



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

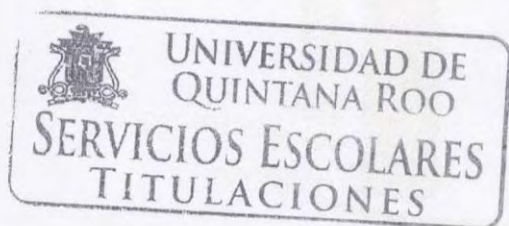
**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN LETAL
MEDIA (CL₅₀) DEL MALATIÓN Y CLORPIRIFÓS-ETIL EN
ORGANISMOS DE *Capitella cf. capitata* DE LA BAHÍA DE
CHETUMAL**

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA
ARMANDO CALDERÓN RUIZ

DIRECTOR
DR. VÍCTOR HUGO DELGADO BLAS

ASESORES
DR. ADRIÁN CERVANTES MARTÍNEZ
M.C. JENNIFER DENISSE RUIZ RAMÍREZ
M.C. RUSSEL GIOVANNI UC PERAZA
DRA. NORMA ANGÉLICA OROPEZA GARCÍA



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, ABRIL DE 2017



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**TRABAJO DE TESIS ELABORADO BAJO LA SUPERVISIÓN DEL
COMITÉ DE TESIS DEL PROGRAMA DE LICENCIATURA Y
APROBADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:**

INGENIERO AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS



DIRECTOR:



DR. VÍCTOR HUGO DELGADO BLAS

ASESOR:



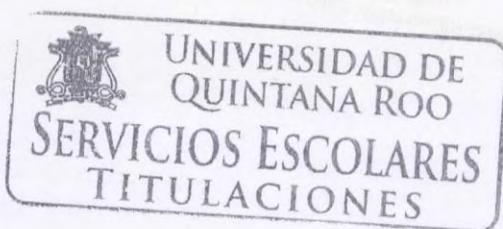
DR. ADRIÁN CERVANTES MARTÍNEZ

ASESOR:



M.C. JENNIFER DENISSE RUIZ RAMÍREZ

CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, ABRIL DE 2017.



RESUMEN

Se determinó experimentalmente la toxicidad de los plaguicidas malatión y clorpirifós-etil en sus formulaciones comerciales Malation 500[®] y Tyson 4E[®] respectivamente, empleando como organismo de prueba a *Capitella cf. capitata* recolectado de la Bahía de Chetumal y aclimatado en laboratorio. Para ello, se realizaron bioensayos de toxicidad estáticos a 48 h utilizando 5 concentraciones nominales distribuidas con una escala logarítmica, 3 réplicas y un control por cada cámara de bioensayos; se expusieron 10 organismos en cada concentración en cristalizadores con una capa de sedimento en el fondo, solución salina y su respectivo volumen del plaguicida. Se realizaron lecturas de mortalidad y se determinaron las concentraciones letales medias (CL₅₀) mediante el método Probit con un intervalo de confianza de 95 %. Así, las CL₅₀ obtenidas fueron de 27.79 ± 2.67 mg/L para el malatión y 7.46 ± 1.59 mg/L para el clorpirifós-etil, con lo cual se comprueba que éste último es más tóxico. El análisis estadístico ANOVA demostró que existen diferencias significativas entre las distintas concentraciones (p < 0.05). El malatión se clasificó como tóxico y el clorpirifós-etil como altamente tóxico para *Capitella cf. capitata*. Los cocientes de riesgo de ambos plaguicidas (RQ < 1) indican que su riesgo ecológico es despreciable.

Palabras Clave: *poliquetos, bioensayos, plaguicidas, riesgo ecológico, toxicidad aguda.*

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
JUSTIFICACIÓN	8
OBJETIVOS	10
Objetivo general.....	10
Objetivos específicos.....	10
Preguntas de investigación.	10
Hipótesis.	10
MARCO TEÓRICO	11
Plaguicidas.....	11
Malatión	11
Clorpirifós-etil	13
Poliquetos	14
Capitélidos.....	14
Pruebas de toxicidad acuáticas.....	15
MATERIALES Y MÉTODOS	18
Método de Campo.	18
Laboratorio.....	19
Selección, identificación y aclimatación de los organismos.....	19
Preparación del sedimento.	20
Preparación del agua salina.	21
Preparación de la solución madre.	21
Preparación de las disoluciones de prueba.....	22
Preparación de los bioensayos.....	23
Realización de los bioensayos.....	24
Cálculo de la concentración letal media (CL ₅₀).....	25

Análisis estadístico.	25
Estimación del grado de toxicidad.....	26
Estimación del riesgo ecológico	26
RESULTADOS	28
Resultados de la cámara de bioensayos de malatión.	28
Parámetros fisicoquímicos de la cámara de bioensayos de malatión.	28
Mortalidad de organismos en la cámara de bioensayos de malatión.....	29
Valor Probit empírico asociado a los porcentajes de mortalidad y Log de las concentraciones de la cámara de bioensayos de malatión.	30
Concentración letal media del Malatión en <i>Capitella cf. capitata</i>	31
Análisis estadístico de la cámara de bioensayos del malatión.	33
Clasificación de toxicidad del malatión	37
Riesgo ecológico del malatión.	37
Resultados de la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil.....	37
Parámetros fisicoquímicos de la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil.	37
Mortalidad de organismos en la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil.	39
Valor Probit asociado a los porcentajes de mortalidad y Log de las concentraciones de la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil.	39
Concentración letal media del Clorpirifós-etil en <i>Capitella cf. capitata</i>	40
Análisis estadístico de la cámara de bioensayos del clorpirifós-etil.	43
Clasificación de toxicidad del clorpirifós-etil	47
Riesgo ecológico del Clorpirifós-etil.....	47
DISCUSIÓN	48
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXOS	65
Anexo 1. Pruebas exploratorias	65

Anexo 2. Parámetros fisicoquímicos de los bioensayos.....	66
Anexo 3. Resultados de las lecturas de mortalidad de las cámaras de bioensayos.	70
Anexo 4. Esquematización de las cámaras de bioensayos.....	72

INTRODUCCIÓN

Actualmente en México y todo el mundo se está incrementando el uso de muchos tipos de plaguicidas, los cuales representan un riesgo potencial hacia los ambientes acuáticos, llegando a ellos principalmente a través de la escorrentía superficial y lixiviación (Vryzas, 2008) y afectando a los organismos no-blanco como los peces y otros organismos (Ferrero *et al.*, 2001).

El malatión y el clorpirifós-etil son insecticidas del grupo de los organofosforados, los cuales a diferencia de los organoclorados se degradan de forma más rápida en el ambiente (Hassan *et al.*, 1993). Sin embargo, son de muy amplio espectro; su baja selectividad los vuelve peligrosos para la biota acuática en general, incluyendo organismos del plancton, necton y bentos. Estos agentes químicos son ampliamente utilizados para combatir una gran cantidad de plagas en diferentes cultivos, también son empleados como componente en insecticidas caseros y para aplicación urbana. Además, se encuentran entre los plaguicidas permitidos y más recomendados por la CENAPRECE (2016) para combatir las enfermedades transmitidas por vector, lo cual combinado con el aumento de enfermedades transmitidas por esta vía, resulta en una mayor aplicación de dichos plaguicidas en las ciudades.

La Bahía de Chetumal es un cuerpo de agua con condiciones estuarinas, ya que en ella se encuentra la desembocadura del Río Hondo. A lo largo de río se hallan zonas agrícolas, lo cual lo convierten en un medio de transporte para los plaguicidas. Igualmente se tiene la influencia de la ciudad de Chetumal, que debido a las campañas de fumigación que ahí se realizan en temporada de lluvias se le considera una posible fuente de malatión y clorpirifós-etil hacia dicho cuerpo de agua.

En los bioensayos de toxicidad aguda se miden las respuestas de los organismos a determinadas concentraciones de ciertos tóxicos, lo cual permite evaluar la concentración máxima permitida para exposiciones breves a los tóxicos mediante la obtención de la CL₅₀

(APHA, 1992). En el presente estudio, se evalúa la toxicidad de los plaguicidas antes mencionados en la especie de poliqueto *Capitella cf. capitata*.

Los poliquetos son una parte fundamental de las comunidades bénticas puesto que son los invertebrados más abundantes y representan la mayor biomasa de esos ambientes (Liñero Arana, 2009). *Capitella cf. capitata* domina los sedimentos enriquecidos orgánicamente y vive enterrado en ellos, alimentándose de la materia orgánica (García Garza, 2009).

ANTECEDENTES

Los bioensayos de toxicidad aguda han servido como herramienta para determinar los efectos y riesgos ecológicos que tienen sustancias específicas en ambientes acuáticos y marinos. Se han utilizado gran variedad de especies de prueba, siendo los peces y crustáceos los organismos más frecuentemente empleados.

No se tienen antecedentes locales de bioensayos para determinar la toxicidad del malatión y del clorpirifós-etil en poliquetos, sin embargo, durante las últimas cuatro décadas se han realizado varios estudios a nivel mundial con especies principalmente del plancton, necton y organismos que habitan la parte superficial del sedimento (epifauna). Mediante estos bioensayos, se ha determinado la CL₅₀ de malatión y clorpirifós-etil para distintos organismos, las cuales se encuentran sintetizadas en los **cuadros 1 y 2** respectivamente.

Los organismos de prueba más cercanos taxonómicamente a *Capitella capitata* que han sido utilizados en bioensayos con malatión y clorpirifós-etil son la clase Oligochaeta, los cuales provienen del mismo filo (Annelida) y al igual que los poliquetos son parte de la infauna.

CUADRO I. Valores de CL₅₀ del malatión en organismos acuáticos y marinos.

