



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**USO DEL HERBICIDA PARAQUAT EN EL CENTRO DEL ESTADO
DE VERACRUZ Y SU POTENCIAL RIESGO PARA ESPECIES
ACUÁTICAS**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA
Ing. David Gil Díaz

DIRECTOR:
Dra. María del Refugio Castañeda Chávez

CODIRECTOR
Dra. Gabycarmen Navarrete Rodríguez

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO.





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Boca del Río, Ver **10/JUNIO/2020**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

DAVID GIL DIAZ
PASANTE DEL PROGRAMA MAESTRÍA EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

"USO DEL HERBICIDA PARAQUAT EN EL CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ Y SU POTENCIAL RIESGO PARA ESPECIES ACUÁTICAS"

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede **AUTORIZACIÓN** para que proceda a su impresión.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros mares responderemos

M.C. ANA LETICIA PLATAS PINOS
JEFA DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

c.c.p. Coordinación del Programa MCIAmb
c.c.p. Expediente



Km. 12 Carr. Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290
Tel. (229) 690 5010 correo: dir01_bdelrio@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.bdelrio.tecnm.mx





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro: A-0710-130818

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 12:00 horas del día 11 del mes de mayo de 2020 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

**"USO DEL HERBICIDA PARAQUAT EN EL CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ
Y SU POTENCIAL RIESGO PARA ESPECIES ACUÁTICAS"**

Que presenta el (la) alumno(a):

DAVID GIL DÍAZ

Aspirante al Grado de:

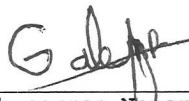
Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACIÓN, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:


Dra. María del Refugio Castañeda Chávez

Director


Dra. Gabycarmen Navarrete Rodríguez

Co-Director


Dra. Itzel Galaviz Villa

Asesor


Dra. Fabiola Lango Reynoso

Asesor



RESUMEN

En la presente investigación se evaluó el uso y manejo del herbicida Paraquat que realizan productores agrícolas de los municipios de Cotaxtla, Tlalixcoyan y Medellín de Bravo de la zona centro del estado de Veracruz, y se analizó su potencial riesgo para especies acuáticas de importancia comercial para la zona. En la primera fase de campo se realizaron entrevistas a los productores agrícolas usando una encuesta de 28 preguntas enfocada a conocer los siguientes aspectos: rasgos socio-económicos, uso y manejo del herbicida Paraquat, capacitación recibida sobre herbicidas, conocimiento del riesgo ocupacional y conocimiento del riesgo ambiental. En la segunda fase se determinaron en laboratorio parámetros fisicoquímicos de 36 muestras de agua para riego y 46 muestras de tierra de cultivo, muestras obtenidas durante la fase de campo.

En la tercera fase se realizaron bioensayos de toxicidad aguda a 96 horas para determinar la mortalidad expresada a través de la Concentración Letal Media (CL_{50}) de juveniles de tilapia de la especie *Oreochromis niloticus* y postlarvas de langostino *Macrobrachium olfersii* expuestos a diferentes concentraciones del herbicida comercial Dasurquat®, cuyo ingrediente activo es Paraquat al 25%. Se utilizaron cinco concentraciones (5, 10, 20, 40 y 80 $\mu\text{L/L}$ para tilapia y 0.1, 0.2, 0.5, 0.7 y 1 $\mu\text{L/L}$ para langostino) más un control negativo con dos réplicas por cada tratamiento. El análisis de datos se realizó con el método Probit utilizando el programa estadístico Minitab® Versión 18.1. para determinar la CL_{50} a 96 horas, se obtuvo un valor para *O. niloticus* de 17.49 $\mu\text{L/L}$ con intervalo de confianza (95%) con límite inferior de 13.75 $\mu\text{L/L}$ y límite superior 22.25 $\mu\text{L/L}$, para *M. olfersii* se obtuvo un valor de 0.31 $\mu\text{L/L}$ con intervalo de confianza (95%) con límite inferior de 0.26 $\mu\text{L/L}$ y límite superior 0.35 $\mu\text{L/L}$. Se demostró que el Paraquat es un compuesto utilizado de forma indebida en la industria agropecuaria del estado y que a pesar de ser diseñado para el control de hierbas puede ser altamente tóxico para especies acuáticas aun en concentraciones menores, lo que representa un potencial riesgo ambiental para la zona.

ABSTRACT

In this research, the Paraquat's herbicide use and management carried out by agricultural producers in the municipalities of Cotaxtla, Tlalixcoyan and Medellin de Bravo in the state of Veracruz was evaluated, and its important aquatic organisms potential risk was analyzed. On phase one, interviews were conducted to the producers using a 24 questions survey focused on knowing the following features: social and economic aspects, herbicide's use and management, training received, occupational risk and potential environmental risk. 49 locations of the three municipalities were visited, 36 water samples and 46 dirt samples were taken to evaluate physicochemical parameters on laboratory during phase 2.

On the third phase, acute toxicity bioassays were performed in order to determine the mortality expressed in Median Lethal Concentration (LC_{50}) in *Oreochromis niloticus* tilapia juveniles and *Macrobrachium olfersii* prawn postlarvae exposed to different concentrations of Dasurquat's® herbicide (Paraquat's active ingredient at 25%). Five concentrations (5, 10, 20, 40 and 80 $\mu\text{L/L}$ for tilapia and 0.1, 0.2, 0.5, 0.7 y 1 $\mu\text{L/L}$ for prawn) and one control were used with two replicates for each treatment. Data analysis was performed with the Probit method using the Minitab® Version 18.1 statistical program to determine the LC_{50} at 96 hours, for *O. niloticus* was 17.49 $\mu\text{L/L}$, its confidence interval (95%) with a lower limit of 13.75 $\mu\text{L/L}$ and an upper limit of 22.25 $\mu\text{L/L}$, for *M. olfersii* was 0.31 $\mu\text{L/L}$, its confidence interval (95%) with a lower limit of 0.26 $\mu\text{L/L}$ and an upper limit of 0.35 $\mu\text{L/L}$. Despite being a chemical compound designed for herbs control in agricultural activities, Paraquat was shown to be highly toxic to aquatic species even in small concentrations, representing a potential environmental and economic risk.

Dedicatorias

A mi familia y amigos por todo el apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida, todos mis éxitos y mis logros se los debo a ellos que siempre están a mi lado.

Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México por su soporte presupuestal dentro del marco de la Convocatoria de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica 2019 para los Institutos Tecnológicos Federales, Descentralizados y Centros, para el proyecto titulado: Paraquat en ecosistemas acuáticos con impacto en la actividad acuícola (clave: 5033.19P).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de posgrado otorgada para el programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Boca del Río.

A mi comité, asesores y a todo el grupo académico de posgrado por toda la enseñanza y sus consejos.

INDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1. Los plaguicidas y su clasificación	3
2.2. Los herbicidas y su clasificación	3
2.3. Herbicidas Bipiridilos	4
2.4. Situación actual de los herbicidas en la industria agropecuaria de México	5
2.5. Importancia de los organismos acuáticos <i>Oreochromis niloticus</i> y <i>Macrobrachium Olfersii</i>	9
2.6. Bioensayos letales de toxicidad aguda	10
3. JUSTIFICACIÓN	12
4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	13
5. HIPÓTESIS	14
6. OBJETIVOS	15
6.1. Objetivo general	15
6.2. Objetivos específicos	15
7. MATERIALES Y METODOS	16
7.1. Fase de campo	16
7.1.1. Área de estudio	16
7.1.2. Locaciones de entrevistas y puntos de muestreo	17
7.1.3. Diseño de la encuesta	18
7.1.4. Recolección de muestras	18
7.1.5. Procesamiento de datos con análisis de Componentes Principales (ACP).	19
7.2. Fase analítica en laboratorio	20
7.2.1. Procesamiento de muestras de tierra	20
7.2.1.1. Determinación de pH	20
7.2.1.2. Determinación de Carbono orgánico y materia orgánica	20
7.2.2. Procesamiento de muestras de agua	21
7.2.2.1. Determinación de pH y conductividad	21
7.2.2.2. Determinación de nitratos y nitritos	21
7.2.3. Procesamiento de datos con Análisis de Componentes Principales (ACP).	21
7.3. Fase experimental	22
7.3.1. Diseño del bioensayo	22
7.3.2. Periodo de aclimatación de los organismos	22
7.3.3. Bioensayo preliminar exploratorio	24
7.3.4. Bioensayo definitivo	25

7.3.5.	Análisis estadístico.....	26
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
8.1.7.	Análisis de componentes principales (ACP)	33
8.2.1.	Determinación de granulometría de tierra	37
8.2.2.	Análisis de componentes principales (ACP) de los suelos con arcillas	37
8.2.3.	Análisis de componentes principales de los parámetros fisicoquímicos	38
8.3.	Determinación de la mortalidad aguda en juveniles de <i>O. niloticus</i> y <i>M. olfersii</i>	42
8.3.1.	Determinación de la CL ₅₀ en <i>O. niloticus</i>	42
8.3.2.	Determinación de la CL ₅₀ en <i>M. olfersii</i>	44
8.4.	Comparativa entre concentraciones de Paraquat reportadas en campo y reportadas en laboratorio.	45
9.	CONCLUSIONES.....	46
9.1.	Fase 1.....	46
9.2.	Fase 2.....	46
9.3.	Fase 3.....	47
	REFERENCIAS.....	48

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cuatro de los principales tipos de clasificación de los plaguicidas: por tipo de organismo objetivo, por modo de acción, por composición química y por uso o destino final.....	3
Tabla 2 Cuatro de los principales tipos de clasificación de los herbicidas.	4
Tabla 3 Locaciones de entrevista y muestras obtenidas	17
Tabla 4 Condiciones ambientales controladas durante las diferentes fases.....	24
Tabla 5 Caracterización por municipio de los productores entrevistados de la zona centro del estado de Veracruz, n=48.	27
Tabla 6 Características de las zonas agrícolas en la región centro del Golfo de México. n=49	28
Tabla 7 Uso de ingrediente activo de los tres principales grupos de herbicidas en las zonas agrícolas del centro del Golfo de México	29
Tabla 8 Conocimiento del herbicida Paraquat de los productores entrevistados. n=49	30
Tabla 9 Concentraciones de herbicida Paraquat utilizadas por los productores entrevistados.	31
Tabla 10 Equipo de protección personal utilizado por los productores entrevistados. n=49	32
Tabla 11 Tabla de valores propios del ACP, donde F1 a F3 son los componentes principales que explican las variables de estudio de la encuesta.	33
Tabla 12 Matriz de componentes principales para la asociación de variables	34
Tabla 13 Matriz de correlación de Pearson del ACP, las celdas sombreadas corresponden a aquellas correlaciones con un nivel de significancia de $p < 0.05$	35

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fórmula del herbicida Paraquat	4
Figura 2 Mapa de localización de los municipios de Cotaxtla, Medellín de Bravo y Tlalixcoyan, del estado de Veracruz.....	17
Figura 3 Recolección de muestras de tierra en un campo de cultivo de Piña en el municipio de Medellín de Bravo, localidad Los Robles. Fuente propia.	19
Figura 4 Oxigenación de agua potable en peceras de 30 litros durante 14 días en el laboratorio de cuarentena del Instituto Tecnológico de Boca del Rio.	23
Figura 5 Batería de contenedores durante el bioensayo exploratorio para <i>O. niloticus</i> , en dicho diseño no se considera oxigenación de los contenedores.	25
Figura 6 Batería de contenedores durante el bioensayo definitivo para <i>M. olfersii</i> . Cada con oxigenación constante independiente.....	26
Figura 7 Gráfica de círculo de correlación entre variables y de correlación entre variables con los compontes F1 y F2.	36
Figura 8 Gráfica de correlación de variables y su coincidencia con diferentes tipos de cultivo.....	41
Figura 9 Concentración Letal Media (CL ₅₀) de Dasurquat® en tilapia <i>O. niloticus</i> a 96 horas con intervalos de confianza superior e inferior de 95%.....	43
Figura 10 Concentración Letal Media (CL ₅₀) de Dasurquat® en langostino <i>M. olfersii</i> a 96 horas con intervalos de confianza superior e inferior de 95%.....	45

1. INTRODUCCIÓN

El Paraquat (1,1-dimetil-4,4-bipiridilo) es un herbicida utilizado en la industria agropecuaria que pertenece al grupo de los bipiridilos, este compuesto está diseñado para el control de un gran número hierbas postemergentes (Bromilow 2004), por su bajo costo y rápida acción es uno de los herbicidas más utilizados a nivel mundial junto con el glifosato para el control de hierbas y malezas (Bajwa, 2014) esto contribuye en gran medida a su uso inadecuado y su gran distribución en el ambiente, por lo que representa un problema grave de contaminación del suelo y el agua (Camacho-Morales *et al.*, 2017). En México se distribuyen cerca de 36 marcas comerciales que contienen porcentaje de ingrediente activo de Paraquat con un rango de entre 25% y hasta el 44,9% (INECC, 2019) sin embargo, son escasas las investigaciones sobre este tipo de compuestos en la actividad agropecuaria del país, y particularmente de herbicidas como el Paraquat. No obstante, a que dicho compuesto es altamente tóxico y se ha comercializado en los últimos 60 años (PANANP, 2011). Este herbicida es altamente persistente y se inactiva por completo al entrar en contacto con el suelo, por lo que se almacena en éste (Saha, 2004), por lo que podría ser arrastrado por escorrentías e infiltración a cuerpos de agua cercanos, afectando así a otras actividades económicas que no utilizan este tipo de compuesto.

