiento consistió de 2 dosis con 4 repeticiones para cada biotipo (R y S-P), los cuales estuvieron dispuestos en un diseño experimental de bloques completos, cada bloque contó con 2 testigos sin tratar, las plantas de cada bloque tuvieron un desarrollo similar.

Las plantas se trataron cuando contaban con al menos 5 hojas verdaderas y fueron asperjadas una única vez. Se utilizó una dilución de una formulación comercial de los herbicidas con un equipo portátil calibrado para descargar 200 L/ha a través de una boquilla

de abanico plano 8002 (Sprayer Systems) sostenida a una altura de 50 cm sobre las plantas. Las dosis respectivas de cada tratamiento se indican en el cuadro 1 y 2.

Cuadro 1. Tratamientos sin mezclas y dosis empleadas en la primera fase de la investigación sobre biotipos S-P y R de *P. maximum* cv Mombaza.

Table 1. Treatments without mixtures and doses used in the first part of research on S-P and R biotypes of *P. maximum* cv Mombaza.

Tratamiento	Biotipo S-P		Biotipo R	
	g i.a.*ha ⁻¹	Kg o L p.c.**ha ⁻¹	g i.a.*ha ⁻¹	Kg o L p.c.**ha ⁻¹
Ametrina (T1)	500	0.63	2000	2.50
	250	0.31	1000	1.25
Diuron (T2)	400	0.50	1600	2
	200	0.25	800	1
Hexazinona (T3)	187.50	0.25	750	1
	93.75	0.13	375	0.50
Cletodim (T4)	52.5	0.44	210	1.75
	26.25	0.22	105	0.88

*g.i.a = Gramos de ingrediente activo. / *g.i.a = Grams of active ingredient

**p.c. = Producto comercial formulado. / **p.c. = Commercial formulated product.

Cuadro 2. Tratamientos en mezclas y dosis empleadas en la primera fase de la investigación sobre biotipos S-P y R de *P. maximum* cv Mombaza

Table 2. Treatments in mixtures and doses used in the first phase of research on S-P and R biotypes of *P. maximum* cv Mombaza.

Tratamiento	Biotipo S-P		Biotipo R	
	g i.a.*ha ⁻¹	Kg o L p.c.**ha ⁻¹	g i.a.*ha ⁻¹	Kg o L p.c.**ha ⁻¹
Ametrina + Diuron (T5)	500 + 400	0.63 + 0.50	2000 + 1600	2.5 + 2

Quesada-Cabezas et al. 2024. Respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaza a herbicidas

	250 + 200	0.31 + 0.25	1000 + 800	1.25 + 1
Ametrina + Hexazinona (T6)	500 + 187.50	0.63 + 0.25	2000 + 750	2.5 + 1
	250 + 93.75	0.31 + 0.13	1000 + 375	1.25 + 0.50
Ametrina + Cletodim (T7)	500 + 52.50	0.63 + 0.44	2000 + 210	2.5 + 1.75
	250 + 26.25	0.31 + 0.22	1000 + 105	1.25 + 0.88
Diuron + Hexazinona (T8)	400 + 187.50	0.50 + 0.25	1600 + 750	2 + 1
	200 + 93.75	0.25 + 0.13	800 + 375	1 + 0.50
Diuron + Cletodim (T9)	400 + 52.50	0.5 + 0.44	1600 + 210	2 + 1.75
	200 + 26.25	0.25 + 0.22	800 + 105	1 + 0.88
Hexazinona + Cletodim (T10)	187.50 + 52.50	0.25 + 0.44	750 + 210	1 + 1.75
	93.75 + 26.25	0.13 + 0.22	375 + 105	0.50 + 0.88
Ametrina + Diuron + Cletodim (T11)	500 + 400 + 52.50	0.63 + 0.50 + 0.44	2000 + 1600 + 210	2.5 + 2 + 1.75
	250 + 200 + 26.25	0.31 + 0.25 + 0.22	1000 + 800 + 105	1.25 + 1 + 0.88
Ametrina + Diuron + Hexazinona (T12)	500 + 400 + 187.50	1 + 0.5 + 0.25	2000 + 1600 + 750	2.5 + 2 + 1
	250 + 200 + 93.75	0.31 + 0.25 + 0.13	1000 + 800 + 375	1.25 + 1 + 0.50

*g.i.a = Gramos de ingrediente activo. / *g.i.a = Grams of active ingredient

**p.c. = Producto comercial formulado. / **p.c. = Commercial formulated product.

En la fase final de la investigación, se realizaron 4 experimentos: ametrina (Exp. 1), diuron (Exp. 2), hexazinona (Exp. 3) y cletodim (Exp. 4) para cada uno de los biotipos (R, S-C, S-M y S-P). Cada experimento consistió en 8 dosis y 2 testigos sin tratar, para un total de 10 macetas por repetición (Cuadro 3) dispuestas en un diseño experimental de bloques completos con 4 repeticiones, cada experimento se repitió al menos una vez.

Mombaza a herbicidas

Cuadro 3. Dosis de diuron, ametrina, cletodim y hexazinona empleadas para determinar la respuesta de biotipos de *P. maximum* cv. Mombaza.

Table 3. Doses of diuron, ametryn, clethodim and hexazinone used to determine the response of biotypes of *P. maximum* cv. Mombaza.

Tratamiento	Biotipos S		Biotipo R	
	Dosis diuron			
	g i.a.*ha ⁻¹	Kg o L p.c.**ha ⁻¹	g i.a.*ha ⁻¹	Kg o L p.c.**ha ⁻¹
Testigos	0	0	0	0
1	200	0.25	800	1.00
2	400	0.50	1600	2.00
3	800	1.00	2400	3.00
4	1600	2.00	3200	4.00
5	2400	3.00	4000	5.00
6	3200	4.00	5000	6.25
7	4000	5.00	6000	7.50
8	5000	6.25	8000	10.00
Dosis ametrina				
Testigos	0	0	0	0
1	100	0.13	400	0.50
2	200	0.25	800	1.00
3	400	0.50	1200	1.50
4	800	1.00	1600	2.00
5	1200	1.50	2000	2.50
6	1600	2.00	3000	3.75
7	2000	2.50	4000	5.00
8	3000	3.75	6000	7.50
Dosis cletodim				
Testigos	0	0	0	0
1	6	0.05	6	0.05
2	12	0.10	12	0.10
3	24	0.20	24	0.20
4	32	0.26	32	0.26
5	40	0.33	40	0.33
6	48	0.40	48	0.40
7	60	0.50	60	0.50
8	72	0.60	72	0.60
Dosis hexazinona				
Testigos	0	0	0	0
1	75	0.10	75	0.10
2	150	0.20	150	0.20
3	250	0.33	250	0.33
4	300	0.40	300	0.40
5	350	0.46	350	0.46
6	400	0.53	400	0.53

Mombaza a herbicidas

7	450	0.60	450	0.60
8	600	0.80	600	0.80

*g.i.a = Gramos de ingrediente activo. / *g.i.a = Grams of active ingredient

**p.c. = Producto comercial formulado. / **p.c. = Commercial formulated product.

Para el caso del biotipo proveniente de la finca piñera (biotipo R), se realizaron adicionalmente 3 tratamientos que involucraban mezclas: Diuron + Hexazinona (T5), Ametrina + Diuron + Cletodim (T6) y Ametrina + Diuron + Hexazinona (T7), a las dosis mayores utilizadas en la fase 1 (Cuadro 2).

Las macetas se trasladaron y las plantas se asperjaron una sola vez en una cámara de aspersión calibrada para descargar 200L/ha con una presión de 44 PSI a través de una boquilla 8002 a una altura de 50 cm. Una vez que el follaje tratado se secó, las macetas se colocaron nuevamente en el invernadero.