Organismo	CL ₅₀	Referencia
<i>Jordanella floridae</i> (pez)	349 µg/L a 96 h	Hermanutz, 1978
<i>Cyprinus carpio</i> (pez)	0.6 g/L a 96 h	Vitozzi & de Angelis, 1991
<i>Salmo gardnieri</i> (pez)	1.4 g/L a 96 h	Vitozzi & de Angelis, 1991
<i>Poecilla reticulata</i> (pez)	0.15 g/L a 96 h	Vitozzi & de Angelis, 1991
<i>Oreochromis niloticus</i> (pez)	2.59 mg/L a 48 h	Hassan <i>et al.</i> , 1993

<i>Cyprinus carpio</i> (pez)	18.65 mg/L a 48 h	Hassan <i>et al.</i> , 1993
<i>Moina macrocopa</i> (crustáceo planctónico)	10 µg/L a 72 h	Wong <i>et al.</i> , 1995
<i>Gammarus palustris</i> (crustáceo planctónico)	4.65 µg/L a 96 h	Leight & Van Dolah, 1999
<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> (oligoqueto)	69 µg/L a 96 h	Martínez Tabche <i>et al.</i> , 2001
<i>Chasmagnathus granulata</i> (crustáceo, cangrejo)	13 µg/L a 96 h	Ferrero <i>et al.</i> , 2001
Renacuajos de seis especies de ranas	1.3 – 5.9 mg/L a 16 días	Relyea, 2004
<i>Daphnia magna</i> (crustáceo planctónico)	0.90 µg/L a 48 h	Zongming Ren <i>et al.</i> , 2007
<i>Heteropneustes fossilis</i> (pez)	0.98 ppm a 96 h	Deka & Mahanta, 2012
<i>Hyphessobrycon eques</i> (pez)	3.04 mg/L a 48 h	Coleone <i>et al.</i> , 2014

CUADRO II. Valores de CL₅₀ del clorpirifós-etil en organismos acuáticos y marinos.

Organismo	CL₅₀	Referencia
<i>Ampelisca abdita</i> (crustáceo planctónico)	0.16 µg/L a 96 h	USEPA, 1986
<i>Palaemon macrodactylus</i> (crustáceo, camarón)	0.25 µg/L a 96 h	USEPA, 1986
Varias especies de peces de agua dulce	2.4 – 280 µg/L a 96 h	Murty, 1986
<i>Palaemonotes pugio</i> (crustáceo, camarón)	0.37 µg/L a 96 h	Key & Fulton, 1993

<i>Oziotelphusa senex senex</i> (cangrejo)	200 µg/L a 96 h	Radhakrishnaiah et al., 1995
<i>Daphnia magna</i> (crustáceo planctónico)	0.6 µg/L a 48 h	Moore et al., 1998
<i>Hyalella azteca</i> (crustáceo plantónico)	0.1 µg/L a 48 h	Moore et al., 1998
<i>Chironomus tentans</i> (larva de mosquito)	0.3 µg/L a 48 h	Moore et al., 1998
<i>Pimephales promelas</i> (pez)	162.7 µg/L a 48 h	Moore et al., 1998
<i>Gammarus palustris</i> (crustáceo planctónico)	0.30 µg/L a 96 h	Leight & Van Dolah, 1999
<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> (oligoqueto)	1703 µg/L a 24 h	Iannacone et al., 2000
<i>Spiralothelphusa hydrodroma</i> (cangrejo)	120 µg/L a 96 h	Senthilkumar et al., 2007
<i>Palaemonetes argentinus</i> (camarón)	0.49 µg/L a 96 h	Montagna & Collins, 2007
<i>Trichodactylus borellianus</i> (cangrejo)	114.57 µg/L a 48 h	Montagna, 2010

Los poliquetos han sido utilizados en bioensayos para monitorear compuestos tóxicos y como indicadores de ambientes perturbados (Ferrando *et al.*, 2010). Los capitélidos son los que mejor reflejan el grado de contaminación orgánica, en particular *Capitella capitata* Fabricius, 1780 fue una de las primeras especies designadas como indicadora de contaminación, por tener la capacidad de reproducirse y establecerse en condiciones muy adversas, en sedimentos con alta concentración de materia orgánica (García Garza, 2009). A nivel local, organismos de *Capitella sp. C* de la bahía de Chetumal fueron utilizados en bioensayos para evaluar la toxicidad aguda a 48 h de tres detergentes comerciales con sulfonatos de aquilbenceno de sodio lineal (LAS) como ingrediente activo, resultando que

los detergentes estudiados son sustancias de alto riesgo capaces de causar daños en la biota acuática y en particular a los organismos del sedimento (Uc Peraza y Delgado Blas, 2015).

No se ha realizado ningún estudio sobre la concentración y distribución de los plaguicidas organofosforados malatión y clorpirifós-etil en la bahía de Chetumal.

Solamente se encontró un antecedente de bioensayo de toxicidad con otro plaguicida en organismos de la familia Capitellidae, Reish (1980) menciona que los estudios de los efectos de plaguicidas en poliquetos han sido muy limitados. Sin embargo, a continuación se recopilan las CL₅₀ de dicha familia de poliquetos con algunas otras sustancias como los metales pesados, detergentes, petróleo crudo y el insecticida organofosforado metamidofos (Cuadro III).

CUADRO III. CL₅₀ de diferentes sustancias en organismos de la familia Capitellidae.

Organismo	Sustancia	CL₅₀	Referencia
<i>Capitella capitata</i>	Cromo hexavalente	0.28 mg/L a 28 días	Oshida & Reish, 1975
<i>Capitella capitata</i>	Petróleo crudo	8.47 mg/L a 24 h	Carr & Reish, 1977
<i>Capitella capitata</i>	Cromo	5 mg/L a 96 h	Reish, 1980
<i>Capitella capitata</i>	Cadmio	7.5 mg/L a 96 h	Reish, 1980
<i>Capitella capitata</i>	Cobre	0.2 mg/L a 96 h	Reish, 1980
<i>Capitella capitata</i>	Plomo	6.8 mg/L a 96 h	Reish, 1980
<i>Capitella capitata</i>	Mercurio	0.1 mg/L a 96 h	Reish, 1980
<i>Capitella capitata</i>	Zinc	3.5 mg/L a 96 h	Reish, 1980
<i>Capitella capitata</i>	Trióxido de cromo	5 mg/L a 96 h	Water Research Centre, 1984
Larva de <i>Capitella capitata</i>	Cloruro de mercurio	0.014 mg/L a 96 h	Eisler, 1987

Larva de <i>Capitella</i> sp Y	Cadmio	0.035 mg/L a 34 días	Méndez & Green- Ruiz, 2006
Larva de <i>Capitella</i> sp Y	Cobre	0.035 mg/L a 34 días	Méndez & Green- Ruiz, 2006
<i>Capitella</i> sp. Y	Metamidofos (insecticida organofosforado)	0.54 mg/g de sedimento seco a 16 días	Méndez <i>et al.</i> , 2008
<i>Capitella</i> sp. C	Tres detergentes comerciales	70.79 - 147.91 ppm a 48 h	Uc Peraza & Delgado Blas, 2015

JUSTIFICACIÓN

La Bahía de Chetumal es un cuerpo de agua que recibe cantidades considerables de contaminantes de distintos tipos, entre ellos se encuentran los plaguicidas, los cuales son ampliamente utilizados en la zona agrícola de la ribera del Río Hondo y son transportados por la corriente hasta la desembocadura del río en la bahía.

Además, los plaguicidas estudiados en esta investigación son utilizados con mayor frecuencia que otros en las campañas de fumigación contra mosquitos, debido a que un estudio realizado por el Centro Nacional de Programas Preventivos y Control de Enfermedades (CENAPRECE, 2016) demostró que son altamente efectivos para tal aplicación. Así, en el mismo estudio, se consideró al Clorpirifós-etil y al Malatión como los plaguicidas más recomendables para combatir las enfermedades transmitidas por vector en la mayoría de los Estados de la República Mexicana, incluyendo a Quintana Roo. Por lo tanto, estos plaguicidas usados en las fumigaciones tienen una alta probabilidad de llegar a la bahía por dos medios, de forma directa al ser rociados en zonas muy cercanas a la costa, o al ser transportados por las lluvias a través del drenaje pluvial de la ciudad de Chetumal, el cual descarga directamente en la Bahía.

Los plaguicidas, en general, tienen un alto potencial de provocar daños en los ecosistemas debido a sus propiedades tóxicas. Su única función es erradicar ciertos organismos objetivo, sin embargo, al hacer uso de estos químicos no solamente se afecta a los organismos considerados como plaga, sino a todos aquellos que de alguna manera estén expuestos.

Por lo anterior, resulta indispensable la generación de información ecotoxicológica de estos compuestos, que permita la prevención y control de su introducción en el medio y la evaluación de riesgos ambientales, para así poder garantizar la conservación de los ecosistemas; los bioensayos de toxicidad cumplen muy bien ese papel, ya que nos brindan información precisa en un tiempo relativamente corto y con un bajo costo.

Se ha elegido a *Capitella cf. capitata* como especie de prueba debido a la facilidad para recolectarla, su importancia como bioindicador y su abundancia y distribución en la bahía. Como cualquier especie de poliqueto, se encuentra en la base de la cadena alimenticia, por lo que las afectaciones en su población tienen una repercusión en todo el ecosistema.

OBJETIVOS

Objetivo general.

Evaluar la toxicidad del Malatión y del Clorpirifós-etil en la especie *Capitella* cf. *capitata* mediante la realización de bioensayos de toxicidad aguda para contribuir al conocimiento ecotoxicológico.

Objetivos específicos.

- Determinar la concentración letal media (CL₅₀) a 48 horas de los plaguicidas Malatión y Clorpirifós-etil en *Capitella* cf. *capitata*.
- Determinar la clasificación de toxicidad de los plaguicidas Malatión y clorpirifós-etil.
- Determinar el riesgo ecológico de los plaguicidas Malatión y clorpirifós-etil.

Preguntas de investigación.

¿Cuáles son las concentraciones del malatión y del clorpirifós-etil que eliminan al 50 % de *Capitella* cf. *capitata* en condiciones de laboratorio en 48 horas?