En distintas regiones del Estado de Veracruz se cuenta con granjas acuícolas dedicadas a la acuicultura (SAGARPA, 2008), desde la década de los 70 se ha dado impulso a esta actividad que representa una alternativa económica para muchas familias (Zetina *et al.*, 2006) contribuyendo al mejoramiento del nivel de vida, sin embargo, aún cuenta con diversas problemáticas que la vuelven una actividad vulnerable a factores externos. De las especies cultivadas en la acuicultura destacan la tilapia, conocida comúnmente como mojarra, la cual genera mayores volúmenes de producción (Avilés, 2006), junto con los langostinos que representan un importante rol ecológico en los ciclos de energía y nutrientes de los hábitats acuáticos (García-Guerrero *et al.*, 2013), a pesar de esto, en muchas ocasiones se carece de planes de manejo eficientes lo que dificulta controlar los riesgos potenciales a los que dichos organismos se encuentran expuestos, como el

vertimiento de aguas contaminadas dentro de los sistemas de producción. En el estado de Veracruz no existen reportes de evaluaciones de toxicidad aguda de Dasurquat® (ingrediente activo Paraquat) en organismos de la especie de tilapia *O. niloticus* ni en langostinos *M. olfersii*, por lo que es importante conocer los efectos tóxicos de compuestos como el Paraquat en sus formas comerciales, ya que son estas las utilizadas por los productores agrícolas de la zona, y no el ingrediente activo por sí solo, por lo que se encuentran disponibles en el ambiente y que pueden afectar a otros organismos no objetivo.

2. ANTECEDENTES

2.1. Los plaguicidas y su clasificación

Los plaguicidas son compuestos usados en la industria agropecuaria para el control y eliminación de organismos considerados plagas que perjudican a los productos de interés económico de dicha industria (INIFAP, 2006). A partir de la revolución industrial del Siglo XX el uso de sustancias sintéticas se generalizó para cubrir con la creciente demanda de productos agrícolas originada por el rápido crecimiento de los centros urbanos.

Existen diversas formas de clasificación de los plaguicidas (Tabla 1), de entre ellas destaca la clasificación por el tipo de organismos objetivo que controlan ya que es la forma más fácil de distinguir por parte de los usuarios finales de estos productos, que son los productores agrícolas.

Tabla 1 Cuatro de los principales tipos de clasificación de los plaguicidas: por tipo de organismo objetivo, por modo de acción, por composición química y por uso o destino final.

Por tipo de organismo objetivo	Por modo de acción	Por composición química	Por uso o destino
Insecticidas	Por contacto	Orgánicos	Agrícola
Herbicidas	Por ingestión		Forestal
Fungicidas	Sistémicos	Inorgánicos	Urbano
Bactericidas	Fumigantes		Jardinería
Antibióticos	Repelentes	Biológicos	Pecuario
	Defoliantes		Industrial

Elaborada a partir de Esquivel-Valenzuela (2018).

2.2. Los herbicidas y su clasificación

Los herbicidas son compuestos usados ampliamente en la agricultura para el control de la maleza, dichos compuestos inhiben o interrumpen el crecimiento y desarrollo de una planta (INIFAP, 2006) siendo esta una de las principales herramientas de control de malezas. De acuerdo a ciertas características los herbicidas se pueden clasificar de acuerdo a la Tabla 2 :

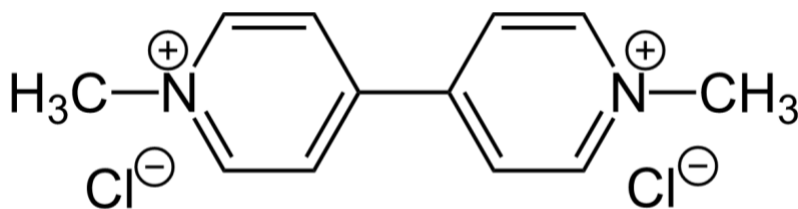
Tabla 2 Cuatro de los principales tipos de clasificación de los herbicidas.

Por familia química	Por época de aplicación	Selectividad	Por tipo de acción
Bipiridilos	Pre – siembra	Selectivos	De contacto
Triazinas			
Dinitroanilinas	Pre – emergentes	No selectivos	Sistémicos
Fenoxiacéticos			
Cloroacetamidas	Post - emergentes		
Ciclohexanodionas			

2.3. Herbicidas Bipiridilos

Dentro de este grupo se encuentran el herbicida Paraquat (Figura 1) siendo este uno de los herbicidas heterociclos de mayor uso (Albert, 2019), los compuestos Bipiridilos tienen un modo de acción por contacto, es decir, son absorbidos rápidamente por las partes de la planta con las que entran en contacto sin llegar a traslocarse a otras partes de la planta. Una vez absorbido por el follaje principalmente, estos compuestos se reducen generando radicales libres, los cuales compiten por la transferencia de electrones durante el proceso de fotosíntesis lo que ocasiona se generen peróxidos dentro de la planta que son altamente tóxicos para sus tejidos, esto finalmente termina destruyendo los tejidos y ocasionando el efecto de “quemante” como comúnmente se le nombra a este efecto.

Figura 1. Fórmula del herbicida Paraquat



Otra característica importante de los herbicidas bipiridilos es su gran capacidad de intercambio iónico con componentes de las arcillas del suelo (Albert, 2019), al entrar en contacto se unen fuertemente y desactiva su acción herbicida, teniendo un tiempo de permanencia de hasta 1000 días.

2.4. Situación actual de los herbicidas en la industria agropecuaria de México

Las investigaciones sobre la presencia de compuestos químicos de uso agrícola se han centrado principalmente en plaguicidas como el grupo de los organoclorados y organofosforados en México (Arellano-Aguilar et al., 2017). También, García-Gutiérrez y Rodríguez-Meza (2012) señalaron según datos (INEGI, 2006), durante el 2000 al 2005 en México se registró un incremento en el volumen de producción de plaguicidas pertenecientes al grupo de los herbicidas y defoliantes, así como de insecticidas que se emplean primordialmente en los campos.

El uso estimado de plaguicidas en México, según datos de la FAOSTAT de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura durante el período comprendido entre 2004 a 2009, fueron consumidos un promedio de 122 990 ton, equivalente al 16.1 % del uso mundial, hasta alcanzar un máximo de utilización en el 2009 con 21.6 % del total del consumo mundial (Salazar López y Aldana Madrid, 2011).

De acuerdo con FAOSTAT (2011) en México los insecticidas y los herbicidas se emplean en mayor porcentaje, de los cuáles el glifosato es uno de los herbicidas más consumidos. Coincidiendo con esto Viveros-Ruíz (2014), señaló entre los compuestos más usados en México para el control de malezas se encuentran grupos químicos como: el derivado del ácido fenoxiacético, 2,4-d; el compuesto bipiridílico, paraquat; los herbicidas triazínicos, simazina y atrazina, el organofosforado, glifosato, la fenilamida propanilo. Así como los derivados de la urea, monurón y diurón. Asimismo, Albert (2006) indicó en México, un mayor uso de herbicidas como paraquat y glifosato, seguidos de insecticidas organofosforados: paratión metílico, metamidofos, malatión) y fungicidas (mancozeb y clorotalonil). El uso extensivo de estos compuestos, conlleva entre los principales efectos adversos de los herbicidas en el medio ambiente, estos pueden alterar la estructura y el

funcionamiento del suelo mediante efectos directos sobre varios componentes de su microbiota (Bortolí et al., 2012).

El Paraquat es considerado como el segundo herbicida más utilizado en el mundo (He et al., 2012). Sin embargo, en México son escasas las investigaciones sobre compuestos como los herbicidas de amplio uso en la actividad agrícola del país, y particularmente es el mismo caso del grupo de los bupiridilos como el Paraquat. No obstante, a que dicho compuesto es altamente tóxico y se ha comercializado en los últimos 60 años (PANANP, 2011).

De acuerdo con su modo de acción, los herbicidas de contacto de amplio uso como son: Paraquat y el diquat se encuentran entre los herbicidas heterocíclicos más importantes y de mayor uso en la actualidad (Viveros-Ruíz, 2014). El Paraquat (1,1-dimetil-4,4-bupiridilo cloruro) es un herbicida no selectivo de amplio espectro de control, postemergentes y de contacto, aplicado a las malezas, (Bromilow 2004), este herbicida es uno de los compuestos más usados junto con el glifosato y glufosinato (Bajwa, 2014). El Paraquat se utiliza en el control de la maleza en la producción de café, cacao, coco, aceite de palma, caucho, banano, papaya, mango, maíz y caña de azúcar (Camacho-Morales et al., 2017).

El Paraquat es un herbicida ampliamente utilizado en la agricultura, esto contribuye uso inadecuado y su gran distribución, por lo cual éste representa un problema grave de contaminación del suelo y el agua (Camacho-Morales et al., 2017). Este herbicida es altamente persistente y se inactiva por completo al entrar en contacto con el suelo, por lo que se almacena en éste. Se ha comprobado en condiciones de suelos turbosos anaerobios, en un tiempo de desintegración media (TD50) puede alcanzar hasta 7.2 año (Saha, 2004).

Se han llevado a cabo diversos estudios a través del uso de entrevistas para conocer la situación actual sobre el uso y manejo de los herbicidas en México. Hernández en 2018, llevo a cabo entrevistas a 449 productores en el estado de Oaxaca donde identifiqué a los herbicidas como el plaguicida mayormente usado en la región, así como su alta toxicidad entre los productores jóvenes principalmente.

Las características químicas de los compuestos como herbicidas contribuyen a la presencia de diferencias en la acumulación y toxicidad en las diversas matrices ambientales. De acuerdo con INECC (2017) en los sistemas terrestres este compuesto es altamente persistente, con una vida media promedio estimada de 1000 días. Se reportó además que este compuesto presenta una elevada afinidad por los suelos, al unirse rápida y fuertemente a las arcillas, humus y materiales orgánicos.

En los sistemas acuáticos se reporta que el Paraquat desaparece rápidamente de la columna de agua por adsorción a los sólidos suspendidos y sedimentos o absorción por las plantas acuáticas. Sin embargo, su persistencia en los cuerpos de agua puede ser mayor que en la tierra por la menor disponibilidad de oxígeno (INECC, 2017). Respecto a su efecto en la salud pública, diversas investigaciones señalan que este compuesto es nocivo para todos los seres vivos. En humanos se absorbe por contacto y ocasiona lesiones en los tejidos expuestos, como resequedad y fisuras. Mientras, una exposición prolongada puede causar incluso ampollas y ulceraciones en la piel. También puede entrar al organismo por vía digestiva e inhalación y originar congestión, edema en los pulmones y en ocasiones hasta la muerte (Saha, 2004).

El uso extensivo de Paraquat, es asociado con la capacidad de este compuesto de acumularse selectivamente en los pulmones humanos al causar daño oxidativo y fibrosis, lo que lleva a la muerte a varios individuos (He et al., 2012). Asimismo, Vaccari et al. (2017) señalaron una asociación entre la exposición a Paraquat y la enfermedad de Parkinson, indicaron además que las agencias reguladoras deben definir los niveles de riesgo de exposición a Paraquat. Sin embargo, también señalaron que se requiere investigación que apoye el proceso de evaluación de riesgos. Tanner et al. (2011) indicaron también que la exposición crónica a este herbicida también se asocia con lesiones hepáticas, insuficiencia renal y enfermedad de Parkinson.

He et al. (2012) evaluaron la toxicidad del Paraquat en BEAS-2B normal células (células epiteliales bronquiales humanas), indicaron que la toxicidad muestra una

relación dependiente con la dosis. Lo anterior, da como resultado daños mitocondriales, estrés oxidativo, muerte de células de pulmón expuestas, así como producción de citoquinas, factores de crecimiento pro-fibrogénicos y transformación de miofibroblastos.

Los múltiples efectos toxicológicos del Paraquat en la salud humana y la biota conllevaron a la prohibición de su uso en diversos países, debido a su toxicidad aguda pulmonar y cutánea, mientras que otros han establecido medidas de uso limitadas (ANVISA, 2015). Alza-Camacho et al. (2016) reportaron en aguas superficiales, un rango de concentraciones de Paraquat entre 0.011 y 1.572 mg L⁻¹ y de glifosato entre 0.201 y 2.777 mg L⁻¹, las cuales fueron superiores al límite máximo residual (LMR). Diversos organismos internacionales como la Agencia de Protección del Medioambiente de Estados Unidos (EPA, 2014) incluyen regulaciones sobre los niveles máximos de uso para contaminantes permitidos en aguas potables (MLC), dentro de los cuales no se incluye el Paraquat, porque en este país el compuesto tiene un “uso restrictivo” (CDC, 2013). Otras organizaciones como la Resolución del Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007), en Colombia, tienen LMR de 0.1 mg L⁻¹ de Paraquat en aguas superficiales.

En el caso de México la legislación sobre presencia de plaguicidas en aguas nacionales y de consumo humano como la NOM-001-SEMARNAT-1996, no incluye en sus lineamientos la presencia de ningún tipo de plaguicida. Por lo tanto, es relevante evaluar y regular la concentración de estos compuestos en agua de consumo humano y agrícola. Coincidiendo con lo anterior, Alza-Camacho et.al. (2016) señalaron que la presencia de Paraquat en aguas superficiales indica que las fuentes hídricas cercanas a los cultivos pueden estar causando serios inconvenientes a la salud humana y a la de los animales que consumen este recurso. Por lo tanto, el monitoreo de residuos de plaguicidas en aguas es de crucial importancia para determinar el grado de exposición de la población y prevenir las posibles consecuencias toxicológicas a largo plazo (Alza-Camacho et.al., 2016).