Evaluación de los tratamientos y procesamiento de datos

Cada experimento se evaluó mediante la comparación visual del daño entre la planta aplicada y el testigo correspondiente de cada bloque, estimando el porcentaje de daño foliar a los 14 días después de la aplicación (dda). La escala fluctuó entre 0, indicando la ausencia de daño (plantas con crecimiento y condiciones iguales a su testigo sin tratar), y 100, que representa la muerte completa de la planta (ausencia de tejido vivo).

Las plantas se cosecharon a los 14 dda, se cortaron a 0.5 cm de la superficie del suelo y se determinó su peso fresco para obtener el valor de la DE₅₀, la cual hace referencia a la dosis de herbicida que es capaz de reducir el crecimiento de la planta en peso fresco a la mitad en relación con el testigo sin tratar. Asimismo, las macetas cosechadas continuaron recibiendo el riego diario durante 2 semanas para observar la aparición o no de rebrotes.

Los valores de la DE₅₀ se calcularon con base a la curva de respuesta a dosis crecientes utilizando R, con el paquete estadístico drc, que aplica un modelo log logístico mencionado por Seefeldt et al. (1995), el cual emplea la siguiente ecuación para denotar la biomasa en peso fresco en comparación con el testigo y la dosis "X" del herbicida.

$$U_{ij} = C_i + \frac{D - C_i}{1 + \exp[b_i (\log(z_j) - \log(RC_{50}(i)))]}$$

Siendo U_{ij} la respuesta a la dosis j del herbicida i; D refiriéndose al límite superior del crecimiento de las plantas a la concentración cero de herbicida (testigo), C_i como límite

inferior a la dosis más elevada del herbicida i y b i como la pendiente de la curva de respuesta cerca de la DE₅₀ (i). Los valores están denotados como gramos de ingrediente activo de los herbicidas. El Índice de Resistencia (IR) se calculó como la razón de los valores de DE₅₀ del biotipo R y biotipo S, considerándose el biotipo evaluado como resistente si su valor IR es superior a 2 estadísticamente de acuerdo con su intervalo de confianza.

Resultados

En la investigación de la primera fase para el biotipo R, se obtuvo que al someterlo a la mezcla de diuron + hexazinona a dosis comerciales de 1600 y 750 gramos de i.a.ha⁻¹ respectivamente (T8), mostró un peso fresco superior en comparación con la aplicación de hexazinona sola (T3). Este hallazgo sugiere que la eficacia de la hexazinona podría disminuir cuando se combina con diuron en las dosis recomendadas para el control del biotipo R de *P. maximum* cv. Mombaza. Por otro lado, cualquier mezcla que involucre cletodim logra la ausencia de tejido vivo en la planta (Cuadro 4).

Cuadro 4. Peso fresco (14 dda) de las plantas del biotipo R tratadas con los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona (solos y en mezclas).

Table 4. Fresh weight (14 dda) of biotype R plants treated with the herbicides ametryn, diuron, clethodim and hexazinone (alone and in mixtures).

Tratamiento	Biotipo R			
	Dosis (g i.a.*ha ⁻¹)	Peso fresco	Dosis (g i.a.*ha ⁻¹)	Peso fresco
T0A	0	39.7 ± 3.76	0	45.6 ± 1.38
T0B	0	33.4 ± 3.11	0	46.1 ± 3.33
1-Ametrina	1000	25.5 ± 2.69	2000	28.6 ± 3.31
2-Diuron	800	30.9 ± 6.02	1600	43.8 ± 1.46
3-Hexazinona	375	26.8 ± 2.09	750	0.8 ± 0.10
4-Cletodim	105	1.9 ± 0.17	210	3.1 ± 0.51
5-Ametrina + Diuron	1000 + 800	23.5 ± 4.03	2000 + 1600	13.7 ± 4.55
6-Ametrina+Hexazinon	1000 + 375	24.0 ± 1.58	2000 + 750	3.6 ± 2.16
7-Ametrina + Cletodim	1000 + 105	1.5 ± 0.13	2000 + 210	0.8 ± 0.08
8-Diuron + Hexazinona	800 + 375	18.7 ± 3.7	1600 + 750	19.9 ± 4.7
9-Diuron + Cletodim	800 + 105	2.2 ± 0.32	1600 + 210	0.7 ± 0.06

Mombaza a herbicidas

10-Hexazinona + Cletodim	375 + 105	0.6 ± 0.09	750 + 210	0.7 ± 0.08
11-Ametrina + Diuron + Cletodim	1000 + 800 + 105	1.4 ± 0.35	2000 + 1600 + 210	1.0 ± 0.28
12-Ametrina + Diuron + Hexazinona	1000 + 800 + 375	3.5 ± 2.06	2000 + 1600 + 750	7.7 ± 2.54

*g.i.a = Gramos de ingrediente activo. / *g.i.a = Grams of active ingredient

Cada valor está seguido de su respectivo intervalo de confianza

Para el caso del biotipo S-P, no hubo una pérdida de eficacia de la hexazinona cuando se mezcla con diuron en relación con su aplicación sola (Cuadro 5). Sin embargo, cabe mencionar que las dosis utilizadas en el biotipo S-P fueron inferiores a las empleadas para el biotipo R. A pesar de lo anterior, el cletodim y cualquier mezcla que incluye cletodim fue capaz de reducir el peso fresco de las plantas a menos de 2.8 gramos 14 dda.

Cuadro 5. Peso fresco (14 dda) de las plantas del biotipo S-P tratadas con los herbicidas ametrina, diuron, cletodim y hexazinona (solos y en mezclas).

Table 5. Fresh weight (14 dda) of biotype S-P plants treated with the herbicides ametryn, diuron, clethodim and hexazinone (alone and in mixtures).

Tratamiento	Biotipo S-P			
	Dosis (g i.a.*ha ⁻¹)	Peso fresco	Dosis (g i.a.*ha ⁻¹)	Peso fresco
T0A	0	28.9 ± 2.01	0	36.7 ± 3.5
T0B	0	29.9 ± 2.17	0	36.3 ± 3.9
1-Ametrina	250	21.1 ± 0.55	500	24.1 ± 2.15
2-Diuron	200	28.8 ± 4.17	400	29.0 ± 3.56
3-Hexazinona	93.75	19.2 ± 1.21	187.50	20.4 ± 2.36
4-Cletodim	26.25	1.6 ± 0.29	52.5	1.6 ± 0.44
5-Ametrina + Diuron	250 + 200	25.9 ± 3.22	500 + 400	18.4 ± 4.24
6-Ametrina+Hexazinon	250 + 93.75	14.7 ± 4.19	500 + 187.50	5.7 ± 3.27
7-Ametrina + Cletodim	250 + 26.25	2.8 ± 0.75	500 + 52.50	1.5 ± 0.50
8-Diuron + Hexazinona	200 + 93.75	19.8 ± 1.90	400 + 187.50	14.3 ± 3.41
9-Diuron + Cletodim	200 + 26.25	1.1 ± 0.05	400 + 52.50	1.8 ± 0.23
10-Hexazinona + Cletodim	93.75 + 26.25	0.3 ± 0.08	187.50 + 52.50	0.4 ± 0.03
11-Ametrina + Diuron + Cletodim	250 + 200 + 26.25	1.6 ± 0.26	500 + 400 + 52.50	0.4 ± 0.04
12-Ametrina + Diuron + Hexazinona	250 + 200 + 93.75	12.0 ± 1.82	500 + 400 + 187.50	4.2 ± 2.23

*g.i.a = Gramos de ingrediente activo. / *g.i.a = Grams of active ingredient

Cada valor está seguido de su respectivo intervalo de confianza

Respecto a la fase 2 de la investigación, se muestran los valores de DE_{50} de los biotipos R y S evaluados en litros o kilogramos de p.c./ha⁻¹ y en gramos de i.a./ha⁻¹ de los herbicidas utilizados. Para el biotipo R, la DE_{50} al herbicida diuron es de 6.79 kg p.c./ha, mientras que para el más sensible (biotipos S-P) es de 2.55 kg p.c./ha (Cuadro 6). Por lo tanto, para reducir el peso fresco al 50%, el biotipo R requiere 2.6 veces más herbicida que el biotipo S-P, 2.3 veces más respecto al biotipo S-M y 1.71 veces más que el biotipo S-C.