¿Representan dichos plaguicidas un riesgo ecológico?

¿Cuál es la clasificación de toxicidad de los plaguicidas?

Hipótesis.

De acuerdo a la CL₅₀ del malatión en *Daphnia magna*, se estima que en *Capitella* cf. *capitata* será mayor a 0.9 µg/L, por su parte, la CL₅₀ del clorpirifós en *Daphnia magna* permite pensar que la de *Capitella* cf. *capitata* será mayor a 0.6 µg/L. Por los antecedentes, la CL₅₀ del clorpirifós será menor que la del malatión.

MARCO TEÓRICO

Plaguicidas.

La FAO (1989) define a un plaguicida como “una sustancia o mezcla de sustancias destinadas a prevenir, destruir o controlar cualquier plaga, incluyendo vectores de enfermedad humana o animal, especies indeseadas de plantas o animales capaces de causar daños o interferir de cualquier otra forma con la producción, procesamiento, almacenamiento, transporte o mercado de los alimentos, otros productos agrícolas, madera y sus derivados o alimentos animales, o que pueden ser administrados a los animales para el control de insectos, arácnidos u otras plagas en sus organismos”

El incremento en la producción y comercialización de plaguicidas en las últimas cuatro décadas ha aumentado el riesgo potencial de estos compuestos hacia la salud humana y el ambiente. De forma general, la agricultura intensa combinada con la escorrentía superficial, la lixiviación y el retorno de aguas de riego en canales de drenaje está aumentando los niveles de nutrientes y plaguicidas en cuerpos de agua (Vryzas, 2008).

Los plaguicidas pueden sufrir transformaciones en el ambiente acuático, las cuales pueden ser químicas o biológicas, formando metabolitos más o menos tóxicos que el compuesto original. Estas transformaciones dependen del pH, temperatura y salinidad del medio. La presencia de plaguicidas en ambientes acuáticos puede afectar a especies no blanco como los peces y otros organismos (Ferrero *et al.*, 2001).

Malatión

Malatión es el nombre comercial del 0,0-dimetil-S-1,2-di (carboetoxi) etil fosforoditioato, plaguicida del grupo de los organofosforados con fórmula química $C_{10}H_{19}O_6PS_2$ y número CAS 121-75-5, su estructura química se observa en la **Figura 1**.

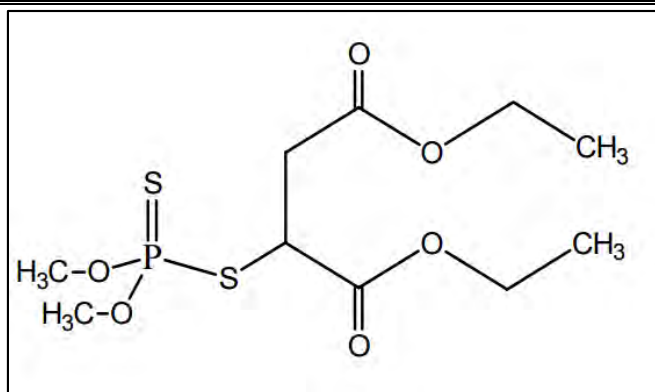


Fig. 1. Estructura química del malatión.

El Malatión es un insecticida organofosforado no sistémico de amplio espectro, ingresa a los "blancos" sobre todo por ingesta y por el aire que toman los espiráculos; pues los insectos tienen respiración traqueal, no pulmonar (Montenegro, 2001). El Malatión se usa para el control de una amplia variedad de insectos y arácnidos, entre ellos pulgones (Homoptera: Aphididae), langostas y otros ortópteros (Orthoptera: varias familias), insectos escama (Homoptera: varias familias), mosca de las frutas (Diptera: Tephritidae), mosca común (Diptera: Muscidae), mosquitos (Diptera: varias familias), ácaro rojo (Arachnida: Acarina) etc., igualmente se usa frecuentemente para el control del mosquito adulto en los programas de salud pública (National Wildlife Federation, 1984).

El malatión, como otros insecticidas organofosforados, se enlaza a la enzima acetilcolinesterasa (AChE) en las uniones neuronales de los insectos y otros organismos inhibiendo su acción hacia las siguientes neuronas. Para el caso de los organismos no blanco, la unión de AChE con el malatión permite la acumulación de acetilcolina (ACh) en las uniones neuronales. Esta acumulación de ACh provoca una sobre estimulación de las glándulas celulares, ganglios autónomos, el sistema nervioso central y en los músculos lisos y esqueléticos (Reigart & Roberts, 1999).

Sus principales características fisicoquímicas se muestran en el **cuadro IV**:

CUADRO IV. Principales características físicoquímicas del malatión.

Peso molecular:	330.36 g/mol
Punto de Fusión:	2.8 °C
Punto de ebullición:	156 °C
Densidad:	1.2076 g/cm ³ a 20 °C
Presión de vapor:	0.004 mm Hg a 30 °C
Solubilidad acuosa:	3.36 mol/litro (ligeramente soluble)

Fuente: (Montenegro, 2001)

Clorpirifós-etil

Clorpirifós-etil o clorpirifos es el nombre comercial del 0,0-Dietil 0-(3, 5, 6-tricloro-2-piridinil) fosforotioato, plaguicida del grupo de los organoforforados con fórmula química C₉H₁₁Cl₃NO₃PS y número CAS 2921-88-2. Su estructura química es la que se encuentra en la **Figura 2**.

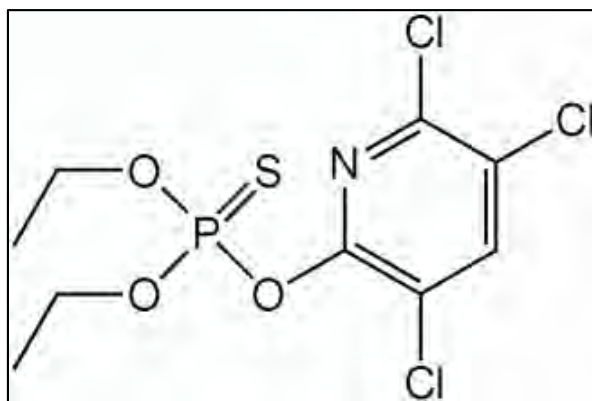


Fig. 2 Estructura química del clorpirifós-etil

Es un insecticida de amplio espectro utilizado en fruta, granos, nueces, hortalizas, ganado, plantas ornamentales, campos de golf, edificios y para tratar madera. Se formula en forma líquida o en forma de granos y en concentrados líquidos, en polvo humectado y polvos. En la agricultura, clorpirifos generalmente se usa como un spray para hojas o se aplica directamente en el suelo incorporándolo antes de la siembra. Es a menudo utilizado para el

control de vectores. Clorpirifos es considerado uno de los insecticidas usado en forma más extendida, y el uso se da en la mayor parte de las regiones (Watts, 2012).

Sus principales características fisicoquímicas se muestran en el **cuadro V**:

CUADRO V. Principales características fisicoquímicas del clorpirifós-etil.

Peso molecular:	350.62 g/mol
Punto de Fusión:	41.5 - 44 °C
Gravedad específica:	1.398 g/cm ³
Presión de vapor:	0.0000187 mm Hg
Solubilidad acuosa:	2 mg/L (poco soluble)

Fuente: (Moore *et al.*, 1998)

La principal vía de acción de este plaguicida es la inhibición de la acetilcolinesterasa en las uniones neuronales (Barron & Woodburn, 1995).

Poliquetos

Los poliquetos son los invertebrados bénticos más abundantes y los que representan la mayor biomasa en fondos blandos, ocupan prácticamente todos los ambientes, desde zonas situadas a cientos de metros sobre el nivel del mar, hasta las grandes profundidades oceánicas y ambientes dulceacuícolas. Estos organismos exhiben una amplia gama de formas, de relaciones inter e intra-específicas y de estrategias alimenticias y reproductivas; sus metabolitos poseen un alto potencial en la industria farmacológica; son calificados como excelentes indicadores de calidad ambiental y tienen una importancia ecológica incuestionable (Liñero Arana, 2009).

Capitélidos

Uno de los grupos de poliquetos más antiguos es el de los capitélidos, los cuales son habitantes de fondos blandos y tienen poblaciones muy numerosas, debido a su abundancia forman una parte fundamental del flujo energético en esos ambientes. Su morfología es muy simple, tienen forma de lombriz de tierra, generalmente viven enterrados en la arena o el

lodo, y se alimentan ingiriendo la materia orgánica adherida al sedimento. Su rango de distribución es desde la zona de entre mareas hasta el mar profundo y son a menudo dominantes de la infauna, especialmente en aquellos sedimentos enriquecidos orgánicamente (García Garza, 2009).

Son los que mejor reflejan el grado de contaminación orgánica, en particular *Capitella capitata* (Fabricius, 1780) fue una de las primeras especies designadas como indicadora de contaminación, por tener la capacidad de reproducirse y establecerse en condiciones muy adversas, en sedimentos con alta concentración de materia orgánica (Ídem).

Pruebas de toxicidad acuáticas

La APHA (1992) define las pruebas de toxicidad acuáticas como un procedimiento en el que se miden las respuestas de los organismos acuáticos y que se utilizan para detectar o medir la presencia o el efecto de una o más sustancias, residuos o factores ambientales actuando aisladamente o en combinación; y los clasifica de acuerdo a su duración (corta, intermedia o larga) y a la forma de añadir las soluciones (estática, recirculación, renovación o flujo continuo). Las pruebas de toxicidad de corta duración o toxicidad aguda usualmente se realizan de 24 a 96 h y resultan útiles para evaluar la concentración máxima permitida para exposiciones muy breves a los tóxicos y como resultado se obtiene la CL_{50} que indica la concentración de tóxico que produce la muerte del 50% de los organismos expuestos en un tiempo específico.