2.5. Importancia de los organismos acuáticos *Oreochromis niloticus* y *Macrobrachium Olfersii*

Bajo su nombre común de “tilapia del Nilo” la tilapia de la especie *Oreochromis niloticus* puede rastrearse en los antiguos tiempos egipcios como lo indican los bajo-relieves de una tumba egipcia que data de más de 4000 años atrás y que muestra peces en estanques ornamentales (FAO, 2019). La tilapia *O. niloticus* procedente de Japón se introdujo a Tailandia en 1965, y de ahí se envió a Filipinas. La tilapia del Nilo procedente de Costa de Marfil se introdujo a Brasil en 1971 y de Brasil también se envió a Estados Unidos en 1974. En 1978, la tilapia del Nilo se introdujo a China, actualmente el principal productor mundial y que continuamente ha producido más de la mitad de la producción global de 1992 a 2003. La cría incontrolada de tilapia en estanques, que condujo a un excesivo reclutamiento, enanismo y un bajo porcentaje de peces de talla comercial, empañó el entusiasmo inicial que se había generado por la tilapia como un pez para alimentar a vastos sectores de la población. El desarrollo de técnicas de reversión sexual mediante hormonas, en los años 1970s representó un triunfo importante que permitió el cultivo de poblaciones monosexuadas hasta tallas comerciales uniformes. Adicionalmente, la investigación en nutrición y sistemas de cultivo, junto con el desarrollo del mercado y avances de procesamiento, condujeron a una rápida expansión de la industria desde mediados de los años 80. Se cultivan diversas especies de tilapia a nivel comercial, pero la tilapia del Nilo es la predominante mundialmente.

La Tilapia (incluyendo todas las especies) constituye el segundo grupo más importante de peces cultivados, tras las especies de carpa, y la que se ha difundido más entre todos los peces cultivados. En 2004 la tilapia ascendió al octavo puesto de popularidad entre peces y mariscos en los Estados Unidos. Se proyecta que el incremento en la producción global de tilapia ascienda de 1,5 millones de toneladas en 2003 a 2,5 millones de toneladas en 2010, con un valor de venta superior a los 5 mil millones de USD. Se proyecta que la mayor parte de esta producción esperada, la constituirá la tilapia del Nilo.

Algunas tendencias actuales incluyen:

- El desarrollo de nuevas cepas de crecimiento más rápido a través de técnicas selectivas de reproducción.
- Procedimientos de reproducción para generar tilapia macho mediante manipulación genética (GMT) sin utilización directa de hormonas.
- Sistemas de policultivo en estanques.
- Sistemas intensivos de recirculación de adecuado costo-beneficio.

Macrobrachium olfersii es una especie ampliamente distribuida en la costa oriental de América (FAO, 2019). Especies afines se encuentran en las Antillas y norte de Sudamérica. La costa pacífica de Centroamérica y México tiene también especies que no ocultan sus afinidades con *M. olfersii*.

Las especies mexicanas del grupo *olfersii* del género *Macrobrachium* si bien no tienen un gran significado comercial, constituyen parte importante en la dieta de los pobladores indígenas de las cuencas hidrográficas habitadas por este crustáceo. El complemento proteínico que se requiere en la alimentación de estas personas, es buscado afanosamente en los ríos de ambas vertientes de nuestro país, extrayendo de ellos Atyidos, Astácidos y Palaemónidos. *M. olfersii* no compite en talla con *M. carcinus* o *M. americanum* pero por su abundancia o facilidad de captura suele ser muy estimado por los pescadores.

2.6. Bioensayos letales de toxicidad aguda

Los bioensayos son pruebas de toxicidad donde se exponen organismos vivos a diferentes concentraciones o dosis de algún compuesto químico, y se evalúa su respuesta ante dicha exposición (US EPA, 2016), generalmente la respuesta puede ser sub-letal, donde se evalúan comportamientos o alteraciones a las funciones básicas de los organismos expuestos o letales donde la respuesta se evalúa en función a la mortalidad presentada. Los periodos de exposición suelen ser de dos tipos, crónicos cuando los periodos son largos que van desde semanas hasta meses de duración, y los agudos donde la exposición se mide hasta en 96 horas.

El objetivo principal de un bioensayo letal de toxicidad aguda es determinar la curva de concentración-respuesta a las 96 que explica la mortalidad de una población de organismos. La Concentración Letal Media (CL_{50}) es el punto de la curva concentración-respuesta donde se presenta la mortalidad del 50% de una población de organismos expuestos, cuenta con sus límites de confianza superior e inferior al 95% y es la información más comúnmente obtenida durante los bioensayos letales de toxicidad aguda.

Se han realizado diversos bioensayos de toxicidad aguda para explicar el comportamiento de organismos expuestos a plaguicidas, Reyes *et.al.*, en 2013 observó la mortalidad de larvas de ranas con concentraciones muy bajas de herbicida Glifosato, observó letalidad del 100 % en concentraciones de 28 mg/L.

En estudios más recientes Del Rosario *et.al.*, evaluaron en 2018 la toxicidad de un herbicida sobre 7 organismos considerados bioindicadores, incluidos organismos acuáticos como la especie *Carassius auratus* encontrando una alta toxicidad en concentraciones del orden de los 0.26 mg/L.

3. JUSTIFICACIÓN

El herbicida Paraquat es ampliamente comercializado en México, por sus características de alta solubilidad en agua y alta adsorción a los suelos tiene el riesgo potencial de llegar a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. El Paraquat es altamente tóxico para organismos acuáticos, por lo que su destino final en los cuerpos de agua podría representar un impacto ambiental negativo para las especies que habitan y que se cultivan en estos ambientes. Adicional a su alta toxicidad, compuestos como el Paraquat son utilizados en la mayoría de las ocasiones sin ninguna capacitación recibida sobre su uso y manejo eficiente, lo que potencializa aún más su riesgo para el ambiente. En el estado de Veracruz son de importancia económica las especies de tilapia *O. niloticus* y *M. Olfersii* que se producen en agua dulce y en sistemas estuarinos respectivamente, por lo que la densidad de sus poblaciones podría ser afectada por el uso de este herbicida.

Es importante realizar un estudio para hacer una relación entre las técnicas de uso y manejo del herbicida Paraquat que realizan los productores de la zona centro del estado de Veracruz y como estas prácticas pueden representar un riesgo para las poblaciones juveniles de especies acuáticas de la zona.

4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿La concentración del herbicida Paraquat usada por productores agrícolas del centro de Veracruz representa un riesgo para la tilapia *O. niloticus* y el langostino *M. olfersii*?

5. HIPÓTESIS

La concentración de Paraquat usada en las zonas agrícolas del centro de Veracruz tendrá un efecto negativo expresado como mortalidad y aletargamiento en juveniles de tilapia *O. niloticus* y postlarvas de langostino *M. olfersii*.

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo general

Analizar el efecto tóxico agudo del herbicida Paraquat en dos especies acuáticas en etapa juvenil y su relación con las concentraciones de uso en las principales zonas agrícolas de la zona centro del estado de Veracruz.

6.2. Objetivos específicos

- Identificar las técnicas de uso y manejo del herbicida Paraquat, así como las características del tipo de suelo en las principales zonas agrícolas
- Determinar la mortalidad aguda en juveniles de tilapia *O. niloticus* y postlarvas de langostino *M. olfersii* para definir la susceptibilidad al herbicida a través de la Concentración Letal Media (CL₅₀).
- Definir los riesgos por impacto del uso, manejo y características del suelo en organismos acuáticos que habitan en los ecosistemas cercanos a las zonas agrícolas.

7. MATERIALES Y METODOS

El trabajo se dividió en tres fases como a continuación se describen:

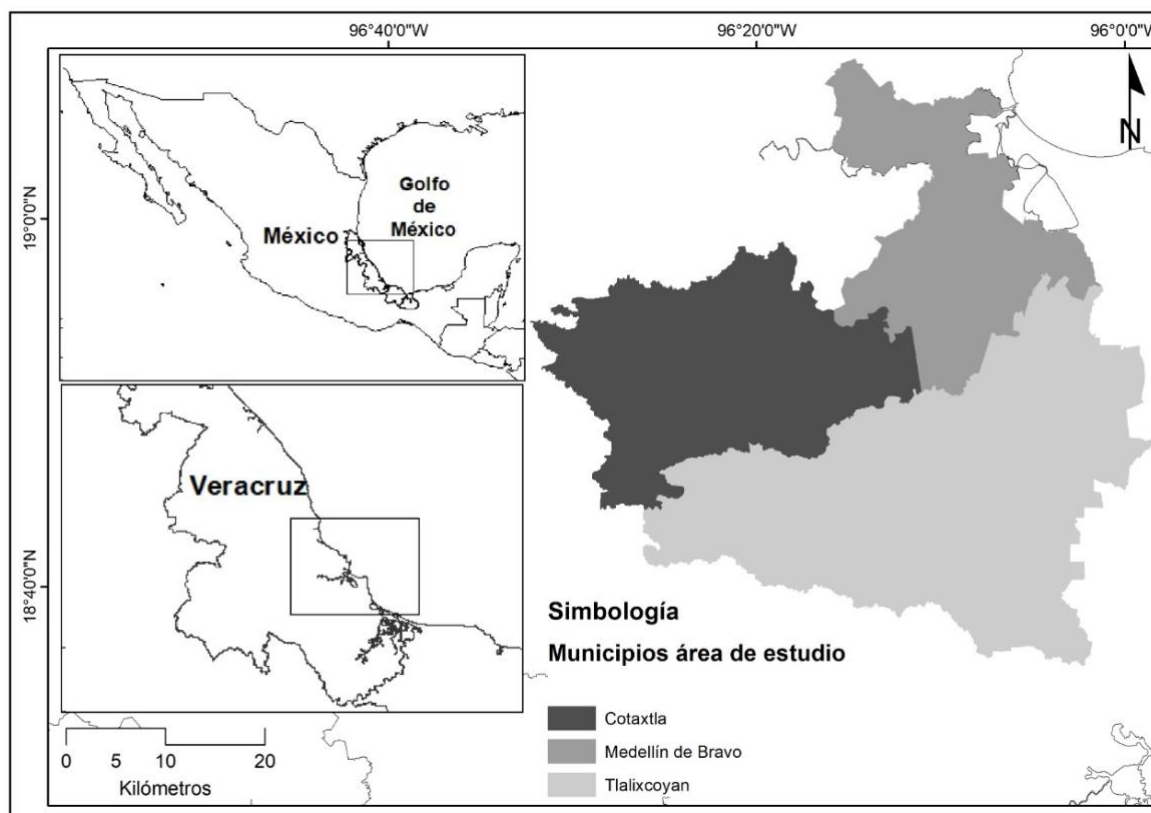
- Fase de campo: en esta fase se llevaron a cabo entrevistas a productores agrícolas de municipios de la zona centro del estado de Veracruz y se tomaban muestras de agua de riego y de tierra de cultivo para realizar análisis de los parámetros físico-químicos y granulometría.
- Fase analítica: en esta fase se realizaron los análisis de laboratorio para determinar aspectos físico químicos de las muestras de tierra (pH, materia orgánica y carbono orgánico) y agua (pH, conductividad, sólidos suspendidos, nitratos y nitritos) de las locaciones visitadas.
- Fase experimental: durante esta fase se realizaron bioensayos de toxicidad aguda letal donde se expusieron organismos de las especies acuáticas *O. niloticus* y *M. olfersii* a diferentes concentraciones del herbicida Paraquat para evaluar su respuesta.

7.1. Fase de campo

7.1.1. Área de estudio

Los municipios de Cotaxtla, Tlaxicoyan y Medellín de Bravo se encuentran en la región centro del estado de Veracruz. Los tres municipios son de una intensa actividad agrícola con cultivos como piña, papaya, limón y caña de azúcar. Las características de los diferentes cultivos y regiones generan una variedad en el uso de herbicidas en la región, adicional a esto los municipios tienen cercanía con cuerpos de agua de gran importancia como son el río Cotaxtla (municipio de Cotaxtla), río Blanco (municipio de Tlaxicoyan) y laguna de Mandinga (municipio de Medellín de Bravo).

Figura 2 Mapa de localización de los municipios de Cotaxtla, Medellín de Bravo y Tlaxicoyan, del estado de Veracruz.



7.1.2. Locaciones de entrevistas y puntos de muestreo.

El criterio de selección de las personas entrevistadas fue mediante el método no paramétrico bola de nieve, se acudió al campo de cultivo de cada productor donde se le aplicó la entrevista y adicional cuando era posible por las características del terreno se levantaron muestras de agua y tierra (Tabla 3).

Tabla 3 Locaciones de entrevista y muestras obtenidas

Municipio	Puntos visitados	Productores entrevistados	Muestras de agua	Muestras de tierra
Cotaxtla	7	7	6	7
Medellín de Bravo	26	26	18	24
Tlaxicoyan	16	16	12	15
Total	49	49	36	46

7.1.3. Diseño de la encuesta.

Se diseñó una encuesta de 29 preguntas divididas en 6 segmentos para conocer aspectos que logren explicar el uso y manejo del herbicida Paraquat:

- Rasgos socioeconómicos: se establecieron 10 preguntas para conocer datos de los productores como su edad, escolaridad, años de experiencia en el campo, tipo de cultivo, tipo de riego y extensión cultivada.
- Uso de herbicidas: se establecieron 4 preguntas para conocer el tipo herbicida utilizado, si este es Paraquat o no y las razones por la cual lo utilizan o no.
- Manejo de herbicidas: se establecieron 5 preguntas enfocadas a conocer la forma de aplicación, frecuencia de aplicación y concentración utilizada.
- Capacitación: 2 preguntas enfocadas a la información recibida sobre el uso de plaguicidas en general y el equipo e protección personal que usan durante la aplicación de herbicidas.
- Riesgo ocupacional: 3 preguntas enfocadas a conocer la frecuencia e intensidad de intoxicación leve por el uso de herbicidas.
- Riesgo ambiental: se establecieron 5 preguntas para conocer el daño al ambiente potencial que puedan ocasionar por la disposición final de envases de herbicidas, lugares de almacenaje, lugares de preparación y conocimiento de los productores sobre los posibles daños al ambiente por el uso indebido de herbicidas.