Para el herbicida ametrina, la DE_{50} del biotipo R corresponde a 4.73 kg p.c./ha, para el biotipo S-P es de 2.31 kg p.c./ha⁻¹, el biotipo S-M de 2.60 kg p.c./ha⁻¹ y el biotipo S-C de 2.63 kg p.c./ha⁻¹. Esto significa que se requiere entre 1.80 y 2.05 veces más herbicida en el biotipo R para causar una reducción del 50% en el peso fresco respecto a los biotipos sensibles. Por otro lado, todos los biotipos demostraron ser igual de sensibles a los herbicidas cletodim y hexazinona.

Cuadro 6. Valor de DE_{50} y error estándar de biotipos de *P. maximum* (R y S) al diuron, ametrina, cletodim y hexazinona provenientes de diferentes zonas de Costa Rica.

Table 6. ED_{50} value and standard error of *P. maximum* biotypes (R and S) to diuron, ametrine, clethodim and hexazinone from different areas of Costa Rica.

Herbicida	Biotipo	DE_{50} (g i.a* ha ⁻¹)	Kg o L de p.c.**ha ⁻¹
Diuron (80 WP)	R	5430.06 ± 526.54	6.79 ± 0.66
	S-C	3168.04 ± 259.48	3.96 ± 0.32
	S-M	2360.16 ± 325.09	2.95 ± 0.41
	S-P	2043.26 ± 365.61	2.55 ± 0.46
Ametrina (80 WG)	R	3782.92 ± 415.11	4.73 ± 0.52
	S-C	2103.24 ± 221.39	2.63 ± 0.28
	S-M	2079.51 ± 207.99	2.60 ± 0.26
	S-P	1844.92 ± 230.16	2.31 ± 0.29
Cletodim (12 EC)	R	86.16 ± 45.50	0.72 ± 0.38
	S-C	87.31 ± 43.32	0.73 ± 0.36
	S-M	84.44 ± 42.67	0.70 ± 0.36
	S-P	90.22 ± 48.19	0.75 ± 0.40
Hexazinona (75 WP)	R	322.82 ± 7.78	2.69 ± 0.06
	S-C	329.12 ± 7.47	2.74 ± 0.06

Quesada-Cabezas et al. 2024. Respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv.
Mombaza a herbicidas

S-M	333.55 ± 6.92	2.78 ± 0.06
S-P	333.03 ± 7.35	2.78 ± 0.06

*g.i.a = Gramos de ingrediente activo. / *g.i.a = Grams of active ingredient

**p.c. = Producto comercial formulado. / **p.c. = Commercial formulated product.

Cada valor está seguido de su respectivo intervalo de confianza

En la siguiente figura se muestra la respuesta a dosis crecientes de diuron en plantas de los biotipos R y S. Se puede observar que a los 14 dda, la dosis de 3.2 kg.i.a.ha⁻¹ (4 kg p.c.ha⁻¹) produce la muerte total de la planta del biotipo S-P, mientras que para ver el mismo efecto en el biotipo R se requiere de una dosis de 8.0 kg.i.a.ha⁻¹ (10 kg p.c.ha⁻¹) (Figura 1).

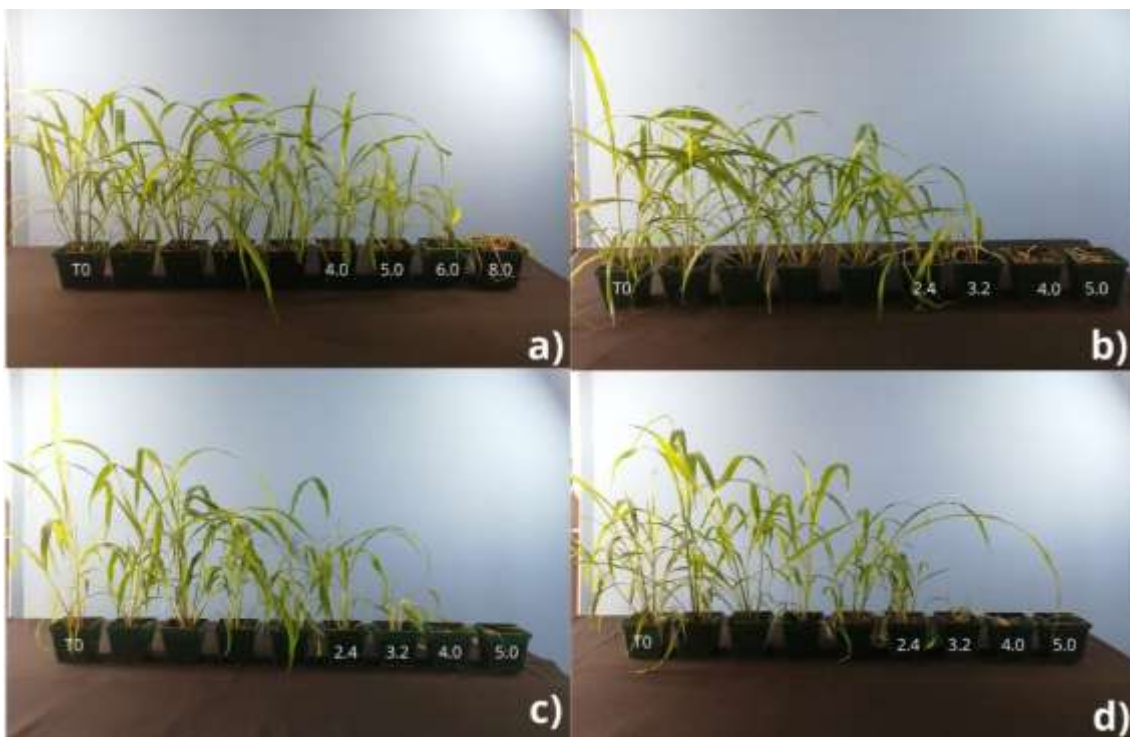


Figura 1. Respuesta de biotipos de *P. maximum* a dosis crecientes de diuron en kilogramos de ingrediente activo por hectárea (14dda): a) biotipo R, b) biotipo S-C, c) biotipo S-M y d) biotipo S-P.

Figure 1. Response of *P. maximum* biotypes to increasing doses of diuron in kilograms of active ingredient per hectare (14dda): a) biotype R, b) biotype S-C, c) biotype S-M and d) biotype S-P.

Para el caso del herbicida ametrina, la dosis de 2.0 kg.i.a.ha⁻¹ (2.5 kg p.c.ha⁻¹) ocasiona la ausencia de tejido vivo de la planta del biotipo S-M y S-P, mientras que el mismo efecto se observa en el biotipo R a una dosis de 6.0 kg.i.a.ha⁻¹ (7.5 kg p.c.ha⁻¹) (Figura 2).