En las pruebas de toxicidad sin renovación, los organismos son expuestos a una misma solución por un tiempo determinado de prueba. En pruebas que son con renovación se añade una nueva solución después de un tiempo determinado y tiene que tener la misma concentración que la solución inicial. En el caso de las pruebas de flujo continuo, como su nombre lo indica circula de manera continua una corriente del xenobiótico estudiado con el fin de mantener una concentración constante. Las pruebas con renovación y con recirculación son generalmente empleadas cuando la sustancia utilizada se degrada de manera considerablemente rápida.

Los ensayos de toxicidad han permitido establecer los límites permitidos para los distintos contaminantes, evaluar su impacto sobre las comunidades de los ambientes que las

reciben y comparar la sensibilidad de una o más especies a distintos tóxicos o a diferentes condiciones para el mismo tóxico. Igualmente es útil para establecer criterios o patrones de calidad de aguas o efluentes, la evaluación del impacto ambiental y del riesgo ecológico y el monitoreo de las condiciones de un cuerpo de agua (Puig, s.f.).

A continuación, se presentan algunos criterios importantes (**Cuadro VI**) que se deben procurar cumplir en la realización de los bioensayos de toxicidad para que los resultados obtenidos tengan una relevancia considerable en el monitoreo, limitación o regulación de alguna sustancia química que se esté o pueda estarse introduciendo en un determinado ecosistema.

CUADRO VI. Criterios para la selección de pruebas biológicas en laboratorio para la evaluación toxicológica de sustancias químicas.

Factibilidad	Bajo costo. Materiales y reactivos disponibles en la localidad. Tiempo máximo de desarrollo, 5 días. Procedimiento de prueba simple. Factibilidad en la evaluación de la respuesta a medir.
De los organismos	Fácil obtención. Fácil mantenimiento. Representatividad ecológica. De un grupo funcional (productores primarios, herbívoros, carnívoros, descomponedores). De un grupo taxonómico (bacterias, peces, insectos, etc.). De una ruta de exposición (dérmica, ingestión, branquial, combinadas, etc.). Con información sobre su sensibilidad a compuestos tóxicos (base de datos). Estadio más sensible. Respuesta relevante a los compuestos tóxicos. Sensibilidad a bajas concentraciones. Sensibilidad a una amplia variedad de compuestos tóxicos. Sensibilidad no redundante con otras especies.

Con información sobre su biología.

De la prueba

Condiciones presentes en los ecosistemas mexicanos (temperatura, salinidad, dureza, etc.).
Concentraciones químicas reales (que se presenten en el medio ambiente).
Técnicamente seguros y no contaminantes.
Posibilidad de ser estandarizada.
Buena exactitud y precisión analíticas.
Aplicación universal (usos, ventajas y limitaciones).
Significado ecológico de los resultados.
Buenas prácticas de laboratorio.
Validación de la salud de los organismos de prueba.
Requerimientos mínimos de sobrevivencia/ reproducción en pruebas y testigos.
Edades o etapas de vida requeridos al inicio de la prueba.
Comprobación de concentraciones nominales.

Fuente: (Ramírez Romero & Mendoza Cantú, 2008)

MATERIALES Y MÉTODOS

Método de Campo.

Se recolectaron organismos vivos de *Capitella cf. capitata* y se tomaron muestras de sedimento y agua en la Bahía de Chetumal, en 3 zonas libres de descargas directas de agua como lo sugieren Uc Peraza y Delgado Blas (2015), el primero con coordenadas 18°30'49.86" N y 88°16'32.68" O, el segundo con 18°29'38.18" N y 88°17'16.37" O y el tercero con 18°29'33.51 N y 88°17'35.42" O.

Los organismos fueron recolectados del sedimento de entre 5 y 10 metros de la línea de costa. Para ello, se utilizó un nucleador de PVC de 11 cm de diámetro y 25 cm de largo, con el cual se extrajeron muestras de sedimento. Después, se tamizaron las muestras con un tamiz de abertura de malla de 0.5 mm para poder observar a los organismos y posteriormente extraerlos utilizando pipetas de plástico de 3 ml de capacidad de succión para evitar su fragmentación. Posteriormente, se colocó cada organismo en un vial con agua del mismo sitio de muestreo, con la finalidad de evitar estresarlos al enrollarse con otros organismos. (Fig. 3) Finalmente se almacenaron en una nevera para su transporte al laboratorio. El material biológico que no pertenecía a la familia Capitellidae fue regresado al medio. Adicionalmente, con el mismo nucleador, se extrajeron muestras de sedimento del sitio y se colocaron en bolsas de plástico para su posterior utilización en la aclimatación y en los bioensayos. También, se colectó agua en un garrafón de plástico con una capacidad de 20 litros, ésta agua solamente fue utilizada durante la etapa de aclimatación.

Con un refractómetro, se midió la salinidad del sitio de muestreo con el objetivo de mantener la misma condición durante los bioensayos. Igualmente se registró la temperatura, el oxígeno disuelto y el pH realizando la medición con un termómetro de mercurio, un oxímetro HANNA modelo HI 9142 y un potenciómetro HANNA modelo HI 991001 respectivamente.



Fig. 3. Recolección de organismos de *Capitella cf. capitata* en la Bahía de Chetumal

Laboratorio.

Selección, identificación y aclimatación de los organismos.

Se seleccionaron en el laboratorio los organismos adultos de *Capitella cf. capitata* de aproximadamente 10 a 15 mm de longitud, descartando aquellos que presentaban una coloración pálida, tuvieran poco movimiento o se encontraban fragmentados (Uc Peraza y Delgado Blas, 2015). La especie de estudio se identificó mediante observación en un microscopio óptico y un estereoscopio (**Fig. 4**), utilizando las claves de García Garza (2009).

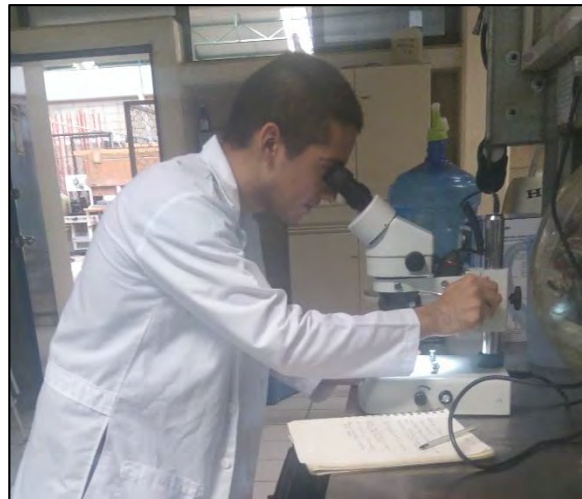


Fig. 4 Selección e identificación de organismos de *Capitella cf. capitata*.

Los organismos seleccionados se colocaron en peceras de 3 L de capacidad con agua y sedimento tratado del sitio de muestreo, con aplicación de aireación constante, conservándolos a temperatura de laboratorio (25 ± 1 °C) y con ciclo de luz-oscuridad natural, donde se llevó a cabo la aclimatación durante 2 días completos antes de la realización de los bioensayos. No se les proporcionó alimento, ya que, por naturaleza, estos organismos se alimentan de la materia orgánica presente en el sedimento.

Durante la aclimatación se midieron los parámetros temperatura, oxígeno disuelto, pH y salinidad con el mismo equipo empleado para realizar las mediciones en el sitio de muestreo.

Preparación del sedimento.

Se tamizó la muestra de sedimento recolectada en la bahía con un tamiz de abertura de malla de 0.5 mm para su uso en las pruebas ecotoxicológicas y en la aclimatación, eliminando así cualquier otro organismo presente en la muestra que pudiera depredar a los organismos de prueba. Una vez tamizado el sedimento, se esperaron aproximadamente 30 minutos para permitir la precipitación, después, se retiró el agua sobrenadante del recipiente. Posteriormente se procedió a refrigerar el sedimento durante 48 horas a 2°C, con el objetivo de reducir la posibilidad de reacciones de óxido-reducción y eliminar otros organismos no deseados.



Fig. 5 Introducción de 10 g de sedimento tratado en los cristalizadores.

Finalmente, 10 g de sedimento tratado fue introducido en los cristalizadores de cada bioensayo y sus respectivas réplicas (**Fig. 5**). Dicha cantidad proporciona aproximadamente 5 mm de grosor de sedimento; lo cual permite realizar de forma rápida la búsqueda de los organismos durante la prueba ecotoxicológica y también es una cantidad suficiente para garantizar su sobrevivencia.

Preparación del agua salina.

Se añadió sal marina marca Oceanic[®] al agua destilada para preparar una solución con la misma salinidad que la del sitio de muestreo (9 ‰). Así, se evita la afectación de resultados por algún posible tóxico presente en el agua de la Bahía que pudiera desencadenar una reacción química con el plaguicida de prueba.

Preparación de la solución madre.

Se preparó una solución madre de malatión con 2 ml del producto Malation500[®] aforado a 500 ml con agua destilada, la cual tenía una concentración de malatión de 2000 mg/L.

Igualmente, se preparó una solución madre de clorpirifós-etil con 1 ml del producto Tyson4E[®] aforado a 500 ml con agua destilada, con una concentración de clorpirifós-etil de 960 mg/L.



Fig. 6 Preparación de soluciones madre de los plaguicidas.

Preparación de las disoluciones de prueba.

Debido a la falta de antecedentes de bioensayos de malatión y clorpirifós-etil con poliquetos, fue necesario llevar a cabo una prueba exploratoria por cada plaguicida (Anexo 1) para determinar el rango de concentraciones de las pruebas definitivas. Después, la concentración más alta elegida se multiplicó por un factor constante con el objetivo de obtener 5 concentraciones uniformemente espaciadas dentro de una escala logarítmica y que correspondieran al rango definido por las pruebas exploratorias. Dichos factores fueron de 0.75 y 0.78 para los bioensayos de malatión y clorpirifós-etil respectivamente. De esta manera, las concentraciones de la cámara de bioensayos del malatión fueron 50, 39, 30.42, 23.72 y 18.5 mg/L, y las del clorpirifós-etil 18, 13.5, 10.12, 7.59 y 5.69 mg/L.