7.1.4. Recolección de muestras

En cada locación visitada para las entrevistas se tomó una muestra compuesta de 5 puntos de tierra, escarbados a 15 cm de profundidad y recolectados dentro de la parcela de cultivo de cada productor a través de un transecto trazado a lo largo de la parcela y tomadas en forma de zigzag iniciando al azar por un punto de partida, para obtener 1 kg de tierra misma que se introdujo en bolsas de plástico que fueron selladas y etiquetadas para su posterior transporte hacia el Laboratorio de Investigación de Recursos Acuáticos (LIRA) del Instituto Tecnológico de Boca del Río.

Se tomaron dos muestras de agua de 1 L por cada productor entrevistado cuando contaba con agua de pozo para riego, se llenaron envases de polipropileno color ámbar, mismas que fueron colocadas dentro de hieleras, tapadas para minimizar la exposición a la luz solar y a la temperatura y fueron cubiertas con hielo para su traslado inmediato hacia el laboratorio LIRA para ser procesadas.

Figura 3 Recolección de muestras de tierra en un campo de cultivo de Piña en el municipio de Medellín de Bravo, localidad Los Robles. Fuente propia.



7.1.5. Procesamiento de datos con análisis de Componentes Principales (ACP).

Los datos obtenidos del cuestionario se procesaron en el software Addinsoft XLSTAT versión 2020.2.3 para realizar un análisis exploratorio de estos, con la información sobre el productor y las características de la zona de cultivo se analizaron con estadísticas descriptivas como medias y frecuencias.

Para dar respuesta al objetivo específico número 1 de este estudio, identificar las técnicas de uso y manejo de Paraquat en las principales zonas agrícolas de la zona centro del estado de Veracruz, se utilizó la herramienta estadística del Análisis de Componentes Principales (ACP). Se seleccionaron 12 variables: x_1 : edad del

productor (años); x_2 : escolaridad (años de estudio concluidos); x_3 : experiencia laborando en el campo (años); x_4 : área cultivada (Hectáreas); x_5 : concentración de Paraquat usada ($\mu\text{L/L}$); x_6 : tanques utilizados por Hectárea (tanque/Ha); x_7 : concentración por hectárea (L/Ha); x_8 : forma de aplicación (0 = contrata a alguien, 1 = el mismo lo aplica); x_9 : frecuencia de aplicación al año (veces/año); x_{10} : agregan regulador de pH (0 = no agrega, 1= si agrega); x_{11} : frecuencia de intoxicación (ocasiones); x_{12} : conocimiento de daños al ambiente (0 = desconoce los daños, 1= tiene conocimiento de los daños). Con dichas variables se encontraron los componentes principales que pudieran abarcar la explicación de la mayor variabilidad posible, obteniendo la matriz de correlación de Pearson y la gráfica circular de correlación entre variables y componentes.

7.2. Fase analítica en laboratorio

7.2.1. Procesamiento de muestras de tierra

7.2.1.1. Determinación de pH

Cada muestra se colocó por separado en una tina de plástico donde se mezcló usando una pala de acero inoxidable, después se formó una torta de forma circular y se dividió en 4 partes iguales, se desecharon dos lados opuestos y se repitió el proceso de mezclado hasta obtener solamente 500 gramos de muestra final. Se retiraron rocas y material orgánico visibles.

Se pesaron 10 g de muestra, se colocaron en un vaso de precipitados y se añadieron 20 ml de agua destilada, con una varilla de vidrio se agitó de forma manual durante 30 minutos en intervalos de 5 minutos. Al finalizar se dejó reposar la muestra durante 15 minutos. Utilizando un potenciómetro calibrado con 3 soluciones reguladoras (pH 4.00, 7.00 y 10.00) se tomaron 3 lecturas de pH, agitando la mezcla y enjuagando el electrodo con agua destilada entre cada lectura. La lectura final que se considera es el promedio de las 3 lecturas realizadas.

7.2.1.2. Determinación de Carbono orgánico y materia orgánica

La evaluación de materia orgánica y contenido de carbono orgánico se realizó a través del método de titulación. Este método se basa en la oxidación del carbono

orgánico del suelo por medio de una disolución de 10 ml de dicromato de potasio y 0.5 g de muestra de suelo previamente tamizada a 0.5 mm, se genera calor de reacción al mezclarla con 20 ml de ácido sulfúrico concentrado. Después de cierto tiempo de espera la mezcla se diluye con agua destilada, se añade 5 ml de ácido fosfórico y de 5 a 10 gotas de indicador de difenilamina. Posteriormente se titula la muestra con la disolución de sulfato ferroso gota a gota hasta un punto final verde claro. Se calcula el volumen gastado de disolución de sulfato ferroso.

7.2.2. Procesamiento de muestras de agua

7.2.2.1. Determinación de pH y conductividad

Para la medición del pH se vertió $\frac{1}{4}$ de la muestra en un vaso de precipitados y se analizó con un potenciómetro marca Consor C6010, mismo que fue previamente calibrado con soluciones reguladoras (pH 4.00, 7.00 y 10.00). Se tomaron 3 lecturas enjuagando el electrodo con agua destilada entre cada lectura. La lectura final se consideró como el promedio de las 3 lecturas obtenidas.

Para la medición de la conductividad se realizó el mismo procedimiento utilizando la sonda marca Consor apropiada para medir conductividad.

7.2.2.2. Determinación de nitratos y nitritos

Se utilizó un kit de pruebas colorimétricas marca NUTRAFIN que indica valores desde 0.0 mg/l hasta 110 mg/L para nitratos y de 0.0 mg/L hasta 3.3 mg7L para nitritos.

7.2.3. Procesamiento de datos con Análisis de Componentes Principales (ACP)

Con los datos obtenidos de los parámetros fisicoquímicos de tierra y agua obtenidos durante la fase de gabinete, se analizaron bajo la técnica de análisis de componentes principales para observar su relación con las variables x_6 y x_7 obtenidas de la encuesta, estas variables están relacionadas con la preparación de concentraciones de herbicida y la cantidad de tanques de mezcla preparado por Hectárea (concentración por Hectárea). Con esto se busca encontrar una relación entre el uso de las concentraciones de los herbicidas y su impacto en la calidad de tierra y agua.

Se asignaron 10 variables: x_6 : tanques utilizados por Hectárea (tanque/Ha); x_7 : concentración por hectárea (L/Ha); x_{13} : pH de agua; x_{14} : conductividad del agua; x_{15} : solidos suspendidos totales del agua; x_{16} : nitritos del agua; x_{17} : nitratos del agua; x_{18} : pH de la tierra; x_{19} : carbono orgánico de la tierra y x_{20} materia orgánica de la tierra.

7.3. Fase experimental

7.3.1. Diseño del bioensayo

Para llevar a cabo los bioensayos de toxicidad aguda en diferentes especies de organismos acuáticos se tomaron en cuenta los lineamientos que proporciona la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) en su Guía Para Pruebas De Efectos Ecológicos (OCSP 850.1075), dicha guía tiene como objetivo establecer los lineamientos a seguir para llevar a cabo pruebas toxicológicas agudas letales que involucren a organismos acuáticos expuestos a concentraciones de algún compuesto químico a evaluar. El diseño del bioensayo comprendió tres etapas: la primera correspondió a un periodo de aclimatación de los organismos, la segunda un bioensayo preliminar exploratorio de concentraciones y por último el bioensayo definitivo.

7.3.2. Periodo de aclimatación de los organismos

Se designó un área exclusiva del laboratorio de cuarentena del Instituto Tecnológico de Boca del Río, la cual se aclimató con las condiciones ambientales necesarias (Tabla 4), dichas condiciones se mantuvieron desde 14 días previos al arribo de los organismos hasta la finalización del bioensayo definitivo. Para contener a los organismos se colocaron 11 peceras de vidrio de 30 L de capacidad cada una con agua potable apta para consumo humano y suministro de aire constante.

Figura 4 Oxigenación de agua potable en peceras de 30 litros durante 14 días en el laboratorio de cuarentena del Instituto Tecnológico de Boca del Río.



Se adquirieron a un proveedor local un total de 800 organismos de tilapia con 22 días de eclosión del saco vitelino y 500 organismos de langostino en estadio de postlarvas, por lotes en diferentes fechas para cada tipo de bioensayo, se distribuyeron en las peceras de vidrio con el agua previamente aclimatada y se mantuvieron durante 14 días más. Durante este periodo se midió la talla y peso promedio de una muestra de 20 organismos de cada especie (tilapia: peso promedio = 10 mg, longitud total promedio = 8,75 mm, langostino: peso promedio = 5 mg, longitud total promedio = 5,72 mm), se les suministró diariamente alimento comercial (30% de proteína) durante el periodo de aclimatación hasta 24 horas antes del inicio de los bioensayos preliminar y definitivo, se realizó la limpieza de las peceras con sifón cada tercer día y se contabilizaron los organismos muertos, los cuales no rebasaron el 5% de cada lote que de acuerdo a la guía OCSPP 850.1075 demuestra la vitalidad del lote para ser sometido al bioensayo.

Tabla 4 Condiciones ambientales controladas durante las diferentes fases

Parámetro	Tilapia <i>O. niloticus</i>	Langostino <i>M. olfersii</i>
Temperatura ambiente	28 °C, $\pm 1^{\circ}\text{C}$	23 °C, $\pm 1^{\circ}\text{C}$
Foto periodo	12 horas de luz, 12 horas de oscuridad	12 horas de luz, 12 horas de oscuridad
pH del agua	7,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,5
Dureza del agua	<180 mg/L	<180 mg/L
Saturación de O ₂ disuelto	85 %, $\pm$ 2,5 %	85 %, $\pm$ 2,5 %

7.3.3. Bioensayo preliminar exploratorio

Los bioensayos exploratorios se realizan para encontrar un rango apropiado de concentraciones del compuesto a evaluar que sea específico para las condiciones con las que se llevará a cabo el bioensayo definitivo, con esto se optimiza el uso de recursos y de tiempo. Se llevó a cabo un bioensayo estático de 96 horas con las mismas condiciones ambientales de la aclimatación y utilizando organismos previamente aclimatados durante los 14 días. El herbicida a evaluar Dasurquat® (solución a 25% de Paraquat) se adquirió en una tienda local de productos agroquímicos, se colocaron 6 contenedores de polipropileno de 10 L de capacidad cada una con 4 L de agua aclimatada y 5 concentraciones del herbicida de 10, 50, 100, 500 y 1000 $\mu\text{L/L}$ más un control negativo. De forma aleatoria se seleccionó y distribuyó una muestra de 60 organismos colocando 10 organismos por cada contenedor. Se contabilizó el número de organismos muertos cada 12 horas y se retiraron de cada contenedor para fijarlos en solución al 20% de alcohol. La importancia de dicho bioensayo es encontrar un rango de concentraciones donde se obtenga el 0% de mortalidad con la menor concentración y el 100 % de mortalidad con la mayor concentración para encontrar una concentración intermedia que se asume es muy similar a la Concentración Letal Media (CL₅₀)

Figura 5 Batería de contenedores durante el bioensayo exploratorio para *O. niloticus*, en dicho diseño no se considera oxigenación de los contenedores.



7.3.4. Bioensayo definitivo

Con los datos obtenidos del bioensayo preliminar por medio del análisis Probit (Finney, 1971) se determinó una serie geométrica de 5 concentraciones a evaluar (5, 10, 20, 40 y 80 $\mu\text{L/L}$ para tilapia y 0.1, 0.2, 0.5, 0.7 y 1 $\mu\text{L/L}$ para langostino) más un control negativo, con dos réplicas por cada tratamiento y dos repeticiones consecutivas; se colocaron de igual forma la misma batería de contenedores de polipropileno, cabe señalar que se eligió este material ya que es inerte al herbicida Paraquat, lo que evita alteraciones en el comportamiento del compuesto a evaluar. Cada bioensayo se realizó de forma semi-estática, es decir, con recambios del 50% del agua de solución de los contenedores. Cada 24 horas se hicieron observaciones de los organismos donde se midió la temperatura, pH, concentración de O_2 , se documentó el comportamiento, apariencia, número de organismos muertos y mortalidad acumulada en porcentaje.

Figura 6 Batería de contenedores durante el bioensayo definitivo para *M. olfersii*. Cada con oxigenación constante independiente.



7.3.5. Análisis estadístico

Se utilizó el programa estadístico Minitab® Versión 18.1. para obtener la tabla de regresión donde se establece y valida la regla de decisión si el valor de $p \leq 0.05$ significa que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la variable respuesta (mortalidad en organismos) y la concentración; la tabla de percentiles donde se observa el percentil 50 que es donde se espera la mortalidad de la mitad de los organismos a dicha concentración, a esta se le determina la Concentración Letal Media (CL₅₀) a las 96 horas; la gráfica de mortalidad acumulada donde se observan de forma visual los límites de confianza superior e inferior con un valor de $\alpha = 95\%$.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Identificación de las técnicas de uso y manejo del herbicida Paraquat

8.1.1. Caracterización de los productores agrícolas

De la muestra poblacional de 49 personas entrevistadas presentaron una edad promedio de 61 años, con un rango mínimo de 37 años y máximo de 83 años (Tabla 5). Su escolaridad promedio fue de 4.4 años (primaria inconclusa), dentro de un rango mínimo de cero años de estudio (sin escolaridad) y máximo de doce años (preparatorio concluida). Los años de experiencia laborando en el campo obtuvo un promedio de 39.7 años, que oscilaron entre cero años de experiencia (sin ninguna experiencia) hasta los 73 años de experiencia. Jaramillo en 2018, caracterizó productores del municipio de Tierra Blanca, Veracruz, encontrando resultados similares, una edad promedio de 55 años, con 5.5 años promedio de escolaridad.