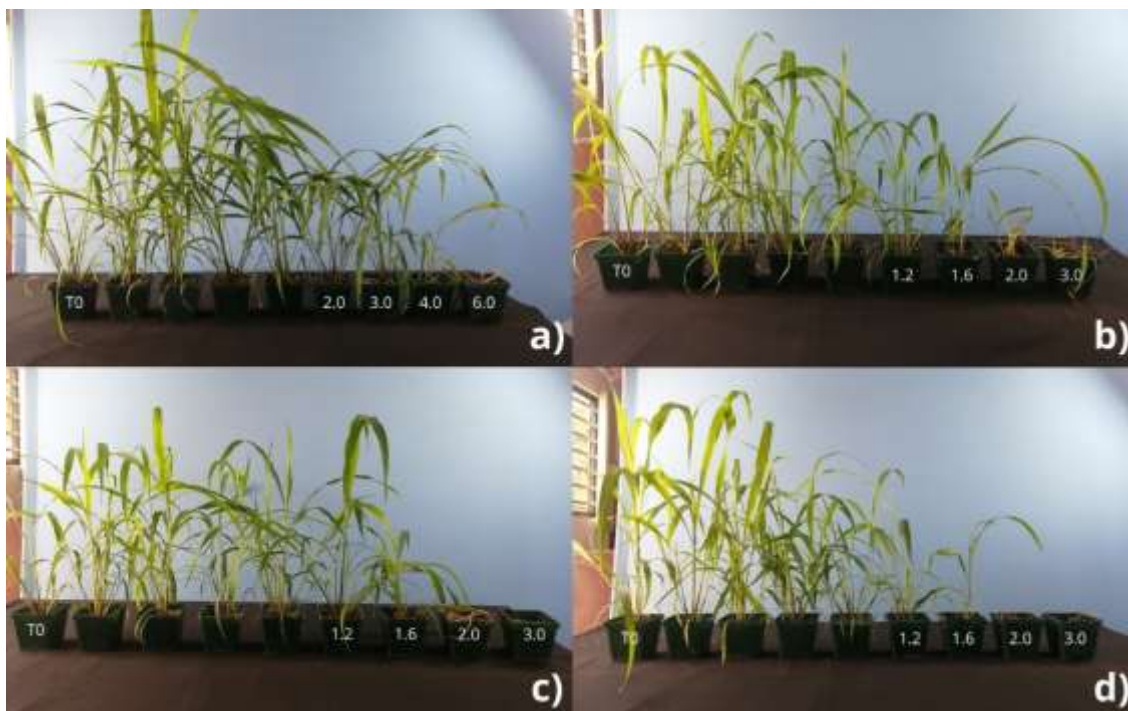


Figura 2. Respuesta de biotipos de *P. maximum* a dosis crecientes de ametrina en kilogramos de ingrediente activo por hectárea (14dda): a) biotipo R, b) biotipo S-C, c) biotipo S-M y d) biotipo S-P.

Figure 2. Response of *P. maximum* biotypes to increasing doses of ametryn in kilograms of active ingredient per hectare (14dda): a) biotype R, b) biotype S-C, c) biotype S-M and d) biotype S-P.

La respuesta a dosis crecientes de cletodim en las plantas de cada biotipo fue muy similar. Con 0.072 kg.i.a.ha⁻¹ (0.60 L p.c.ha⁻¹) se logra la muerte total de las plantas, independientemente del biotipo evaluado (Figura 3).

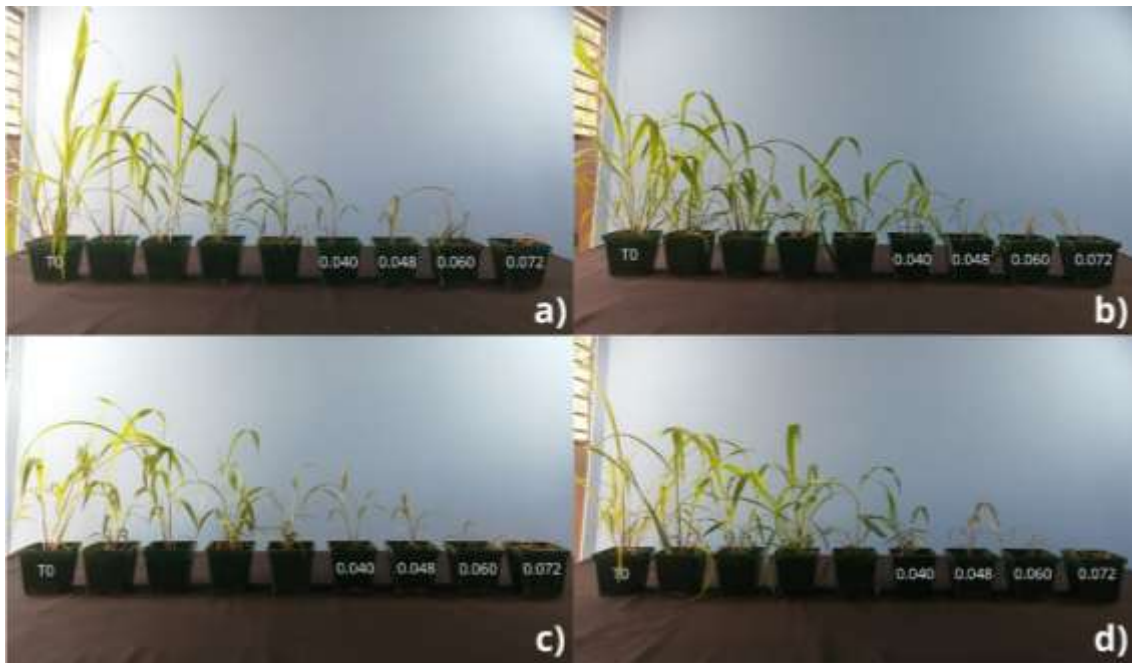


Figura 3. Respuesta de biotipos de *P. maximum* a dosis crecientes de cletodim en kilogramos de ingrediente activo por hectárea (14dda): a) biotipo R, b) biotipo S-C, c) biotipo S-M y d) biotipo S-P.

Figure 3. Response of *P. maximum* biotypes to increasing doses of clethodim in kilograms of active ingredient per hectare (14dda): a) biotype R, b) biotype S-C, c) biotype S-M and d) biotype S-P.

Al igual que el herbicida cletodim, los biotipos mostraron ser semejantemente sensibles al herbicida hexazinona. A los 14 dda, la dosis de $0.40 \text{ kg.i.a.ha}^{-1}$ ($0.53 \text{ kg p.c.ha}^{-1}$) produce la muerte total de las plantas de cada biotipo (Figura 4).

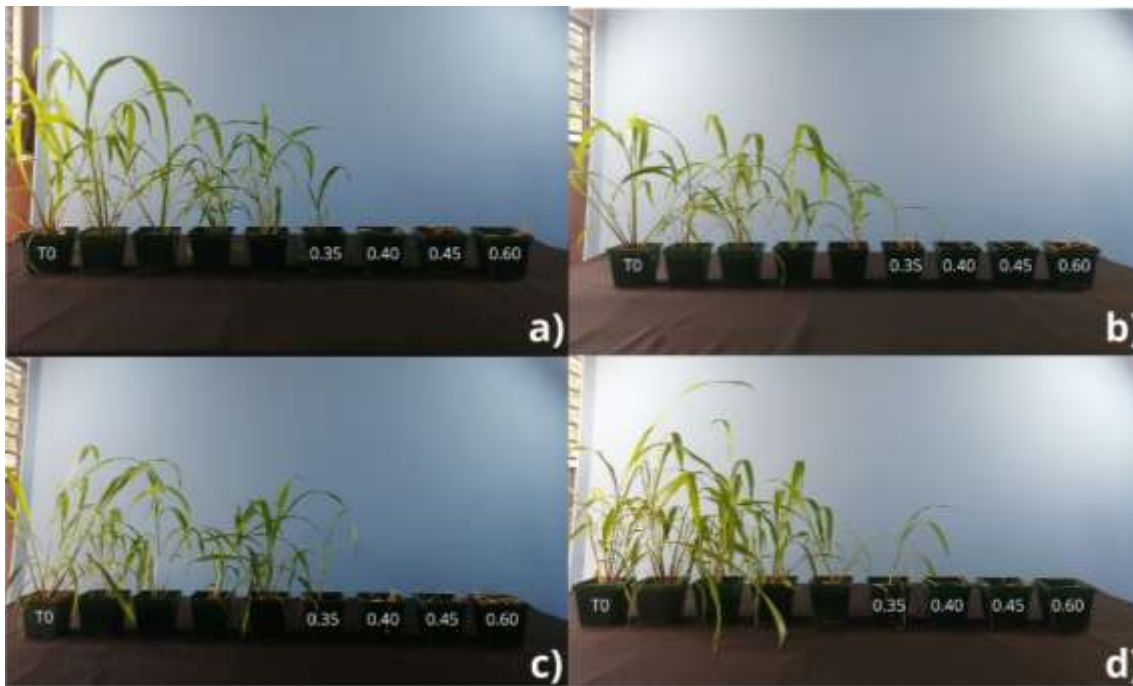


Figura 4. Respuesta de biotipos de *P. maximum* a dosis crecientes de hexazinona en kilogramos de ingrediente activo por hectárea (14dda): a) biotipo R, b) biotipo S-C, c) biotipo S-M y d) biotipo S-P.