Posteriormente, se calcularon los volúmenes exactos de solución madre y agua salina para preparar las 5 concentraciones de cada cámara de bioensayos, de tal manera que el volumen total fuera de 200 ml (**Cuadros VII y VIII**).

CUADRO VII. Volúmenes de solución madre de malatión y solución salina para preparar las concentraciones de la cámara de bioensayos de malatión.

Concentración Malatión	Volumen Solución Madre de Malatión	Volumen Solución Salina
Control	0 ml	200 ml
18.5 mg/L	1.85 ml	198.15 ml
23.72 mg/L	2.37 ml	197.63 ml
30.42 mg/L	3.04 ml	196.96 ml
39 mg/L	3.9 ml	196.1 ml
50 mg/L	5 ml	195 ml

CUADRO VIII. Volúmenes de solución madre de clorpirifós-etil y solución salina para preparar las concentraciones de la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil.

Concentración Clorpirifós	Volumen Solución Madre de Clorpirifós	Volumen Solución Salina
Control	0 ml	200 ml
5.69 mg/L	1.18 ml	198.82 ml
7.59 mg/L	1.58 ml	198.42 ml
10.12 mg/L	2.1 ml	197.9 ml
13.5 mg/L	2.81 ml	197.19 ml
18 mg/L	3.75 ml	196.25 ml

Se realizaron 3 réplicas por cada bioensayo y se utilizó un control sin plaguicida en cada cámara de bioensayos para asegurarse que las condiciones de laboratorio y el agua salina no estuvieran afectando su sobrevivencia. En el Anexo 4 se encuentran esquematizadas ambas cámaras de bioensayos.

Preparación de los bioensayos.

Se colocaron 10 organismos de *Capitella* cf. *capitata* seleccionados de forma aleatoria en cada cristalizador de 10 cm de diámetro y 5 cm de altura, donde se había introducido previamente el sedimento preparado y el agua salina. En total, se utilizaron 160 organismos por cada cámara de bioensayo. Después, se esperó un tiempo de 30 minutos con el objetivo de permitirles a los organismos introducirse en el sedimento para finalmente agregar el volumen correspondiente de la solución madre.



Fig. 5. Agregación de solución madre a los cristalizadores

Realización de los bioensayos.

Los bioensayos realizados fueron de tipo estático (sin renovación de solución de prueba) a 48 h con aplicación de aireación constante y sin alimento para los organismos, efectuando lecturas de mortalidad en los siguientes intervalos de tiempo de exposición: a 1, 2, 4, 8, 16, 24, 36 y 48 h. Los organismos muertos fueron contabilizados y retirados de los cristalizadores en cada lectura de mortalidad mediante pipetas de plástico y fueron reconocidos tomando en cuenta las consideraciones de APHA (1992): organismos inmóviles en la superficie del sedimento, hinchados y con coloración pálida. Un criterio para la validación de la prueba fue que en los grupos de control tenían que permanecer vivos al menos el 90% de los organismos. Los resultados de todas las lecturas de mortalidad se encuentran en el Anexo 3.

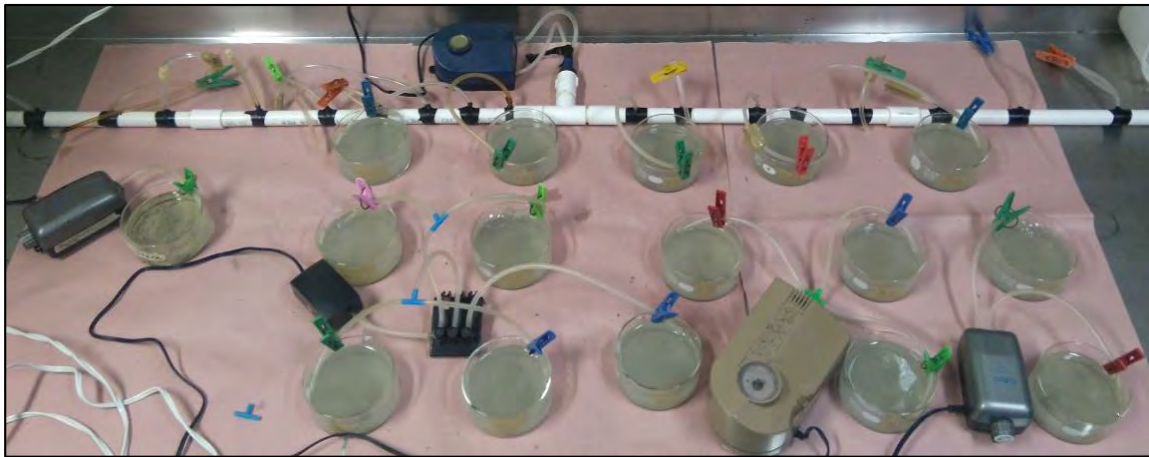


Fig. 6. Cámara de bioensayos del malatión al inicio de la prueba.

Se midió el pH, el oxígeno disuelto, la temperatura y la salinidad en cada réplica de las cámaras de bioensayos al inicio y al término de la prueba utilizando el mismo equipo de medición empleado durante el muestreo de campo.

Cálculo de la concentración letal media (CL₅₀).

La CL₅₀ a 48 h de ambos plaguicidas en *Capitella cf. capitata* se calculó utilizando el método Probit (APHA, 1992) con intervalos de confianza al 95%. Los resultados se graficaron como curvas de regresión de los valores del probit empírico contra el logaritmo de la concentración.

Análisis estadístico.

Primeramente, para conocer el comportamiento general de los datos obtenidos de las pruebas de toxicidad aguda, se realizó un análisis estadístico exploratorio. Después, se llevó a cabo el análisis de varianza ANOVA de una vía (Concentración de plaguicida) con un diseño de bloques al azar y un nivel de confianza del 95%; con la finalidad de analizar las diferencias entre las concentraciones y las réplicas, tomando la mortalidad de *Capitella cf. capitata* a 48 h como la variable de respuesta.

Los análisis estadísticos fueron realizados con el software especializado STATISTICA en su versión 7.1.

Estimación del grado de toxicidad.

Una vez obtenida la CL_{50} fue posible calcular las Unidades de Toxicidad aguda (U.T.) mediante la siguiente ecuación:

$$U.T. = \left(\frac{1}{CL_{50}} \right) \times 100$$

Posteriormente, el resultado se comparó con los valores del **cuadro IX** para determinar la clasificación de toxicidad de ambos plaguicidas.

CUADRO IX. Clasificación de toxicidad basada en Unidades de Toxicidad.

Clasificación	Toxicidad (U.T)
Altamente Tóxico	> 4
Tóxico	2-4
Moderadamente Tóxico	1.33-1.99
Ligeramente Tóxico	<1.33

Fuente: Saldaña *et al.*, 2002

Estimación del riesgo ecológico

La evaluación de riesgo ecológico (ERA por sus siglas en inglés) es un proceso que evalúa la probabilidad de que efectos ecológicos adversos estén ocurriendo o puedan ocurrir como respuesta a un factor de estrés (US EPA, 1992).

La ERA para un contaminante específico está basada en la determinación y comparación de la concentración ambiental prevista (PEC) del contaminante y su concentración ambiental de efectos no previstos (PNEC), mediante la División PEC/PNEC conocida como Cociente de Riesgo (RQ). En el caso que PEC/PNEC tenga un valor menor que 1, existe un riesgo despreciable. Si el cociente de riesgo es mayor o igual a 1, existe la posibilidad de que haya un riesgo asociado (Campbell *et al.*, 2006).

El valor PEC para el malatión y el clorpirifós-etil es de 0.095 y 0.280 µg/L respectivamente (Vryzas *et al.*, 2008).

El valor PNEC se obtiene dividiendo la CL₅₀ obtenida de la prueba de toxicidad aguda entre un valor de compensación (100); $PNEC = CL_{50}/100$ (Uc Peraza y Delgado Blas, 2015).

RESULTADOS

Resultados de la cámara de bioensayos de malatión.

Parámetros fisicoquímicos de la cámara de bioensayos de malatión.

En el **cuadro X** se encuentran los valores promedio y sus errores estándar de los parámetros fisicoquímicos por concentración. Los parámetros fisicoquímicos completos, medidos al inicio y al final de cada prueba se encuentran en el Anexo 2.

CUADRO X. Promedios y errores estándar de los parámetros fisicoquímicos de la cámara de bioensayos de malatión.

Concentración (mg/L)	Temperatura (°C)	Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	Salinidad (‰)
Control	24.8 ± 0.2	5.1 ± 0.9	7.8 ± 0.01	9
18.5	24.78 ± 0.09	5.13 ± 0.3	7.77 ± 0.004	9
23.72	24.86 ± 0.09	5.01 ± 0.27	7.75 ± 0.006	9
30.42	24.73 ± 0.09	4.96 ± 0.28	7.74 ± 0.005	9
39	24.81 ± 0.08	5.01 ± 0.33	7.73 ± 0.005	9
50	24.76 ± 0.09	4.96 ± 0.29	7.72 ± 0.004	9

El parámetro fisicoquímico que presentó una relación con la concentración es el pH, como se observa en la **figura 7**.