Tabla 5 Caracterización por municipio de los productores entrevistados de la zona centro del estado de Veracruz, $n=48$.

	Cotaxtla	Tlalixcoyan	Medellín	General
Edad				
Rango de edad (años)	50 - 65	37 - 83	38 - 80	37 - 83
Edad promedio (años)	52.1	58.3	64.3	60.57
Escolaridad				
Sin escolaridad	0 %	34.61 %	12.5 %	22.44 %
Primaria inconclusa	87.71 %	26.92 %	18.75 %	32.63 %
Primaria terminada	14.28 %	19.23 %	25 %	20.4 %
Secundaria inconclusa	0 %	3.84 %	0 %	2 %
Secundaria terminada	0 %	11.53 %	43.75 %	20.4 %
Preparatoria terminada	0 %	3.84 %	0 %	2 %
Promedio (años)	3.4	6	3.7	4.4
Experiencia				
Rango de experiencia (años)	3 - 48	0 - 73	5 - 70	0 - 73
Experiencia promedio (años)	31.6	27.1	49.7	39.7

Se les preguntó a los entrevistados sobre cuál es su cultivo principal que producen y sus dos cultivos secundarios o alternos que también cultivaran, siendo los cultivos principales Piña (44.9%), Limón (14.3%) y Papaya (14.3%), los cuales en su conjunto abarcan el 73.5% de los cultivos preferidos para cultivar. Los tres cultivos que consideran secundarios o complementarios a su cultivo principal son: Maíz (14.3%) y Piña (6.1%) (Tabla 6).

Tabla 6 Características de las zonas agrícolas en la región centro del Golfo de México. *n*=49

	Cotaxtla	Tlalixcoyan	Medellín	General
Tipo de cultivo				
Cultivo principal	Limón 57.14 %	Papaya 25%	Piña 80.76 %	Piña 44.89 %
Cultivo secundario	Maíz 28.57 %	Piña 18.75 %	Maíz 19.23 %	Maíz 14.8 %
Cultivo adicional	Frijol 28.57 %	Maíz 37.5 %	Chile 3.84% Pasto 3.84%	Maíz 12.24 %
Extensión (Hectáreas)	5.8	12.1	7.8	8.9
Tipo de riego				
Ninguno (Por temporal)	0 %	25 %	69.23 %	44.89 %
Goteo	100 %	12.5 %	15.38 %	26.53 %
Inundación	0 %	25 %	0 %	8.16 %
Tractor	0 %	0%	11.54 %	6.12 %
Cubetas	0 %	18.75 %	0 %	6.12 %
Otros	0 %	18.75 %	3.85 %	8.16 %

La extensión cultivada promedio (Hectáreas) fue de 8.9 Ha oscilando entre un rango inferior de 1 Ha y superior de 84 Ha. Respecto al método de riego el 44.9 % no utiliza ningún tipo de riego (temporal), el 26.5% usan el método por goteo y el 8.2% utilizan el método por inundación, estos tres tipos de riego abarcan el 79 % de los métodos de riego utilizados. Jaramillo en 2018 reporta una superficie cultivada similar de 11.28 Ha por productor. Lo anterior contrasta con lo reportado por Esquivel en 2019, que, al realizar un estudio similar con productores agrícolas de la zona de Torreón, Coahuila reporta una superficie de cultivo mucho mayor de 9653

Ha promedio, esto indica que las características de cultivo son muy específicas por cada región del país, para el caso de la zona centro de Veracruz prevalecen los pequeños productores.

8.1.2. Uso de herbicidas

Los resultados indicaron el uso de 14 ingredientes activos de 18 marcas comerciales en los municipios de la zona de estudio en esta investigación. Los agricultores reportaron el uso de ingrediente activo de Glifosato y Paraquat; también Polanco-Rodríguez *et al.* (2019) indicaron el uso de estos herbicidas clasificados en la categoría toxicológica como altamente tóxicos y probables causantes de cáncer en la población de acuerdo con International Agency for Research on Cancer (IARC) según la ATSDR (2020). Asimismo, en municipios de Yucatán se reportó un total de 10 herbicidas pertenecientes a diferentes grupos químicos, de los cuales indicaron el uso de al menos tres ingredientes activos como glifosato, Paraquat, Paraquat dicloruro clasificados como altamente tóxicos (Polanco-Rodríguez *et al.*, 2019).

Tabla 7 Uso de ingrediente activo de los tres principales grupos de herbicidas en las zonas agrícolas del centro del Golfo de México

Ingrediente activo (i.a) herbicida 1	Dosis de i.a (mg L ⁻¹ ha)	Ingrediente activo (i.a) herbicida 2	Dosis de i.a (mg L ⁻¹ ha)	Ingrediente activo (i.a) herbicida 2	Dosis de i.a (mg L ⁻¹ ha)
Diuron	3660,71	Haloxifop	1750,00	Hivar	1500,00
Picloram	20000,00	Hyvar	2023,71	Fluazifop-butil	1250,00
Glifosato	7500,00	Fluazifop-butil	1250,00	Haloxifop	1350,00
Hivart	1166,67	Glifosato	10000,00	Picloram	6250,00
Ametrina/Atrazina/D	10000,00	2,4-D	15625,00	Diuron	5000,00
Propanil	20000,00	Ametrina	10000,00	Glifosato	101,00
Dicloropropio anilida	20000,00	Diuron	2000,00	2,4-D	2500,00
Carpal	10000,00	Ametrina/Atrazina/Diuron	3500,00	Adherent	5000,00
Jit	1500,00	Clomazona	10000,00	Hivar	1500,00
Glufosinato	10000,00	Ester Butílico del Ácido/2,4-D	2500,00		
		Clethodim	2000,00		

Los herbicidas del grupo 1 (principal) con máximas dosis de aplicación fueron Picloram, Propanil y Dicloropropioanilida con 20 000.00 (mg L-1 ha), el segundo grupo de herbicida fueron 2,4-D con 15 625.00, Glifosato, Ametrina Clomazona con 10 000.00 (mg L-1 ha) (Tabla 7). Finalmente, el tercer tipo de herbicida fue Picloram con 6 250.000 y Diuron con 5 000.000 (mg L-1 ha). Con relación a Paraquat, este fue usado por el 26.53% de los entrevistados con los nombres comerciales de Gramoxone, Paraquat y Lumbrequat. La máxima concentración reportada fue 20,000 y una concentración media utilizada de 2,683.673 mg L-1 ha.

8.1.3. Uso de herbicida Paraquat

Del total de los entrevistados el 77 % afirma conocer el nombre herbicida Paraquat bajo los nombres comunes de Paraquat, Gramoxone y Lumbrequat (Tabla 8), mientras que el resto no conoce de dichos nombres. Del total de personas que afirma conocer el herbicida Paraquat solo el 37 % lo utilizan actualmente, de los cuales el 85 % afirma que su uso es eficiente para el control de hierbas, el 7 % menciona solo usarlo en áreas independientes a sus cultivos y el 7 % restante no conoce lo suficiente su eficiencia. Jiménez en 2018 realizó encuestas similares sobre el uso de distintos plaguicidas en el distrito de riego de La Antigua, Veracruz, reportando un porcentaje de uso menor de solo el 7.4 % del total de los plaguicidas utilizados.

Tabla 8 Conocimiento del herbicida Paraquat de los productores entrevistados. *n*=49

	Cotaxtla	Tlalixcoyan	Medellín	General
Desconocen el herbicida Paraquat	14,29 %	6,25 %	34,62	33 %
Conocen el herbicida Paraquat	85,71 %	93,75 %	65,38 %	77 %
Lo utilizan	100 %	40 %	11,76 %	36,84 %
No lo utilizan	0 %	60 %	88,24 %	63,16 %

De las personas que afirman conocer el herbicida Paraquat, pero reportan no utilizarlo, es por las siguientes razones: daña a sus cultivos principales (62.5 %), poca eficiencia para controlar las hierbas (16.6 %), no cultiva actualmente (12.5 %) y desconoce bien su uso (8.3 %).

El promedio de concentración de Paraquat utilizado por los productores es de 2.02 L de herbicida por tanque de 200 L de agua (Tabla 9), es decir una concentración de 10 100 $\mu\text{L/L}$ de Paraquat por cada litro de agua. El rango de concentraciones es desde 1 L por tanque de 200 L (5000 $\mu\text{L/L}$) hasta 4 L por tanque de 200 L (20 000 $\mu\text{L/L}$). De estas concentraciones lo productores reportan utilizar en promedio 2.2 tanques por cada Hectárea de cultivo lo que se traduce en una concentración promedio de 22 220 $\mu\text{L/L Ha}$. En contraste Nájera *et.al.*, reporta en el 2016 en una encuesta realizada a productores de café en el estado de Chiapas, el producto más utilizado es el Paraquat, pero a concentraciones promedio más bajas, de 1L / tanque de 200 L (5000 $\mu\text{L/L}$), con una frecuencia de aplicación de solamente 1 vez al año.

Tabla 9 Concentraciones de herbicida Paraquat utilizadas por los productores entrevistados.

	Cotaxtla	Tlalixcoyan	Medellín	General
Concentración promedio de Paraquat ($\mu\text{L/L}$)	10 900	10 000	5 000	10 100
Rango de concentración ($\mu\text{L/L}$)	7 500 – 10 000	10 000	5 000	5 000 – 20 000
Concentración promedio por Hectárea ($\mu\text{L/L Ha}$)	18 639	24 200	20 000	22 200

8.1.4. Capacitación recibida sobre uso de herbicidas

El 83 % de los productores entrevistados reportaron no haber recibido capacitación alguna sobre el uso y manejo de plaguicidas en general, mientras que solo el 8.1 % reporta aplicar las concentraciones de herbicidas que utilizan siguiendo la recomendación de la tienda o de la persona encargada de vender el producto, el resto (91.8 %) reporta que las aplica por experiencia propia.

Otro tema de importancia relacionado con la capacitación es el uso de equipo de protección personal adecuado para realizar la aplicación de plaguicidas en general, solo el 6.1 % de los entrevistados reporta haber utilizado 3 equipos (respirador, guantes y botas), el 16.32 % utilizaron 2 equipos (respirador, guantes, botas y overol en alguna de sus combinaciones) y 12.2 % reportaron usar solo 1 equipo de protección (respirador, lentes, guantes o botas). Cabe señalar que prácticamente ningún productor usa un equipo de protección completo para la aplicación de plaguicidas. Valenzuela reporta en 2019 un porcentaje mayor de productores capacitados (40%) en la región de Torreón, Coahuila, además de reportar que el 100% de los entrevistados no usa ningún equipo de protección personal.

Tabla 10 Equipo de protección personal utilizado por los productores entrevistados. $n=49$

Equipo de protección personal	Productores reportan utilizarlo	Equipo de protección personal	Productores reportan utilizarlo
Ninguno	65.3 %	Guantes	2 %
Respirador	6.2 %	Guantes y Botas	2 %
Respirador y Botas	4 %	Botas	4 %
Respirador y Guantes	2 %	Botas y Lentes	2 %
Respirador, Botas y Guantes	6.12 %	Lentes	2 %
Overol y Respirador	2 %	Overol y Botas	2 %

8.1.5. Riesgo de intoxicación por uso de plaguicidas

El 34.6 % de los entrevistados reportan haber sufrido algún tipo de intoxicación al menos en alguna ocasión después de haber aplicado algún tipo de plaguicida, de los principales malestares reportados son: dolor de cabeza (29 %), mareo con vomito (24 %), mareo (18 %), dermatitis (12 %), alergia (12 %) y mareo con alergia (6 %). Adicional los productores reportaron que las intoxicaciones han sido en más de una ocasión, 3 ocasiones en promedio, con un rango desde 1 ocasión hasta 10 ocasiones.

8.1.6. Riesgo ambiental por uso de plaguicidas

Uno de los aspectos más importantes a conocer es el potencial riesgo ambiental ocasionado por el manejo de plaguicidas, el 40.81 % de los 49 productores reportan contar con un lugar destinado para el almacenaje de sus agroquímicos, el 6.12 % cuentan con un lugar destinado a la preparación de las mezclas y el 22.4 % cuentan con ambos, mientras que el resto (30.16%) no cuenta con ningún lugar asignado.

Otro tema de interés es la disposición de los envases vacíos después de usarlos, el 63 % de los productores opta por quemar los envases en el campo, 18.36% elige dejarlos en el campo, 16.32 % decide tirarlos junto con la basura común y solo el 2% reporta que los canaliza con un centro de acopio de envases.

Por último, se les preguntó a los productores si conocen o tienen alguna noción del daño que pueden ocasionar los agroquímicos que manejan al medio ambiente, 63.2 % afirmó conocer o estar consciente del peligro de los agroquímicos que utilizan y el daño que pueden ocasionar al medio ambiente, mientras que el resto (36.73 %) afirma no tener idea alguna.