Figure 4. Response of *P. maximum* biotypes to increasing doses of hexazinone in kilograms of active ingredient per hectare (14dda): a) biotype R, b) biotype S-C, c) biotype S-M and d) biotype S-P.

Las curvas de respuesta (DE_{50}) a los 14 dda con los valores promedios de peso fresco por biotipo de varios experimentos se muestran en la figura 5. La exposición a dosis crecientes de los herbicidas mostró una diferencia en el crecimiento, medido como peso fresco, entre los biotipos expuestos. El crecimiento de los biotipos S fue disminuido con concentraciones menores de diurón y ametrica en comparación con el biotipo R. En cambio, el efecto de hexazinona y cletodim fue similar para todos los biotipos.

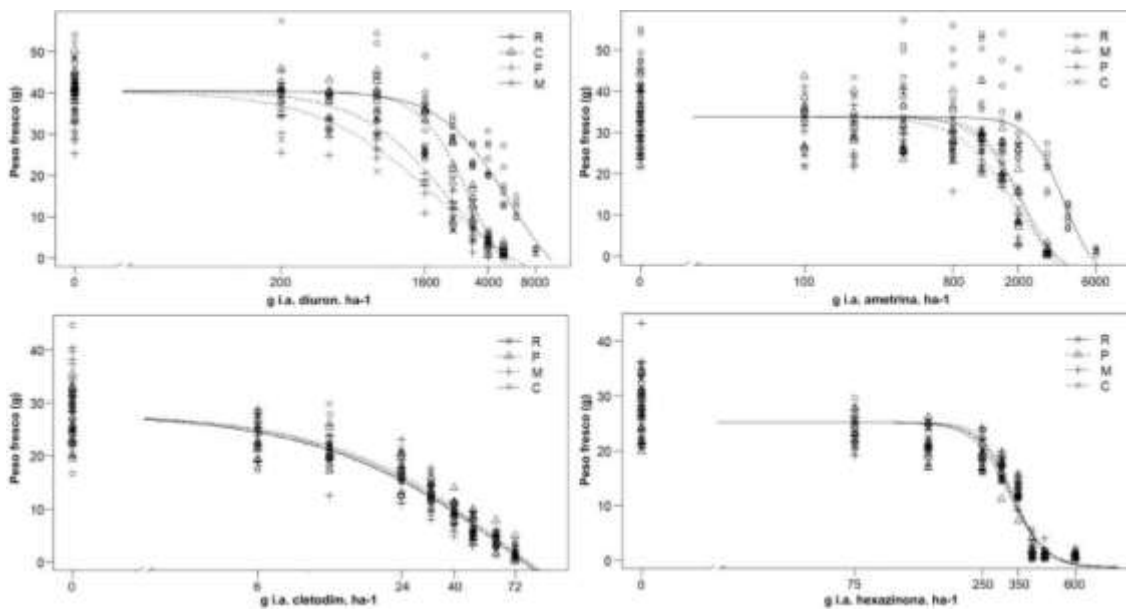


Figura 5. Curva de respuesta a dosis crecientes de diuron, ametrina, cletodim y hexazinona de los biotipos R y S.

Figure 5. Response curve to increasing doses of diuron, ametryn, clethodim and hexazinone of R and S biotypes.

Las plantas de los biotipos sensibles evaluados 14 dda requieren entre 1.6 y 3.2 kg.i.a.ha⁻¹ de diuron para alcanzar un 60% de daño visual con respecto a su testigo, mientras que las plantas del biotipo R necesitan de 5.0 kg.i.a.ha⁻¹ en la misma fecha de evaluación para alcanzar un nivel semejante de daño (Figura 6). Para el caso de la ametrina, con 2.0 kg.i.a.ha⁻¹ los biotipos sensibles alcanzan un 60% de daño visual, mientras que en el biotipo R se logra con 3.0 kg.i.a.ha⁻¹ a 4.0 kg.i.a.ha⁻¹. Todos los biotipos alcanzan un 60% de daño visual con respecto a su testigo a dosis de 0.032 kg.i.a.ha⁻¹ de cletodim y 0.35 kg.i.a.ha⁻¹ de hexazinona (Figura 6).

Quesada-Cabezas et al. 2024. Respuesta de biotipos de *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaza a herbicidas

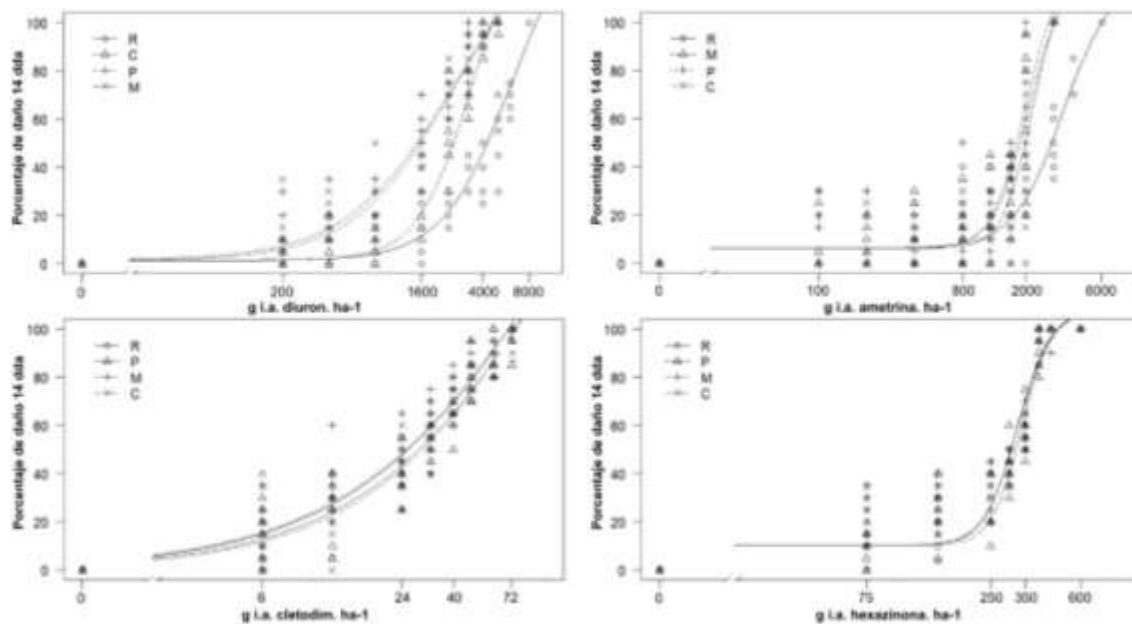


Figura 6. Porcentaje de daño visual 14 dda con dosis crecientes de diuron, ametrina, cletodim y hexazinona de los biotipos R y S.

Figure 6. Percentage of visual damage 14 dda with increasing doses of diuron, ametryn, clethodim and hexazinone of R and S biotypes.

Respecto a los índices de resistencia entre biotipos R y S, al momento de comparar el biotipo más resistente (R) con el más sensible (S-P) se observa con el herbicida diuron un valor de 2.66, y para la ametrina de 2.05, lo que supera el umbral mínimo de 2.00 para declarar resistencia (Cuadro 7).