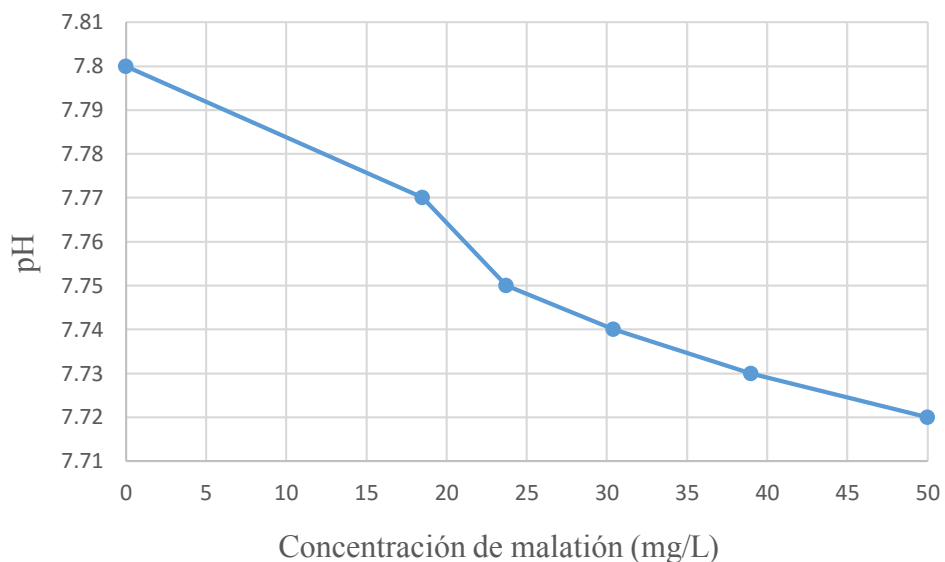


Fig. 7 Gráfica del pH promedio obtenido en las diferentes concentraciones de malatión.

Mortalidad de organismos en la cámara de bioensayos de malatión.

Derivado de las lecturas de mortalidad de organismos de *Capitella cf. capitata* en la cámara de bioensayos de malatión (Anexo 3) se obtuvieron los siguientes resultados, de un total de 30 organismos expuestos por concentración, en 18.5 mg/L se encontraron 5 organismos muertos (16.7 %), en 23.72 mg/L murieron 10 organismos (33.3 %), en 30.42 mg/L murieron 16 (53.3 %), en 39 mg/L murieron 25 (83.3 %) y en 50 mg/L murieron 28 (93.3 %). En el control sin plaguicida no se presentó ningún organismo muerto de los 10 expuestos, tal como se muestra en el **cuadro XI**.

CUADRO XI. Resultados de mortalidad de *Capitella cf. capitata* en la cámara de bioensayos de malatión.

Concentración (mg/L)	No. de organismos expuestos	No. de organismos muertos	Mortalidad (%)
Control	10	0	0
18.5	30	5	16.7
23.72	30	10	33.3
30.42	30	16	53.3
39	30	25	83.3
50	30	28	93.3

Valor Probit empírico asociado a los porcentajes de mortalidad y Log de las concentraciones de la cámara de bioensayos de malatión.

El Logaritmo de la concentración 18.5 mg/L es 1.267, de 23.72 mg/L es 1.375, de 30.42 mg/L es 1.483, de 39 mg/L es 1.591 y de 50 mg/L es 1.698.

Los valores Probit empírico asociados a los porcentajes de mortalidad 16.7 % (4.029), 33.3 % (4.568), 53.3 % (5.966), 83.3 % (5.966) y 93.3 % (6.498) se encuentran en el **cuadro XII.**

CUADRO XII. Probit empírico asociado a los porcentajes de mortalidad y Log de las concentraciones de la cámara de bioensayos del malatión.

Concentración (mg/L)	Log de la concentración	Mortalidad (%)	Probit empírico
18.5	1.267	16.6	4.029
23.72	1.375	33.3	4.568
30.42	1.483	53.3	5.082
39	1.591	83.3	5.966
50	1.698	93.3	6.498

Concentración letal media del Malatión en *Capitella cf. capitata*.

En la **figura 8** se encuentra la gráfica del logaritmo de la concentración de malatión (eje X) contra el valor Probit empírico correspondiente a cada porcentaje de mortalidad (eje Y).

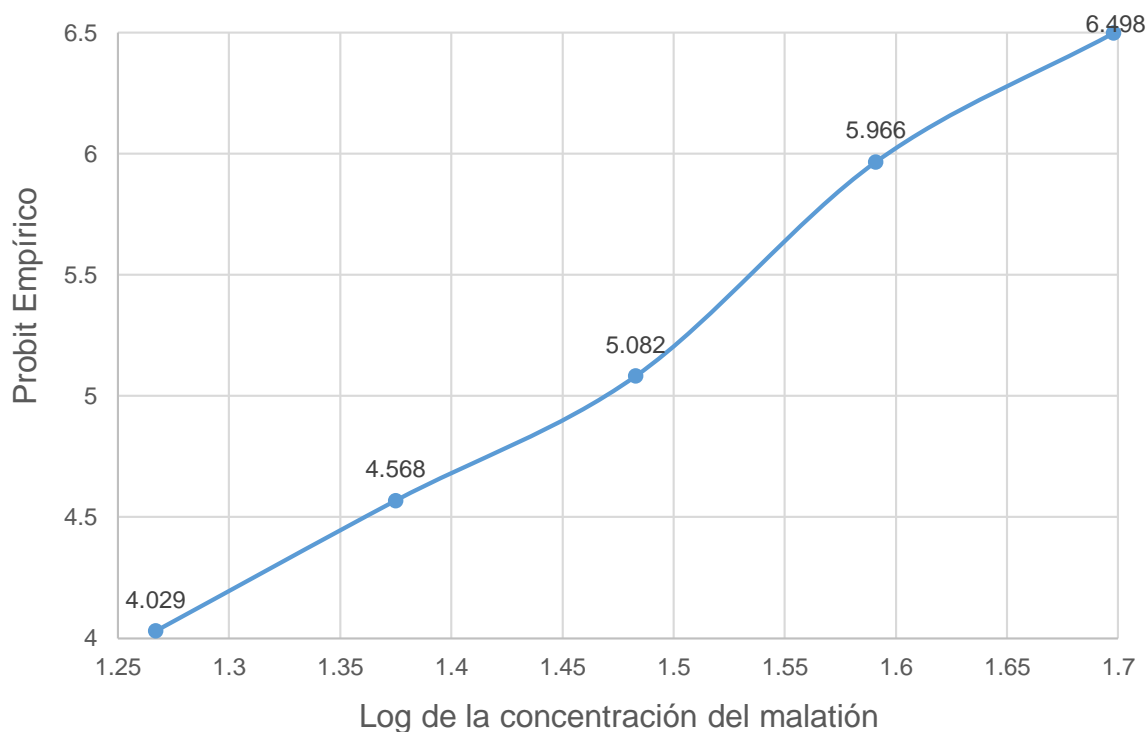


Fig. 8. Gráfica del Log de la concentración de malatión contra el valor Probit.

A continuación, en la **figura 9**, se encuentra el ajuste de la recta realizado por el método de mínimos cuadrados. La recta obtenida corresponde a la siguiente ecuación: $y = 5.8775x - 3.4866$; donde “y” es el valor probit, “x” es el Log de la concentración y 5.8775 es el valor de la pendiente.

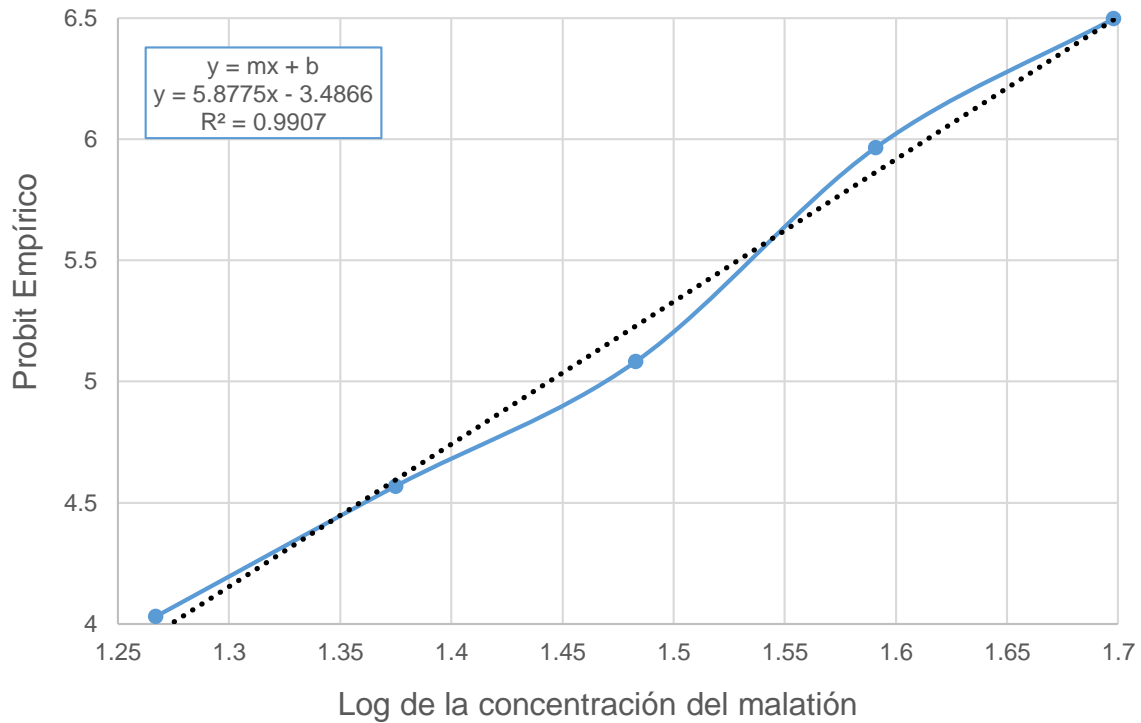


Fig. 9. Recta resultante del ajuste por mínimos cuadrados del Log de la concentración de malatión contra el valor Probit.

En la **figura 10** se observa la gráfica de la recta ajustada por mínimos cuadrados a la cual se le trazó una línea perpendicular al eje Y en el valor Probit empírico 5, que corresponde a un 50% de mortalidad, y que en su punto de intersección con la recta ajustada se proyectó hacia el eje X, lo cual nos indica el Log de la concentración de malatión que elimina la mitad de una población de *Capitella cf. capitata* (Log CL_{50}), que en este caso es **1.444**.