8.1.7. Análisis de componentes principales (ACP)

De acuerdo al ACP el 63,61 % de la variabilidad acumulada es explicada por los primeros 3 componentes (Tabla 11).

Tabla 11 Tabla de valores propios del ACP, donde F1 a F3 son los componentes principales que explican las variables de estudio de la encuesta.

	F1	F2	F3
Valor propio	3,197	2,339	2,098
Variabilidad (%)	26,642	19,490	17,481
% acumulado	26,642	46,132	63,613

Dentro del primer componente (F1) se encuentran las variables relacionadas con mayor peso positivo que son: x_1 , la edad; x_2 escolaridad en años y x_{12} : conocimiento de los daños al ambiente, lo que indica que los productores con mayor edad y años

de estudio poseen más conocimientos sobre el daño al ambiente que ocasionan la aplicación de los herbicidas que utilizan (Tabla 12). En el componente 2 (F2) las variables con mayor peso son: x₉: Frecuencia de aplicación de Paraquat al año; x₃: Experiencia laborando en el campo; x₅: Concentración de Paraquat; x₈: Forma de aplicación de Paraquat y x₁₁: Frecuencia de intoxicación, lo anterior podría referir a que mientras más años han pasado laborando en el campo han elegido por aplicar los herbicidas ellos mismos, incrementando la frecuencia de aplicación por año y la concentración utilizada de Paraquat, lo que también ha llevado a un número mayor de intoxicaciones por el uso del herbicida. En el tercer componente (F3) las variables con mayor peso positivo son: x₇: Concentración de Paraquat por Hectárea; x₅: Concentración de Paraquat; x₄: Extensión cultivada y x₁: Edad, lo que indica que al tener mayor extensión de área para cultivo los productores mayores optan por incrementar las concentraciones de Paraquat y la concentración por Hectárea.

Tabla 12 Matriz de componentes principales para la asociación de variables

Variables	Componentes		
	F1	F2	F3
x ₁ : Edad	0,245	-0,039	0,333
x ₂ : Escolaridad en años	0,319	-0,003	0,296
x ₃ : Experiencia laborando en el campo	-0,256	0,464	-0,025
x ₄ : Extensión cultivada	-0,332	-0,165	0,330
x ₅ : Concentración de Paraquat	0,047	0,372	0,403
x ₆ : Cantidad de tanques por Hectárea	-0,395	-0,217	0,241
x ₇ : Concentración de Paraquat por Hectárea	-0,342	-0,019	0,458
x ₈ : Forma de aplicación de Paraquat	-0,192	0,337	0,255
x ₉ : Frecuencia de aplicación de Paraquat al año	0,025	0,580	-0,080
x ₁₀ : Uso de regulador de pH	-0,331	0,043	-0,380
x ₁₁ : Frecuencia de intoxicación	-0,042	0,332	-0,140
x ₁₂ : Conocimiento de daños ocasionados al ambiente	0,488	0,089	0,163

Del ACP también se obtuvo la matriz de correlación de Pearson (Tabla 13) donde se muestran las relaciones entre las variables que pueden tener una correlación positiva, nula o negativa. Entre la relación de variables se pueden identificar aquellas en las que existe una asociación estadísticamente significativa ($p < 0.05$) las cuales son:

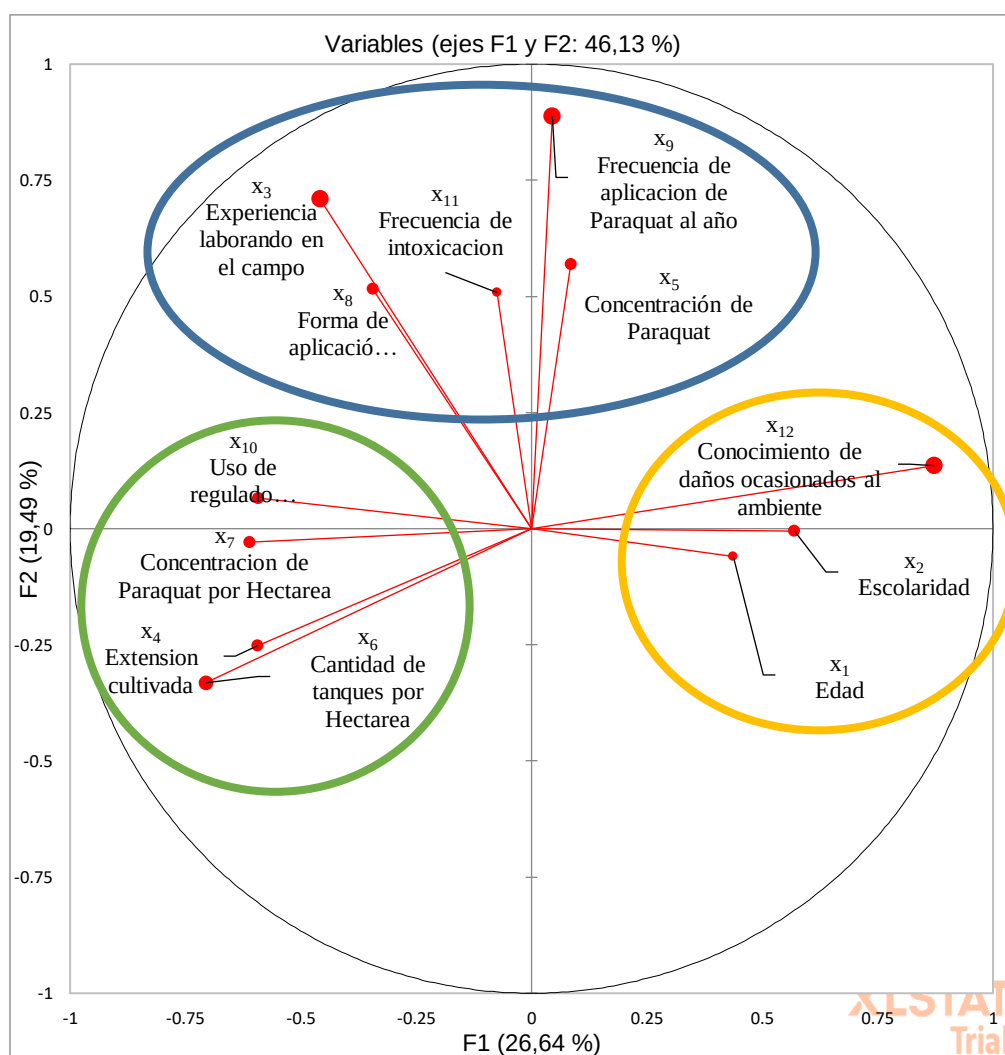
- Una asociación positiva alta entre la variable x_3 (experiencia laborando en el campo) y la variable x_9 (frecuencia de aplicación de Paraquat al año).
- Una asociación positiva alta entre la variable x_6 (cantidad de tanques por Hectárea) y la variable x_7 (concentración de Paraquat por Hectárea).
- Una asociación positiva moderada entre la variable x_4 (extensión cultivada) y la variable x_7 (concentración de Paraquat por Hectárea).
- Una asociación negativa alta entre la variable x_{10} (uso de regulador de pH) y la variable x_{12} (conocimiento de daños ocasionados al ambiente).

Tabla 13 Matriz de correlación de Pearson del ACP, las celdas sombreadas corresponden a aquellas correlaciones con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12
x1	1	0,440	-0,303	-0,098	0,166	-0,131	-0,081	0,274	-0,090	-0,267	-0,227	0,321
x2	0,440	1	-0,101	-0,320	0,199	-0,108	0,011	-0,149	0,043	-0,373	-0,284	0,506
x3	-0,303	-0,101	1	-0,034	0,287	0,233	0,321	0,249	0,606	0,333	0,377	-0,248
x4	-0,098	-0,320	-0,034	1	0,036	0,489	0,520	0,385	-0,252	-0,134	-0,139	-0,436
x5	0,166	0,199	0,287	0,036	1	-0,199	0,319	0,469	0,234	-0,263	0,110	0,242
x6	-0,131	-0,108	0,233	0,489	-0,199	1	0,845	-0,039	-0,312	0,170	-0,018	-0,460
x7	-0,081	0,011	0,321	0,520	0,319	0,845	1	0,202	-0,147	-0,047	0,048	-0,271
x8	0,274	-0,149	0,249	0,385	0,469	-0,039	0,202	1	0,474	0,200	-0,068	-0,342
x9	-0,090	0,043	0,606	-0,252	0,234	-0,312	-0,147	0,474	1	0,051	0,357	0,151
x10	-0,267	-0,373	0,333	-0,134	-0,263	0,170	-0,047	0,200	0,051	1	-0,064	-0,829
x11	-0,227	-0,284	0,377	-0,139	0,110	-0,018	0,048	-0,068	0,357	-0,064	1	0,134
x12	0,321	0,506	-0,248	-0,436	0,242	-0,460	-0,271	-0,342	0,151	-0,829	0,134	1

En la gráfica del círculo de correlación (Figura 6) se pueden observar las relaciones entre las variables y los ejes que representa a los componentes F1 y F2 los cuales en su conjunto representan el 46.13 % de la información contenida inicial. Se logran identificar tres agrupaciones de vectores: el círculo de color verde indica la correlación existente entre las variables x_4 , x_6 , x_7 y x_{10} ; el círculo amarillo indica la correlación existente entre las variables x_1 , x_2 y x_{12} ; así mismo estos grupos de variables se encuentran más cercanas al eje del componente principal F1 el cual as explica mejor. El siguiente grupo de vectores encerrado en el círculo color azul agrupa las variables x_3 , x_5 , x_8 , x_9 y x_{11} ; a su vez que se encuentran más cercanas al componente principal F2 en su parte positiva el cual las explica mejor.

Figura 7 Gráfica de círculo de correlación entre variables y de correlación entre variables con los compontes F1 y F2.



8.2. Identificación de las características del tipo de suelo

8.2.1. Determinación de granulometría de tierra

Se determinaron dentro de las 46 muestras de tierra procesadas 7 grupos texturales de suelo: franco arenoso (43.47 %), franco limoso (30.46 %), franco (15.21 %) franco limoso arcilloso (4.34 %), franco arcilloso arenoso (2.17 %), franco arcilloso (2.17 %), arcilla (2.17 %), lo que demuestra la variedad de los tipos de suelo existentes entre los municipios (Tabla 14).

Tabla 14 Grupos texturales de suelo identificados en las diferentes locaciones.

Grupo textural	Cotaxtla	Tlalixcoyan	Medellín	General
Franco arenoso	1	3	16	43.47 %
Franco limoso	2	6	6	30.46 %
Franco	3	3	1	15.21 %
Franco limoso arcilloso	-	2	-	4.34 %
Franco arcilloso arenoso	-	-	1	2.17%
Franco arcilloso	-	-	1	2.17 %
Arcilla	-	1	-	2.17 %
Total	6	15	25	

8.2.2. Análisis de componentes principales (ACP) de los suelos con arcillas

Se realizó un ACP para identificar aquellas características del suelo en las que existiera una mayor adsorción del Paraquat y tener un alto riesgo de lixiviación hacia los cuerpos de agua subterráneos. Se asignaron las siguientes variables: a1: Concentración de Paraquat; a2: pH de suelo; a3: Carbono Orgánico (%); a4: Materia Orgánica (5); a5: Grupo textural de suelo y a6: % de arcillas en el suelo. Se obtuvo la matriz de correlación de Pearson (Tabla 15) donde se observa con un nivel de significancia ($p \leq 0.05$) que existe una correlación positiva moderada entre la variable a2: Concentración de Paraquat y la variable a7: % de arcillas en el suelo.

Tabla 15 Matriz de correlación de Pearson entre concentración de Paraquat usada por productores y los parámetros fisicoquímicos del suelo, las celdas sombreadas indican aquellas en que la correlación es estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$)

Variables	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₂ : Concentración de Paraquat	1	0,184	0,159	0,160	-0,022	0,524
a ₃ : pH de suelo	0,184	1	-0,199	-0,203	0,063	0,252
a ₄ : Carbono orgánico (%)	0,159	-0,199	1	1,000	0,472	0,371
a ₅ : Materia orgánica (%)	0,160	-0,203	1,000	1	0,468	0,372
a ₆ : Grupo textural del suelo	-0,022	0,063	0,472	0,468	1	0,207
a ₇ : % de arcillas en suelo	0,524	0,252	0,371	0,372	0,207	1

Esta correlación positiva entre las concentraciones de Paraquat y los suelos con alto porcentaje de arcillas concuerda con lo reportado por Crampon *et.al.* en 2014 quienes encontraron las mayores concentraciones de Paraquat en suelo de una zona de cultivo de arroz en Nigeria en aquellas muestras donde la cantidad de arcillas era menor, utilizaron la técnica de HPLC para medir directamente la concentración de Paraquat mientras que en este trabajo se identificó de forma indirecta por medio de la entrevista realizada al productor.

8.2.3. Análisis de componentes principales de los parámetros fisicoquímicos

Del ACP se determinan 3 componentes principales (F1, F2 y F3) los cuales acumulan el 76,19 % de la variabilidad de los datos (Tabla 16).

Tabla 16 Tabla de valores propios del ACP, donde F1 a F3 son los componentes principales que explican las variables de los parámetros fisicoquímicos de agua y su relación con las concentraciones de herbicida utilizadas.

	F1	F2	F3
Valor propio	3,914	2,594	1,112
Variabilidad (%)	39,144	25,935	11,120
% acumulado	39,144	65,079	76,199

Dentro del primer componente (F1) las variables con mayor valor son: X₁₃: pH de agua, X₁₈: pH de tierra, X₁₉: Carbono orgánico de tierra y X₁₇: Nitratos de agua lo cual indica la estrecha relación entre los parámetros físico químicos y una relación moderada solo con la variable X₇: Concentración de herbicida por Hectárea. El segundo componente (F2) explica mejor las variables X₁₄: Conductividad de agua y X₁₅: Solidos suspendidos totales de agua las cuales ayudan a explicar también los datos.