Cuadro 7. Índice de resistencia (IR) de biotipos de *P. maximum* provenientes de diferentes zonas de Costa Rica.

Table 7. Resistance index (RI) of *P. maximum* biotypes from different areas of Costa Rica.

Diuron	Biotipo R	Ametrina	Biotipo R
Biotipo S-P	2.66	Biotipo S-P	2.05
Biotipo S-M	2.30	Biotipo S-M	1.82
Biotipo S-C	1.71	Biotipo S-C	1.80
Cletodim	Biotipo R	Hexazinona	Biotipo R

Mombaza a herbicidas

Biotipo S-P	0.95	Biotipo S-P	0.97
Biotipo S-M	1.02	Biotipo S-M	0.97
Biotipo S-C	0.99	Biotipo S-C	0.98

IR: (DE₅₀ R/DE₅₀ S)

Cabe mencionar que las plantas de *P. maximum* de los biotipos S no fueron capaces de producir rebrotes después de ser tratadas con diuron a dosis de 3.2 kg.i.a.ha⁻¹ o superior, mientras que las plantas del biotipo R sometidas a las misma dosis y condiciones presentaron un promedio de 3.13 rebrotes. El biotipo R no presentó rebrotes a dosis por encima de los 6.0 kg.i.a.ha⁻¹.

En cuanto al herbicida ametrina, los biotipos susceptibles no produjeron rebrotes a dosis iguales o superiores a los 2.0 kg.i.a.ha⁻¹, por su parte, el biotipo R fue capaz de producir un promedio de 4.63 rebrotes a los 2.0 kg.i.a.ha⁻¹ El biotipo R no presentó rebrotes a la dosis de 6.0 kg.i.a.ha⁻¹.

Para el caso del cletodim, ningún biotipo fue capaz de producir rebrotes a dosis por encima de los 0.048 kg.i.a.ha⁻¹. Lo mismo para la hexazinona a dosis iguales o superiores a los 0.40 kg.i.a.ha⁻¹.

Por otro lado, los 3 tratamientos adicionales para el biotipo R que involucraron mezclas: (diuron + hexazinona; ametrina + diuron + cletodim y ametrina + diuron + hexazinona) fueron capaces de reducir a menos de 2.0 gramos el peso fresco de las plantas a los 14 dda, generando la ausencia total de tejido vivo y la incapacidad de producir rebrotes.

Discusión

En el cultivo convencional de piña en Costa Rica, el manejo de malezas se hace principalmente con métodos de control químico y rara vez se utiliza otro tipo de procedimiento. La aplicación constante de un mismo principio activo (o principios activos con un mismo mecanismo de acción) en conjunto con carentes tácticas que diversifiquen las estrategias de control pueden conducir a la selección de poblaciones resistentes (Beckie, 2020). En Costa Rica el grupo de herbicidas inhibidores de la fotosíntesis se ha utilizado en el cultivo de piña por décadas, con frecuencias de hasta 3 aplicaciones anuales (Segura, 2015).

En la finca con problemas de control de *P. maximum*, es común la aplicación constante de los herbicidas ametrina, diuron, hexazinona y cletodim, de los cuales los primeros 3 poseen un mismo sitio de acción (inhibición de la proteína D1 del fotosistema II).

Las aplicaciones de estos herbicidas van de 2 a 4 veces por año, realizadas desde hace más de 6 años.

Los problemas de control empezaron a aparecer en el 2021 (Luna, L; comunicación personal, 14 de octubre de 2021) por lo que se acudió a otras estrategias de control (extracción manual) a aquellas plantas sobrevivientes a la aplicación de herbicidas. En la finca que presenta esta problemática, el control de malezas se realiza con los herbicidas ametrina, diuron, hexazinona y cletodim, con dosis por hectárea comerciales de: 2.5 kg de ametrina 80%, 2 kg de diuron 80%, 1 kg de hexazinona 75% y 1.75 L de cletodim 12%.

En la finca de procedencia del biotipo R, el herbicida hexazinona ha sido muy utilizado en pre-emergencia, la ametrina y el diuron en pre y post-emergencia temprana y el cletodim únicamente como post-emergente para el control de escapes de poáceas. De estas moléculas, el diuron posee una persistencia extrema en el suelo, la ametrina es medianamente persistente, la hexazinona altamente persistente y el cletodim no posee persistencia (Dallos & Martínez, 2018; Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas [IRET], 2024).

Estas características de persistencia o de efecto residual de los herbicidas ametrina y diuron, así como la frecuencia de aplicación y uso repetitivo de altas dosis por ciclos consecutivos de cultivo, la carencia de otras estrategias de control y la biología de *P. maximum*, colaboran en el incremento de la presión de selección de biotipos resistentes (Jugulam & Shyam, 2019; Larran, 2018; Vila-Aiub, 2019).

Actualmente, entre los grupos de herbicidas más importantes y que engloban la mayor parte de los casos de resistencia se encuentran los inhibidores de la fotosíntesis en el fotosistema II. Entre las malezas más importantes resistentes a estos herbicidas se encuentran: 10 especies de *Amaranthus*, 6 de *Polygonum*, y 4 de *Chenopodium*. (Heap 2024; Valverde & Heap 2010).

Ante esto, teniendo en cuenta lo mencionado por Galdames et al., (2010) y Vila-Aiub, (2019), así como los parámetros planteados por Heap (2024), el biotipo R al presentar un IR superior a 2 e inferior a 10, posee una resistencia moderada a los herbicidas diuron y ametrina con relación al (los) biotipos más sensibles (Cuadro 7).

En 1991 se reportó en Costa Rica el primer caso de resistencia de una maleza a un herbicida: *E. colona* resistente al propanil. Dos poblaciones provenientes de campos de arroz que habían sido sometidas al herbicida durante 15 años demostraron ser 8 veces menos sensibles que una población que nunca había sido expuesta. Asimismo, la

resistencia al propanil era más frecuente y con índices más elevados en terrenos donde el herbicida se empleaba 2 o más veces durante el ciclo del cultivo (Broce & López, 2021)

Algunas especies de plantas poáceas reportadas en Costa Rica como resistentes a herbicidas en diversos cultivos o actividades presentan diferentes valores de IR: en *P. annua* de 24.7 al cletodim (Rodríguez et al., 2015); en *P. paniculatum* L de 8.26 al glifosato (Ramírez-Muñoz, 2017) y *R. cochinchinensis* de 5 al fluazifop-p-butil y de 13 al cyhalofop butil (Herrera, 2018).

Asimismo, en el país, Valverde (2010) determinó a través de experimentos en invernadero que biotipos de *E. indica* y *P. paniculatum* (pertenecientes a la familia poácea) son moderadamente resistentes al glifosato.

Por otro lado, Costa Rica cuenta con alrededor de 65 442 ha dedicadas a la producción de piña, en las cuales el control de malezas con herbicidas es muy similar, principalmente por estar muy limitado a la cantidad de productos disponibles para su uso en el cultivo, entre los que frecuenta la utilización de ametrina y diuron (Sistema de Monitoreo del Cambio de Uso y Cobertura de la Tierra en Paisajes Productivos (MOCUPP), 2024; SFE, 2024).

El manejo químico de las malas hierbas dentro de plantaciones de piña suele ser muy general a nivel internacional. Los herbicidas inhibidores de la fotosíntesis en el fotosistema II se han utilizado ampliamente en el cultivo de piña por décadas, de manera que en el 2021 apareció en plantaciones piñeras de Indonesia un biotipo de *E. indica* resistente al diuron, principalmente por el prolongado y repetitivo empleo del herbicida ante las poblaciones de la maleza (Salas, 2022).