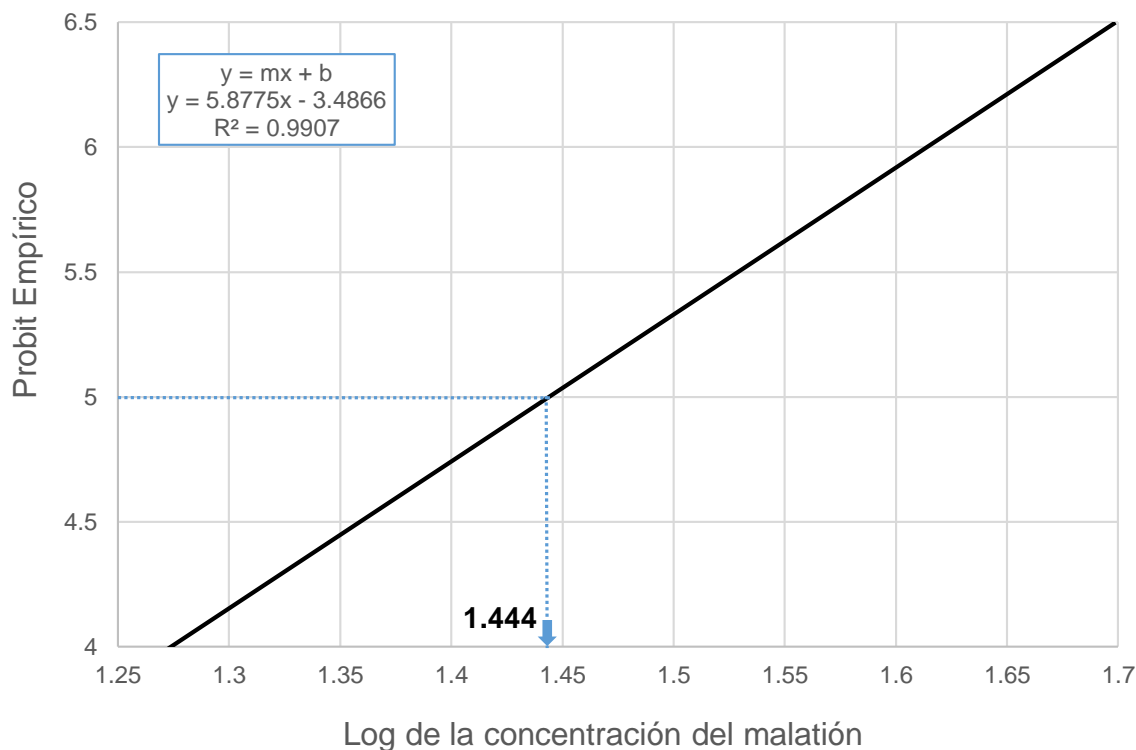


Fig. 10. Representación gráfica del Log de la CL₅₀ a 48h del malatión en *Capitella cf. capitata*.

Al aplicar el Antilogaritmo al Log de la CL₅₀ se obtuvo el valor de la CL₅₀ a 48 h del malatión en *Capitella cf. capitata* con un intervalo de confianza de 95%, el cual es de **27.79 ± 2.67 mg/L**.

Análisis estadístico de la cámara de bioensayos del malatión.

Al realizar el análisis estadístico exploratorio de la variable dependiente (número de organismos muertos) se encontraron los valores del **cuadro XIII**.

CUADRO XII. Estadística descriptiva de la variable dependiente número de muertos de la cámara de bioensayos del malati6n.

Número de valores	15
Media	5.6
Límite de confiabilidad inferior 95%	3.9
Límite de confiabilidad superior 95%	7.29
Mediana	5
Moda	3 y 9
Frecuencia de moda	3
Mínimo	1
Máximo	10
Amplitud	9
Varianza	9.4
Desviación estándar	3.06
Error estándar	0.79

Se encontró que el comportamiento de los datos de la variable dependiente tiene una distribución normal mediante el test de normalidad de Shapiro-Wilk ($W = 0.91$, $p = 0.16$) al cumplirse la condición $p > 0.05$. De forma gráfica se puede observar que los valores esperados de normalidad se encuentran dentro del elipse de confianza del 95% (**Fig. 11**).

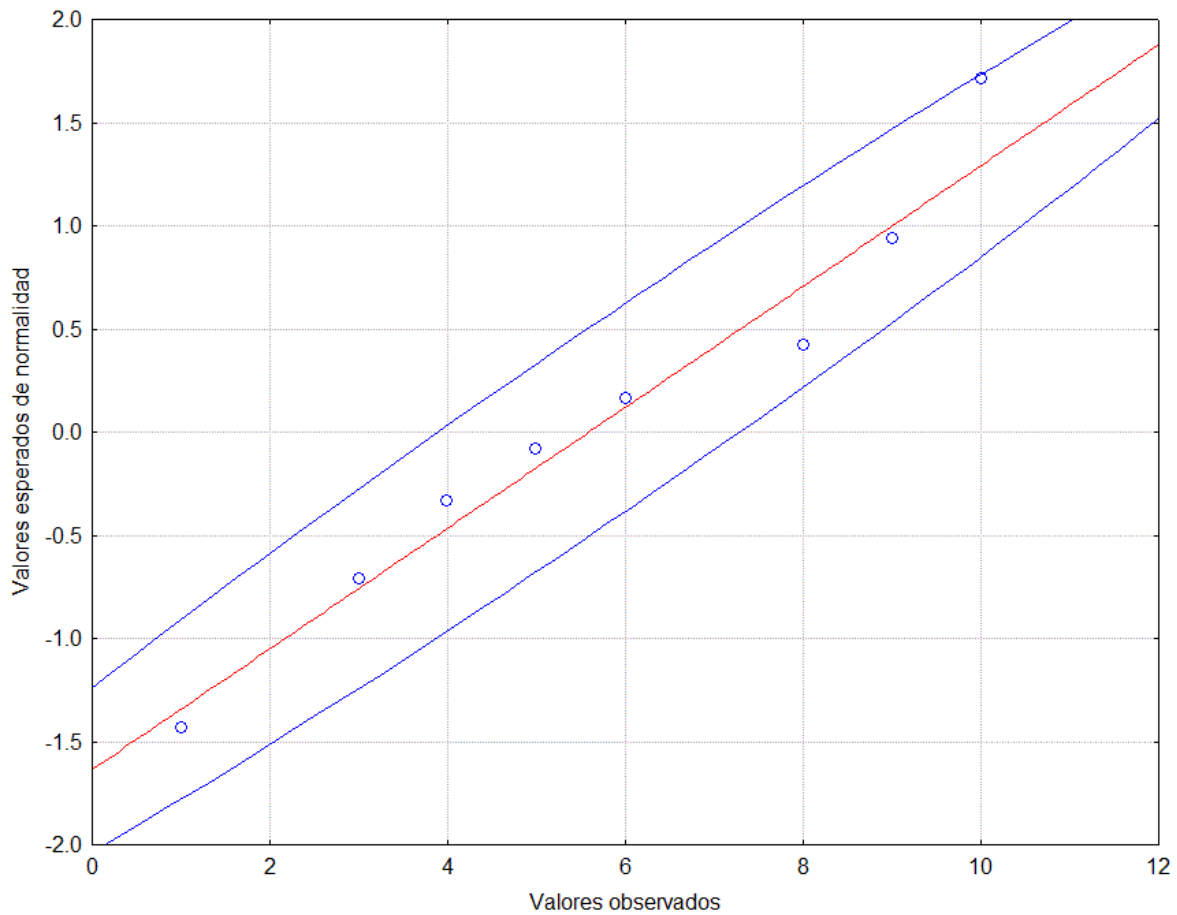


Fig. 11. Normalidad y elipse de confianza del 95% de la variable dependiente de la cámara de bioensayos del malatión.

El análisis de varianza ANOVA demostró que existen diferencias significativas ($F = 59.1$, $p < .05$) entre las concentraciones de malatión y su mortalidad respectiva (**Fig. 12**). Por el contrario, al realizar el mismo análisis entre las tres réplicas y su mortalidad se encontró que no existen diferencias significativas ($F = 0.01$, $p > .05$) como se muestra en la **figura 13**.

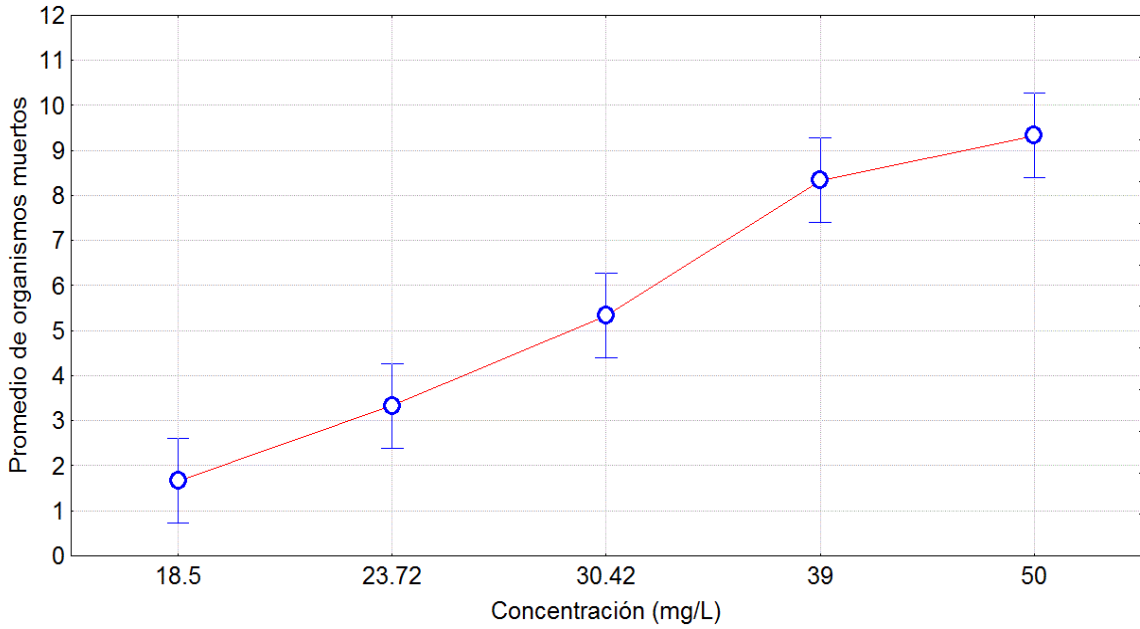


Fig. 12. Promedios y errores estándar de organismos muertos por concentración de malatión.