Tabla 17 Matriz de componentes principales para la asociación de variables

Variables	Componentes		
	F1	F2	F3
X ₆ : Tanques por Hectárea	-0,209	-0,148	-0,028
X ₇ : Concentración de herbicida por Hectárea	0,228	-0,339	-0,395
X ₁₃ : pH de agua	0,419	-0,110	-0,175
X ₁₄ : Conductividad de agua	0,173	0,518	-0,337
X ₁₅ : Solidos suspendidos totales de agua	0,172	0,517	-0,338
X ₁₆ : Nitritos de agua	0,308	-0,384	-0,074
X ₁₇ : Nitratos de agua	0,349	-0,340	-0,088
X ₁₈ : pH de tierra	0,393	0,097	-0,185
X ₁₉ : Carbono orgánico de tierra	0,392	0,124	0,510
X ₂₀ : Materia orgánica de tierra	0,381	0,167	0,527

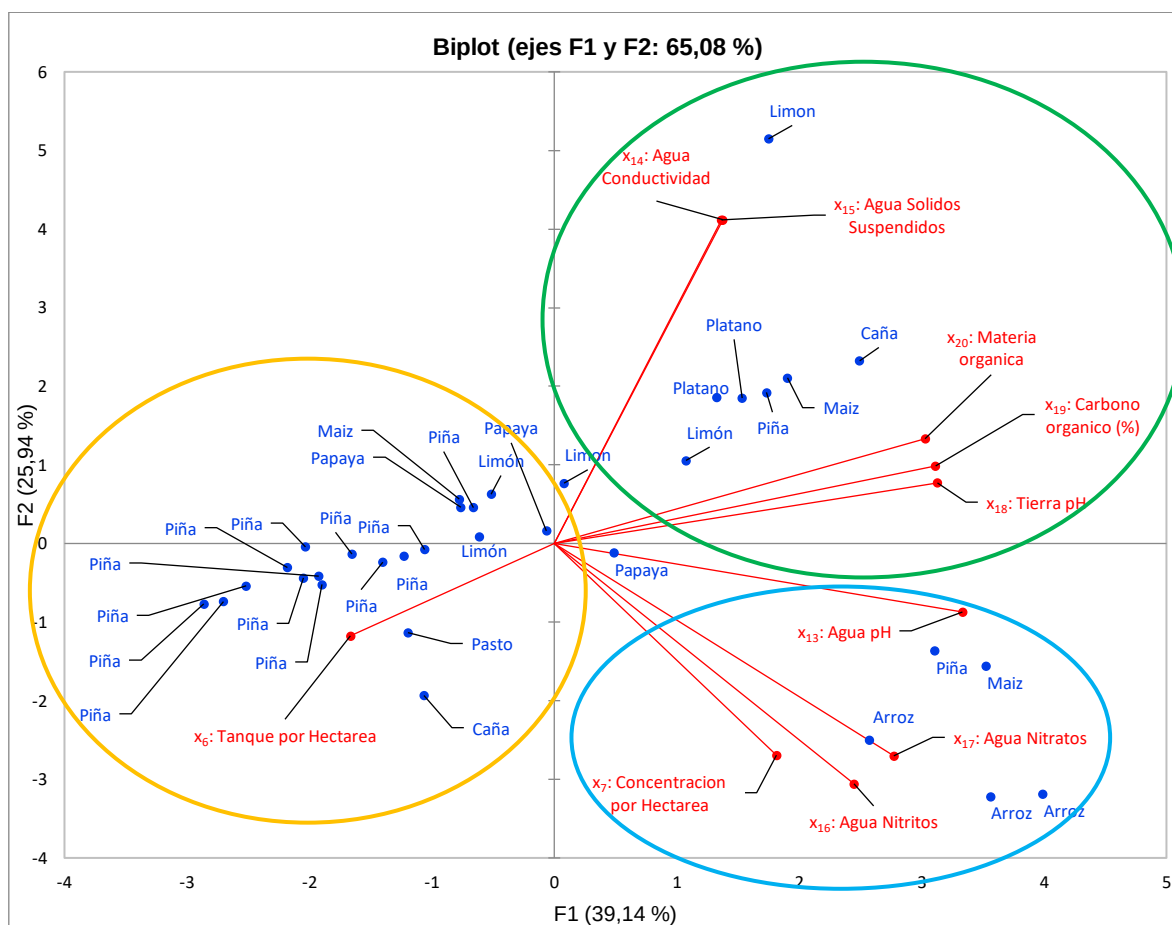
Del ACP también se obtuvo la matriz de correlación de Pearson (Tabla 18) donde se muestran las relaciones entre las variables que pueden tener una correlación positiva, nula o negativa. Es de esperarse que exista una fuerte correlación entre los parámetros físico químicos, pero solo se estudiaran aquellos parámetros que tienen relación con las prácticas de uso y manejo de los herbicidas. Entre la relación de variables se pueden identificar aquellas en las que existe una asociación estadísticamente significativa ($p < 0.05$) las cuales son:

- Una asociación positiva moderada entre la variable x_7 (Concentración de herbicida por Hectárea) y la variable x_{13} (pH de agua); entre la variable x_7 (Concentración de herbicida por Hectárea) y la variable x_{16} (Nitritos de agua); entre la variable x_7 (Concentración de herbicida por Hectárea) y la variable x_{17} (Nitratos de agua).
- Una asociación negativa moderada entre la variable x_6 (Tanques por Hectárea) y la variable x_{18} (pH de tierra).

Tabla 18 Matriz de correlación de Pearson del ACP, las celdas sombreadas corresponden a aquellas correlaciones con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

Variable	X6	X7	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20
X6	1	0,046	-0,173	-0,210	-0,203	-0,102	-0,169	-0,479	-0,243	-0,270
X7	0,046	1	0,540	-0,155	-0,156	0,491	0,508	0,285	0,125	0,032
X13	-0,173	0,540	1	0,169	0,168	0,517	0,588	0,653	0,519	0,472
X14	-0,210	-0,155	0,169	1	1,000	-0,211	-0,124	0,352	0,265	0,315
X15	-0,203	-0,156	0,168	1,000	1	-0,212	-0,125	0,348	0,262	0,313
X16	-0,102	0,491	0,517	-0,211	-0,212	1	0,858	0,315	0,247	0,263
X17	-0,169	0,508	0,588	-0,124	-0,125	0,858	1	0,370	0,363	0,288
X18	-0,479	0,285	0,653	0,352	0,348	0,315	0,370	1	0,472	0,463
X19	-0,243	0,125	0,519	0,265	0,262	0,247	0,363	0,472	1	0,960
X20	-0,270	0,032	0,472	0,315	0,313	0,263	0,288	0,463	0,960	1

Figura 8 Gráfica de correlación de variables y su coincidencia con diferentes tipos de cultivo



Así mismo la correlación se puede observar en la gráfica de círculo de correlación (figura 7), donde también se pueden apreciar las formaciones de ciertos grupos que obedecen al tipo de cultivo. Principalmente los cultivos de piña, agrupados dentro del círculo amarillo, demandan una carga mayor de herbicidas por hectárea, y los valores de pH tienden a ser menor lo que indica una acidificación del suelo.

Los cultivos de arroz, agrupados dentro del círculo azul, demandan una concentración mayor por Hectárea final, esto puede obedecer a que el cultivo demanda preparaciones de diferentes tipos de herbicidas dentro de una misma mezcla lo que elevan la concentración, aunque se utilicen menos tanques por hectárea, a su vez el tipo de riego podría influir en la cantidad de nitritos y nitratos presentes en el agua.

8.3. Determinación de la mortalidad aguda en juveniles de *O. niloticus* y *M. olfersii*

8.3.1. Determinación de la CL₅₀ en *O. niloticus*

No se observó ningún cambio en la apariencia de los organismos durante las 96 horas de duración del bioensayo, en cuestión del comportamiento se observó un movimiento mínimo y pérdida del eje de nado (nado repentino boca arriba) en los organismos de las concentraciones de 40 y 80 µl/L, comparándolo con los organismos de las concentraciones más bajas y del control negativo donde se observó un nado normal. Solo en la concentración más alta (80 µl/L) fue donde se registró una mortalidad del 100% (Tabla 19).

Mediante el análisis Probit se determinó una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre la respuesta (mortalidad) y las diferentes concentraciones de cada tratamiento. El mismo análisis reportó, una CL₅₀ de Dasurquat® en tilapia *O. niloticus* a 96 horas de 17,49 µl/L, su intervalo de confianza a 95% con límite inferior de 13,75 µl/L y límite superior 22,25 µl/L. (Figura 8).

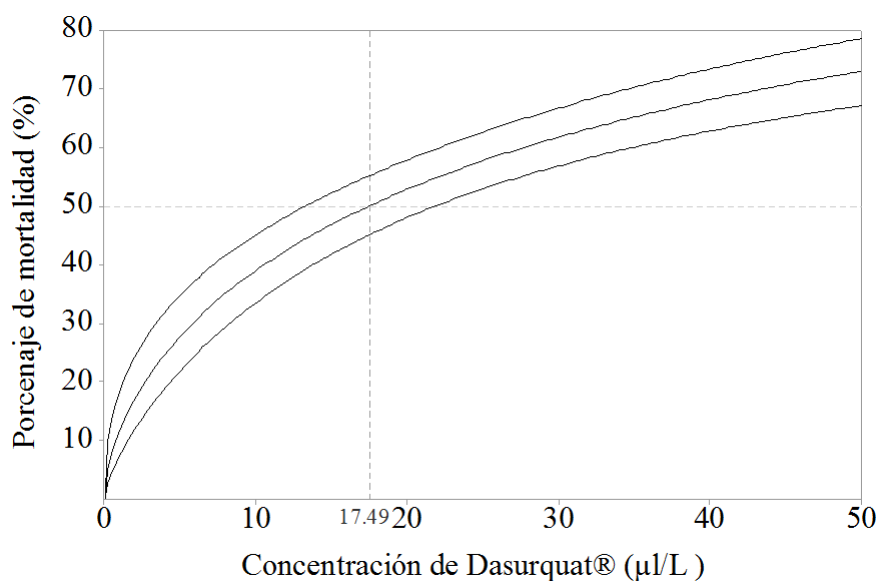
Se espera con una confiabilidad del 95% una mortalidad de la mitad de organismos de la especie *O. niloticus* expuestos a un rango de concentraciones de entre 13,75 µl/L y 22,25 µl/L del herbicida Dasurquat® cuyo ingrediente activo es Paraquat al 25%.

La CL₅₀ determinada para *O. niloticus* (17,49 µl/L) se encuentra dentro del rango de concentraciones de entre 7,5 hasta 100 ppm reportada por Eisler (1990) quien reportó la CL₅₀ de Paraquat en forma de catión (1,1-dimetil-4,4-bipiridilo) a 96 horas en peces: *Brachydanio rerio* entre 7,5 y 48,5 mg/L, *Lepomis macrochirus* = 13 mg/L, *Poecilia reticulata* entre 15 y 22 mg/L, *Oncorhynchus mykiss* entre 15 y 32 mg/L, *Salmo trutta* = 25 mg/L, *Ictalurus punctatus* >100 mg/L. Por otra parte, Vargas Rincón (2010) reportó una CL₅₀ de 32,83 µl/L a 96 horas de exposición, pero utilizando la marca comercial Gramoxone® (27% de ingrediente activo Paraquat) en juveniles de peces de la especie *Hemigrammus rhodostomus*. Independientemente de si se trata del ingrediente activo (catión Paraquat) o de una forma comercial se demuestra la alta toxicidad de este herbicida para peces.

Tabla 19 Mortalidad acumulada (%) a 96 horas de bioensayos con tilapia *O. Niloticus* realizados en diferentes fechas.

Fecha inicial	Fecha final	Concentración de Dasurquat® en µl/L					
		0	5	10	20	40	80
22-09-19	26-09-19	0	50	40	40	80	70
22-09-19	26-09-19	0	30	60	50	70	90
22-09-19	26-09-19	0	40	20	30	90	80
26-09-19	30-09-19	0	10	30	30	40	70
26-09-19	30-09-19	0	30	40	60	60	70
26-09-19	30-09-19	0	10	40	40	50	60
14-10-19	18-10-19	0	40	50	80	70	100
14-10-19	18-10-19	0	20	30	70	80	100
14-10-19	18-10-19	0	30	40	50	90	100

Figura 9 Concentración Letal Media (CL₅₀) de Dasurquat® en tilapia *O. niloticus* a 96 horas con intervalos de confianza superior e inferior de 95%



8.3.2. Determinación de la CL₅₀ en *M. olfersii*

No se observó cambio en la apariencia ni en el comportamiento de los organismos expuestos, se contabilizaron 14 mudas de caparazón distribuidas en todos los contenedores incluido en el control negativo, la concentración más alta (1 µl/L) fue la única donde la mortalidad alcanzó el 100% (Tabla 20).