Un caso similar es el de *P. maximum* y su evolución a resistencia al diuron y ametrina, dado a que la gama de herbicidas registrados para su uso en piña se limita a cerca de 6 mecanismos de acción diferentes (SFE, 2024); y la mayoría de los herbicidas comprenden ingredientes activos cuyo mecanismo de acción es la inhibición de la fotosíntesis en el fotosistema II. Este uso constante de este tipo de herbicidas para el control de malezas en piña, sometió a las poblaciones a una presión de selección constante, aumentando la frecuencia de las poblaciones menos sensibles al punto de evolucionar resistencia, lo que resultó en la aparición del primer caso de resistencia a herbicidas de *P. maximum* en el país y en el mundo.

Existen circunstancias en las que una maleza que ha desarrollado resistencia a un herbicida específico exprese también resistencia a otros herbicidas del mismo modo de

acción, tal es el caso de poblaciones de *I. unisetus*, las cuales presentaron resistencia al imazapyr y resistencia cruzada a un grupo de imidazolinonas (Valverde, 2004). Un acontecimiento similar sucedió con la poácea *Alopecurus myosuroides* Huds, la cual evolucionó resistencia a fenoxaprop y clodinafop, la misma exhibió resistencia cruzada al herbicida SFU flupysulfuron, que nunca había sido usado en ese campo (Chauvel et al., 2009).

P. maximum muestra resistencia cruzada al diuron y a la ametrina, ambas moléculas son química y estructuralmente diferentes (Larran, 2018). Sin embargo, los herbicidas del grupo químico de las triazinas y fenilureas (ametrina y diuron respectivamente) se unen al sitio de acople de la plastoquinona de la proteína D1, afectando el mismo proceso (Degiovanni et al., 2010), por lo que la evolución de resistencia al diuron puede ser responsable de conferirle a la planta una menor sensibilidad al herbicida ametrina.

A pesar de que el biotipo R fue capaz de sobrevivir a las dosis comerciales de ametrina y diuron utilizadas en la finca, no es capaz de hacerlo a las dosis comerciales de cletodim solo o en mezcla (Cuadro 4), por lo que la combinación de cualquiera de los herbicidas con el cletodim permite el control total de las plantas.

Galli et al., (2005) de forma similar, encontraron como alternativa para el control de biotipos de *L. multiflorum* resistentes al glifosato, que adicionar de 96 g de i.a.ha⁻¹ de cletodim a 720g de e.a.ha⁻¹ de glifosato, brindaba controles superiores al 97% en diferentes estados de la maleza. Lo mismo sucedió cuando se mezclaba dicha dosis de glifosato con 60g de i.a.ha⁻¹ de haloxifop-metil, herbicida que posee un mismo mecanismo de acción que el cletodim.

Conclusiones

El uso repetitivo de herbicidas, su aplicación frecuente a dosis elevadas y la ausencia de diversidad en estrategias de control de malezas por diversos ciclos productivos, contribuyeron al aumento de la presión de selección sobre plantas de *P. maximum* que permitió la evolución de resistencia a herbicidas.

Las plantas de cada biotipo de *P. maximum* tratadas a la edad de 5 hojas verdaderas con el herbicida diuron a dosis comerciales son capaces de sobrevivir y continuar con su desarrollo. Esto puede explicar el proceso de evolución de resistencia del biotipo R, ya que durante años fue sometido a dosis comerciales de herbicida en un estado fenológico

Mombaza a herbicidas

superior al que estas pueden controlar. Esta tolerancia pudo dar inicio al proceso de selección de resistencia.

Las deficiencias actuales en el control de *P. maximum* en campo se atribuyen a la evolución de resistencia de la planta a los herbicidas ametrina y diuron, lo que sugiere el no uso de estos u otros herbicidas con similar mecanismo de acción en áreas con presencia de esta maleza.

El herbicida cletodim es capaz de provocar la mortalidad total de plantas *P. maximum* aplicadas a la edad de 5 hojas verdaderas con dosis por debajo de las recomendadas comercialmente. Asimismo, con cualquier mezcla de las estudiadas que involucran al herbicida cletodim, las plantas resistentes a diuron y ametrina son controladas de forma efectiva.

A pesar de que el IR del biotipo R en relación con el biotipo S-P se encuentra en el límite inferior para declarar resistencia a la ametrina, es notable que este biotipo ha evolucionado una menor sensibilidad al herbicida, por lo que de continuar con la presión de selección sobre las poblaciones presentes en el campo de cultivo, se podría seleccionar biotipos cada vez menos sensibles a este u otros herbicidas, al punto de evolucionar en resistencia.

La hexazinona, a pesar de poseer el mismo mecanismo de acción que ametrina y diuron, es capaz de causar la mortalidad total del biotipo R a las dosis comerciales. Sin embargo, si se continúan con las mismas prácticas de control químico actuales cabe la posibilidad de que se seleccionen individuos dentro de la población que evolucionen resistencia a este herbicida.

El biotipo procedente de la finca dedicada al cultivo de piña ha evolucionado resistencia a diuron y ametrina. De acuerdo con el registro de Heap (2024), este es el primer reporte de resistencia a herbicidas de *P. maximum* en Costa Rica y el mundo.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por brindarme salud, amor, felicidad y fortaleza en todo momento. A la Universidad Nacional y la Escuela de Ciencias Agrarias por formarme desde el respeto, la responsabilidad y la disciplina.

Un enorme agradecimiento a mi mentor, amigo y ejemplo a seguir, Dr. Fernando Ramírez, por su tiempo, recursos, valores, enseñanzas, consejos y aportes, el cual ha sido como un padre académico, quién me ha brindado su confianza y me ha mostrado el increíble y maravilloso camino por el cual quiero transitar: las ciencias de las malezas. No todos tienen la paciencia y el don de enseñar, es una virtud que sin duda alguna le basta y le sobra.

A mi asesor M.Sc. Alonso Calvo por sus enseñanzas a lo largo de mi carrera como agrónomo y por abrirme las puertas a diferentes oportunidades para mi desarrollo profesional. A mi profesor y asesor Msc. Walter Peraza, por su apoyo solidario y por haber estado siempre a disposición de contribuirme en diferentes fases de la investigación.

Al Dr. Bernal Valverde, por abrirme las puertas en IDEA Tropical para la ejecución de mi trabajo final de graduación, así como la experiencia científica y enseñanzas aportadas durante mi estadía como estudiante. A cada colaborador (a) de la empresa IDEA Tropical que facilitaron los procesos prácticos de la investigación.

A Níxon Jiménez, Luis Luna, Denis Valverde y cada persona de la empresa Exportaciones Norteñas que me brindaron su confianza y mano solidaria para explorar y abordar con esta investigación el caso de resistencia a herbicidas.

Un agradecimiento especial a mis colegas y hermanos Isaías Gómez y Abelardo Arroyo, por cada sabio consejo y momento compartido, son un gran ejemplo y complemento académico.

A mi familia, por apoyarme en cada proceso universitario y brindarme su mano solidaria en momentos de adversidad. A Ma. Paula, por su apoyo incondicional, emocional y científico, sus sabios consejos y calidez con la que me motiva a seguir adelante.

A mis amigos (as) que estuvieron presentes ayudándome en diversos procesos de mi trabajo final de graduación: Geison, Yeudin, Christiam, Mainor, Keitty, Nubia, Alejandro y Luis.

A cada persona que de alguna u otra manera me apoyaron directa e indirectamente durante esta aventura universitaria, mis más grandes y sinceros agradecimientos.