Tabla 20 Mortalidad acumulada (%) a 96 horas de bioensayos con langostino *M. olfersii* realizados en diferentes fechas

Fecha inicial	Fecha final	Concentración de Dasurquat® en µl/L					
		0	0,1	0,2	0,5	0,7	1
08-12-19	12-12-19	0	20	40	70	80	100
08-12-19	12-12-19	0	20	40	80	60	100
08-12-19	12-12-19	0	10	30	70	80	90
13-12-19	17-12-19	0	20	50	80	90	90
13-12-19	17-12-19	0	20	40	80	90	100
13-12-19	17-12-19	0	10	30	70	80	100
17-12-19	21-12-19	0	10	20	70	80	100
17-12-19	21-12-19	0	10	30	60	80	100

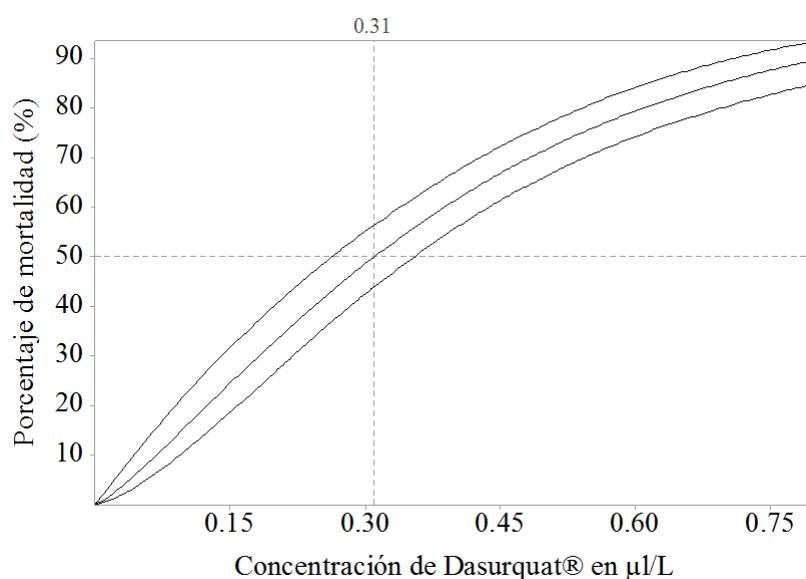
De igual forma que lo encontrado con *O. niloticus*, se encontró significancia ($p < 0.05$) entre la respuesta (mortalidad) y las diferentes concentraciones de cada tratamiento utilizado para *M. olfersii*. Se determinó la CL₅₀ de Dasurquat® en langostino *M. Olfersii* a 96 horas de 0,31 µl/L, su intervalo de confianza a 95% con límite inferior de 0,26 µl/L y límite superior 0,35 µl/L (Figura 9). Se espera con una confiabilidad del 95% una mortalidad de la mitad de organismos de la especie *M. Olfersii* expuestos a un rango de concentraciones de entre 0,26 µl/L y 0,35 µl/L del herbicida Dasurquat® cuyo ingrediente activo es Paraquat al 25%.

El langostino *M. olfersii* mostró una mayor sensibilidad al herbicida al reportar una CL₅₀ casi 56 veces más baja que la determinada para *O. niloticus*.

El riesgo toxicológico potencial del herbicida Paraquat para actividades como la acuicultura es muy alto, tomando de referencia el valor de la CL₅₀ reportada,

bastaría con añadir 174,9 ml de herbicida Dasurquat en un tanque de cultivo de tilapia *O. niloticus* de 10,000 L para poner en riesgo al 50% de los organismos que ahí se cultivan, y tan solo 3,1 ml si el tanque contuviera langostinos *M. olfersii*.

Figura 10 Concentración Letal Media (CL₅₀) de Dasurquat® en langostino *M. olfersii* a 96 horas con intervalos de confianza superior e inferior de 95%



8.4. Comparativa entre concentraciones de Paraquat reportadas en campo y reportadas en laboratorio.

La concentración promedio del herbicida Paraquat reportada por los productores agrícolas es de 10,000 µL/L, comparando directamente dicha concentración con la CL₅₀ encontrada en el bioensayo definitivo realizado con tilapia *O. niloticus* (17,49 µl/L) resulta ser una concentración cerca de 571 veces superior y comparándolo con la CL5 reportada en laboratorio durante el bioensayo con *M. olfersii* (0,31 µl/L) resulta ser de 32,200 veces mayor, lo que demuestra la toxicidad de este herbicida para organismos acuáticos.

9. CONCLUSIONES

9.1. Fase 1

Los productores agrícolas de la zona centro del estado de Veracruz, son personas de edad avanzada (mayores de 60 años), mientras más tiempo de su vida han dedicado al trabajo en campo menor es su grado de estudios. Los cultivos principales que cultivan obedecen más a la región donde se ubiquen que a otras prácticas agrícolas; en su mayoría optan por no tecnificar sus sistemas de riego.

Contrario con la tendencia mundial sobre el uso de Paraquat, este herbicida no es ampliamente utilizado, a pesar de conocer su existencia y de tener un bajo costo, los productores utilizan una amplia gama de herbicidas obedeciendo a sus conocimientos empíricos y experiencia propia sobre el uso de estos. Además, el rango de opiniones de los productores sobre el rendimiento del Paraquat es muy amplio, desde la buena aceptación por su alta eficiencia en el control de hierbas hasta optar no usarlo por el daño significativo que ocasiona a sus cultivos principales. El rezago en la capacitación recibida sobre el uso de plaguicidas es evidente, viéndose reflejado en el uso de concentraciones de herbicida muy superiores a las recomendadas, en la falta de uso de equipo de protección personal adecuado y en la alta frecuencia de intoxicaciones sufridas por el uso de herbicidas.

9.2. Fase 2

Los parámetros físico químicos del suelo y del agua de las zonas agrícolas son alterados por el intenso uso de herbicidas, lo que conlleva a un riesgo potencial para el ambiente, en base a los resultados obtenidos se demostró que el uso de altas concentraciones de herbicida por hectárea baja los valores de pH del suelo, lo que se interpreta como acidificación del suelo. El riesgo de contaminación de aguas subterráneas es alto cuando no se toman en cuenta las características del suelo para elegir la cantidad ideal de herbicida para aplicar.

9.3. Fase 3

El herbicida Paraquat demostró ser altamente toxico para tilapias y langostinos, en conjunto con el uso de este herbicida en las zonas agrícolas, representan un riesgo para estas especies acuáticas. Una capacitación pronta y oportuna a los productores agrícolas es necesaria para prevenir futuros problemas ambientales.

REFERENCIAS

- Abrego D, Agudo K, Buitrago N, Rodríguez A, Torres K, Vega I, *et al.* Análisis de las curvas de escorrentías mediante el software Surfer 13. *Rev Inic Cient.* 2018;4(1):19-22. Doi: <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.1.1862>
- Albert LA. Panorama de los plaguicidas en México. *Rev Toxicol Lín.* 2006;8:1-17.
- Alza WR, García JM, Chaparro SP. Determinación voltamétrica de Paraquat y glifosato en aguas superficiales. *Corpoica Cien Tecnol Agropecu.* 2016;17(3):331-345. Doi: http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:510.
- Arellano O, Betancourt M, Aguilar G, de León CP. Agrochemical loading in drains and rivers and its connection with pollution in coastal lagoons of the Mexican Pacific. *Environ Monit Assess.* 2017;189(6):270. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5981-8>
- Bajwa A. Sustainable weed management in conservation agriculture. *Crop Prot.* 2014;65:105-113. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.07.014>
- Bauer CA, Dial NA. Lethal effects of the consumption of field levels of paraquat-contaminated plants on frog tadpoles. *Bull Environ Contam Toxicol.* 1995;55:870-877. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF00209467>
- Bórtoli PV, Verdenelli RA, Conforto C, Vargas S, Meriles JM. Efectos del herbicida glifosato sobre la estructura y el funcionamiento de comunidades microbianas de dos suelos de plantaciones de olivo. *Ecol Austral.* 2012;22(1):33-42.
- Bromilow RH. Paraquat and sustainable agriculture. *Pest Manag Sci.* 2004;60(4):340-349. Doi: <https://doi.org/10.1002/ps.823>
- Bus JS, Aust SD, Gibson JE. Superoxide-and singlet oxygen-catalyzed lipid peroxidation as a possible mechanism for paraquat (methyl viologen) toxicity. *Biochem Biophys Res Commun.* 1974;58(3):749-755. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0006-291X\(74\)80481-X](https://doi.org/10.1016/S0006-291X(74)80481-X)
- Camacho RL, Gerardo JL, Navarro KG, Sánchez JE. Producción de enzimas ligninolíticas durante la degradación del herbicida paraquat por hongos de la

podrición blanca. Rev Argent Microbio. 2017;49(2):189-196. Doi:
<https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.11.004>

Crampon, M, Copard, Y, Favreau, G, Raux, J, Merlet-Machour, N, Le Coz, M, *et al.*
Occurrence of 1, 1'-dimethyl-4, 4'-bipyridinium (Paraquat) in irrigated soil of the
Lake Chad Basin, Niger. Enviro Sci and Poll Res. 2014;21(18), 10601-10613.

Del Rosario, M, Alvariño, L, Lannacone, J. Toxicidad del fungicida kresoxim-metil
sobre siete bioindicadores de calidad ambiental. The Biologist. 2018;16(2).

Eisler R. Paraquat Hazards to Fish. Wildlife, and Invertebrates: A Synoptic. 1990
EPA, U. Ecological Effects Test Guidelines OPPTS 850.1075 Fish Acute Toxicity
Test, Freshwater and Marine. 1996

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
2006. Código Internacional de Conducta para la distribución y utilización de
plaguicidas. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0220s/a0220s00.pdf>.

Finney DJ . Probit analysis. 3 ed. Nueva York: Cambridge University Press; 1971.
p333

García MU, Becerril F, Vega F, Espinosa LD. Los langostinos del género
Macrobrachium con importancia económica y pesquera en América Latina:
conocimiento actual, rol ecológico y conservación. Lat Am J Aquat Res.
2013;41(4):651-675. Doi: <http://dx.doi.org/103856/vol41-issue4-fulltext-3>

García C, Rodríguez GD. Problemática y riesgo ambiental por el uso de
plaguicidas en Sinaloa. Ra Ximhai. 2012;8(3):1-10.

Gagneten AM. Efectos del herbicida paraquat sobre el zooplancton. Iheringia Ser
Zool. 2002;92(3):47-56.

Gay C, Estrada F, Conde AC, Eakin H. Impactos potenciales del Cambio Climático
en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz
(México). 2004

- Gómez RG. Efecto del control de malezas con paraquat y glifosato sobre la erosión y pérdida de nutrimentos del suelo en cafeto. *Agron Mesoam*. 2005;16(1):77-87.
- Hernández A, Hansen AM. Uso de plaguicidas en dos zonas agrícolas de México y evaluación de la contaminación de agua y sedimentos. *Rev Int Contami Ambient*. 2011;27(2): 115-127.
- Hernández H, Aguilar T, Cruz G, Velasco L, Martínez A. Uso de plaguicidas en el cultivo de maíz en zonas rurales del Estado de Oaxaca, México. *Revista de Salud Ambiental*. 2019;19(1), 23-31.
- Martínez L, Madrigal E, Negrete T. Genotoxicity and lipoperoxidation produced by paraquat and 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid in the gills of rainbow trout (*Oncorhynchus mikiss*). *Bull Environ Contam Toxicol*. 2004;73(1):146-152.
- Mascorro R, Ferguson B, Perales H, Charbonnier, F. Herbicidas en la milpa: Estrategias de aplicación y su impacto sobre el consumo de arvenses. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*. 2019;6(18), 477-486.
- Ortíz I, Avila MA, Torres LG. Plaguicidas en México: usos, riesgos y marco regulatorio. *Rev Latinoam Biotecnol Ambient Algal*. 2013;4(1):1-21.
- Rey JF, Otalvaro ÁM, Chaparro MP, Prieto L, López A. Residuos de plaguicidas organofosforados en la cadena productiva del brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) y coliflor (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) en Colombia: aproximación a un perfil de riesgo. *Rev Colomb Cienc Hortíc*. 2018;12(1):156-165. Doi: <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7352>
- Reyes M, Hondal O, Hernández J, Alemán, M. Toxicidad aguda del herbicida químico Glifosan en larvas de la rana cubana: *Osteopilus septentrionalis*. *Rev Toxicol En Línea*. 2003;16, 34-45.
- Salazar R, Rojano A, López IL. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnol Cien Agua*. 2014;5(2):177-183.
- Salazar NJ, Aldana ML. Herbicida glifosato: usos, toxicidad y regulación. *Biotecnia*. 2011;13(2):23-28. Doi: <http://dx.doi.org/10.18633/bt.v13i2.83>

Salazar VG, Viteri CE, Suarez LA. Características Físicas, Químicas y Microbiológicas del agua de consumo en las comunidades de Barcelona, Sinchal, Valdivia y San Pedro de la Parroquia Manglaralto. Provincia de Santa Elena, 2013. Rev Cient Investig Actualiz Mundo Cienc. 2019;2(1):690-713

Saha A, Gajbhiye VT, Gupta S, Kumar R, Ghosh RK. Simultaneous removal of pesticides from water by rice husk ash: Batch and column studies. Water Environ Res. 2014;86(11):2176-2185. Doi: <https://doi.org/10.2175/106143014X14062131178358>

Tanaka R, Amano Y. Genotoxic effects of paraquat and diquat evaluated by sister-chromatid exchange, chromosomal aberration and cell-cycle rate. Toxicol In Vitro. 1989;3(1):53-57. Doi: [https://doi.org/10.1016/0887-2333\(89\)90024-6](https://doi.org/10.1016/0887-2333(89)90024-6)

Vismara C, Battista V, Vailati G, Bacchetta R. Paraquat induced embryotoxicity on *Xenopus laevis* development. Aquat Toxicol. 2000;49(3):171-179. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0166-445X\(99\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0166-445X(99)00080-6)