Referencias

- Balossino, A. R. (2017). *Evaluación del nivel de resistencia a herbicidas de Amaranthus hybridus L. Kunth en la región norte de la Provincia de Córdoba*. [Tesis de Licenciatura. Córdoba, España. Universidad Nacional de Córdoba. 36 p.] <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/6639/Balossino%2c%20A.%20R.%20Evaluaci%c3%b3n%20del%20nivel%20de%20resistencia%20a%20herbicidas%20de%20Amaranthus%20hybridus%20L.%20Kunth...pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Beckie, J. (2020). Herbicide resistance in plants. *Plants*, 9(4), 435. <https://doi.org/10.3390/plants9040435>
- Broce, E. N., & López, R. A. (2021). *Resistencia de Malezas a Herbicidas en Latinoamérica y Métodos de Manejo: Revisión de Literatura* (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2021) Samaniego, E. N. B., Lobo, R. A. L., Molina, R. F. M., & Young, R. T. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria Ingeniería Agronómica.
- Chauvel, J.; P. Guillemain, & N. Colbach. (2009). Evolution of a herbicide-resistant population of *Alopecurus myosuroides* Huds. in a long-term cropping system experiment. *Crop Protection* 28, 4; 343-349.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO]. (2017). *Panicum repens* L., 1762. https://enciclovida.mx/pdfs/exoticas_invasoras/Panicum%20repens.pdf
- Degiovanni, V., Martínez, C., & Motta F. (2010). Producción eco-eficiente del arroz en América Latina. Calí, Colombia. https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/54233/Produccion_eco_eficiente_del_arroz_tomo_1.pdf;sequence=1
- Espinoza, N., & Rodríguez, C. (2013). Evolución de la resistencia de ballica (*Lolium multiflorum*) a glifosato y estrategias para su control en el sur de Chile. Viabilidad del glifosato en sistemas productivos sustentables. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7632/1/st-204-2013.-p.119-130.pdf>
- Espinoza, N., & Zapata, M. (2000). Resistencia de ballica anual (*Lolium rigidum* L.) y avenilla (*Avena fatua* L.) a herbicidas gramínicas en las zonas centro-sur y sur de Chile. *Agricultura técnica*, 60(1), 3-13. <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072000000100001>
- Galdames, R., Díaz, j., & Espinoza, N. (2010). Bases moleculares de la resistencia a herbicidas y test molecular para detectar resistencia a herbicidas en Billicas (*Lolium multiflorum* y *L. rigidum*). <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/8571/NR36358.pdf?sequence=14&isAllowed=y>
- Galli, A. J. B., Marochi, A. I., Christoffoleti, P. J., Trentin, R., & Tochetto, S. (2005). Ocorrência de *Lolium multiflorum* Lam resistente a glyphosate no Brasil. Seminario-Taller Iberoamericano Resistencia a Herbicidas y Cultivos Transgénicos (2005, Colonia del Sacramento, UY). Rios, A. coord. La Estanzuela, INIA, 1. http://www.inia.org.uy/estaciones/la_estanzuela/webseminariomalezas/articulos/galliantonio.pdf

Mombaza a herbicidas

- Gámez, A., De Gouveia, M., Álvarez, W., & Pérez, H. (2014). Flora arvense asociada a un agroecosistema tipo conuco en la comunidad de Santa Rosa de Ceiba Mocha en el estado Guárico. *Bioagro*, 26(3), 177-182. <https://www.redalyc.org/pdf/857/85732357007.pdf>
- Heap, I. (2024). The International Herbicide-Resistant Weed Database. Online. Thursday, January 11, 2024. Available www.weedscience.org
- Herrera, M. (2018). Resistencia del Invasor (*Rottboellia cochinchinensis*) [Lour.] Clayton a herbicidas gramínicas inhibidores de la acetil coenzima-A-carboxilasa (ACCasa) en Costa Rica. http://www.mag.go.cr/acerca_del_mag/programas/Boletin-2018-2-PITTA-Frijol.pdf
- Instituto Meteorológico Nacional. (17 de enero de 2024). Temperatura y precipitación registrada en la estación meteorológica de Fabio Baudrit, UCR. <https://www.imn.ac.cr/especial/estacionFABIO.html>
- Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET). (2024). Manual de Plaguicidas. <http://www.plaguicidasdecentroamerica.una.ac.cr/>
- Jugulam, M., & Shyam, C. (2019). Non-target-site resistance to herbicides: Recent developments. *Plants*, 8(10), 417. <https://doi.org/10.3390/plants8100417>
- Larran, A. S. (2018). *Resistencia a herbicidas en poblaciones del género Amaranthus: mecanismos moleculares y expresión de alelos resistentes en plantas de A. thaliana y trigo* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Rosario]. <https://rehip.unr.edu.ar/handle/2133/14445>
- Lobo, C. (2021). Gramíneas útiles de Costa Rica. <https://www.museocostarica.go.cr/divulgacion/articulos-educativos/gramineas-utiles-de-costa-rica/>
- Márquez C, S. (2014). *Evaluación de diferentes frecuencias de corte a una altura de 40 cm en pasto guinea mombaza (Panicum maximum, Jacq), en condiciones de sol y sombra natural influenciada por el dosel del árbol de campano (Pithecellobium saman) en la época seca, en el municipio de Sampués, Sucre.* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Sucre]. <https://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/handle/001/564/T633.202%20M357.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martínez, Y. R. P., Martínez, M. J., Dallos, J. A. G., Peña-Martínez, Y. R., Guerrero-Dallos, J. A., & Martínez-Cordón, M. J. (2018). Adsorción-desorción de diuron y ametrina en suelos de Colombia y España. *Revista Colombiana de Química*, 47(3), 31-40. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/70402/68682>
- Muñoz, F. R. (2017). *Mecanismo de resistencia de Paspalum paniculatum L. (poaceae) al herbicida glifosato.* [Tesis de Doctorado, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. https://www.researchgate.net/profile/fernando-ramirez-28/publication/332911115_mecanismo_de_resistencia_de_paspalum_paniculatum_l_poaceae_al_herbicida_glifosato/links/5cd1b5e3458515712e98a577/mecanismo-de-resistencia-de-paspalum-paniculatum-l-poaceae-al-herbicida-glifosato.pdf
- Pitty, A. (2018). Modo de Acción y Resistencia de los Herbicidas que Interfieren en el Fotosistema II de la Fotosíntesis. *Ceiba*, 55(1), 45-59. <https://doi.org/10.5377/ceiba.v55i1.5453>
- Rodríguez, A. M., Chaves, B. N., Hernández, D. A., & Herrera, M. F. (2015). Determinación de la resistencia al cletodim en *Poa annua* en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 26(2), 257-266. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v26i2.19325>
- Salas, R. (08 de junio de 2022). CropLife: Plantation Herbicide Resistance Management – Session 3 [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=73P9_R96bPk&t=7604s

- Seefeldt, S. S., Jensen, J. E., & Fuerst, E. P. (1995). Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships. *Weed technology*, 9(2), 218-227. <https://doi.org/10.1017/S0890037X00023253>
- Segura, M. A. M. (2015). Uso de agroquímicos en la producción intensiva de piña en Costa Rica. *Pensamiento actual*, 15(25), 183-195. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/pensamiento-actual/article/view/22604>
- Servicio Fitosanitario del Estado [SFE]. (2024). Insumos y Fiscalización. <http://app.sfe.go.cr/SFEInsumos/aspx/Insumos/ConsultaRegistroPlaguicida.aspx>
- Sistema de Monitoreo del Cambio de Uso y Cobertura de la Tierra en Paisajes Productivos [MOCUPP]. (2024). Cultivo de piña. <https://mocupp.org/cultivo-pina/>
- Valverde, B. E. (2004). Manejo de la resistencia a los herbicidas en los países en desarrollo. Manejo de Malezas para países en desarrollo. <https://www.fao.org/3/y5031s/y5031s0h.htm>
- Valverde, B. E. (2010). Glyphosate Resistance in Latin America. In V. K. Nandula (Ed.) *Glyphosate Resistance in Crops and Weeds, History* (pp. 249-280). Development and Management. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons.
- Valverde, B., & Heap, I. (2010). El estado actual de la resistencia a herbicidas en el mundo. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/8572/NR36351.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Otros%20modos%20de%20acci%C3%B3n%20,herbicida%20derivado%20de%20glicina%2C%20glifosato>
- Vila-Aiub, M. (2019). Fitness of herbicide-resistant weeds: Current knowledge and implications for management. *Plants*, 8(11), 469. <https://doi.org/10.3390/plants8110469>