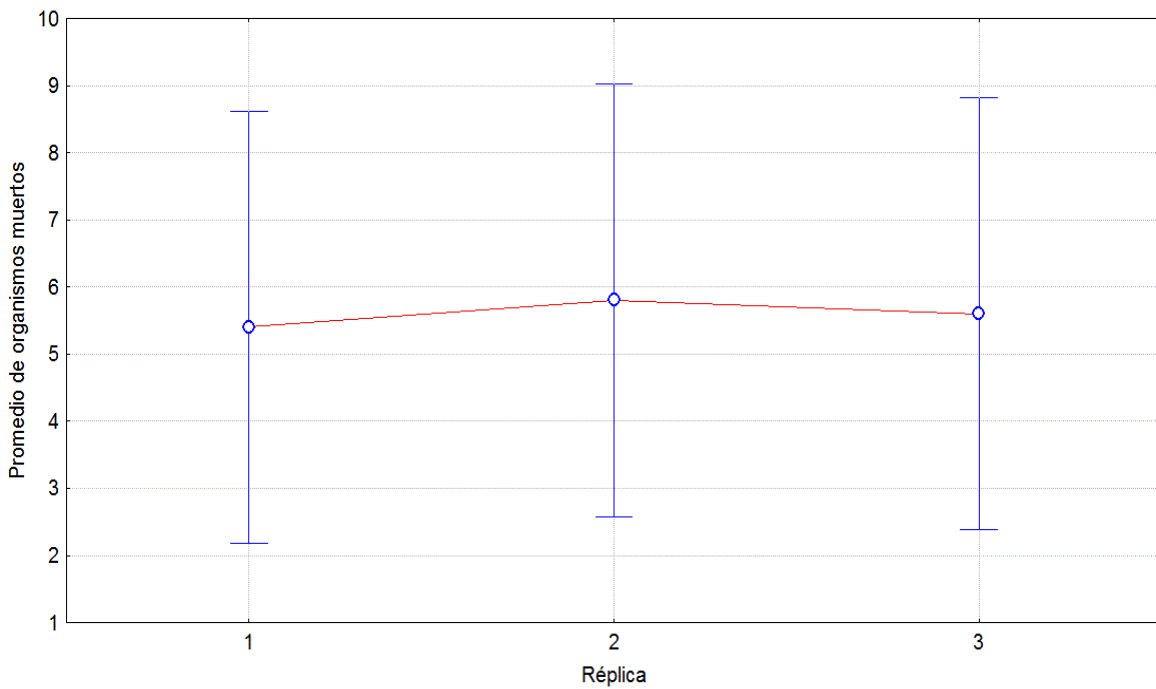


Fig. 13. Promedios y errores estándar de organismos muertos por réplica de la cámara de bioensayos del malatión.

Clasificación de toxicidad del malatión

El valor de la CL₅₀ a 48h del malatión en *Capitella* cf. *capitata* se empleó para obtener las unidades de toxicidad (U.T. = 3.59), lo cual, comparado con la clasificación de toxicidad basada en unidades de toxicidad (Saldaña *et al.*, 2002) se obtuvo que el malatión se clasifica como un producto químico **Tóxico** para dicha especie (**Cuadro XIV**).

CUADRO XIV. Clasificación de toxicidad del malatión en *Capitella* cf. *capitata*.

Unidades de toxicidad (U.T.)	Clasificación
3.59	Tóxico

Riesgo ecológico del malatión.

Para el caso del riesgo ecológico del malatión tomando en consideración la CL₅₀ de *Capitella* cf. *capitata*, el valor de la concentración ambiental de efectos no previstos (PNEC) es de 0.2779 mg/L, mientras que el de la concentración ambiental prevista (PEC) es de 0.000095 mg/L, con lo cual se obtiene un cociente de riesgo (RQ) de 0.00034, por lo tanto el riesgo ecológico es despreciable (**Cuadro XV**).

CUADRO XV. Riesgo ecológico del malatión considerando a *Capitella* cf. *capitata*.

PEC (mg/L)	PNEC (mg/L)	RQ	Riesgo ecológico
0.000095	0.2779	0.00034	Despreciable

Resultados de la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil.

Parámetros fisicoquímicos de la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil.

En el **cuadro XVI** se encuentran los valores promedio y sus errores estándar de los parámetros fisicoquímicos por concentración.

CUADRO XVI. Promedios y errores estándar de los parámetros físicoquímicos de la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil.

Concentración (mg/L)	Temperatura (°C)	Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	Salinidad (‰)
Control	25.7 ± 0.1	5.2 ± 0.4	7.77 ± 0.02	9
5.69	25.71 ± 0.07	5.08 ± 0.36	7.76 ± 0.009	9
7.59	25.80 ± 0.06	5.05 ± 0.27	7.74 ± 0.013	9
10.12	25.73 ± 0.08	5.06 ± 0.20	7.69 ± 0.009	9
13.5	25.73 ± 0.09	4.88 ± 0.25	7.65 ± 0.014	9
18	25.76 ± 0.06	5.00 ± 0.25	7.61 ± 0.008	9

El pH presentó una disminución al aumentar las concentraciones de clorpirifós-etil, tal como se observa en la **figura 14**.

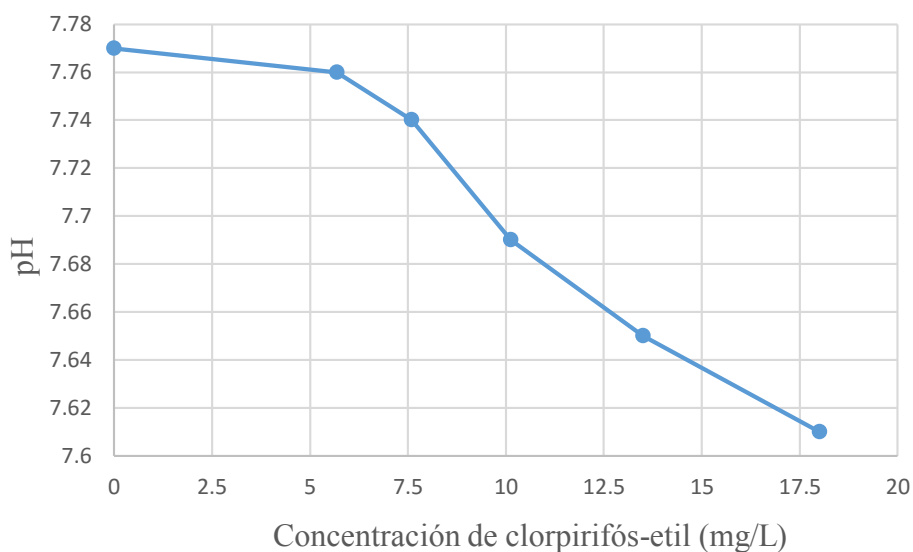


Fig. 14. Gráfica del pH promedio obtenido en las diferentes concentraciones de clorpirifós-etil.

Mortalidad de organismos en la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil.

Derivado de las lecturas de mortalidad de organismos de *Capitella* cf. *capitata* en la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil (Anexo 3) se obtuvieron los siguientes resultados, de un total de 30 organismos expuestos por concentración, en 5.69 mg/L se encontraron 10 organismos muertos (33.3 %), en 7.59 mg/L murieron 16 organismos (53.3 %), en 10.12 mg/L murieron 20 (66.6 %), en 13.50 mg/L murieron 24 (80 %) y en 18 mg/L murieron 27 (90 %). En el control sin plaguicida no se presentó ningún organismo muerto de los 10 expuestos, tal como se muestra en el **cuadro XVII**.

CUADRO XVII. Resultados de mortalidad de *Capitella* cf. *capitata* en la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil.

Concentración (mg/L)	No. de organismos expuestos	No. de organismos muertos	Mortalidad (%)
Control	10	0	0
5.69	30	10	33.3
7.59	30	16	53.3
10.12	30	20	66.6
13.50	30	24	80
18	30	27	90

Valor Probit asociado a los porcentajes de mortalidad y Log de las concentraciones de la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil.

El Logaritmo de la concentración de 5.69 mg/L es 0.755, de 7.59 mg/L es 0.880, de 10.12 mg/L es 1.005, de 13.50 mg/L es 1.130 y de 18 mg/L es 1.255.

Los valores Probit empírico asociados a los porcentajes de mortalidad 33.3 % (4.568), 53.3 % (5.082), 66.6 % (5.428), 80 % (5.841) y 90 % (6.2181) se encuentran en el **cuadro XVIII**.

CUADRO XVIII. Probit empírico asociado a los porcentajes de mortalidad y Log de las concentraciones de la cámara de bioensayos del clorpirifós-etil.

Concentración (mg/L)	Log de la concentración	Mortalidad (%)	Probit empírico
5.69	0.755	33.3	4.568
7.59	0.880	53.3	5.082
10.12	1.005	66.6	5.428
13.50	1.130	80	5.841
18	1.225	90	6.281

Concentración letal media del Clorpirifós-etil en *Capitella cf. capitata*.

En la **figura 15** se encuentra la gráfica del logaritmo de la concentración de clorpirifós-etil (eje X) contra el valor Probit empírico correspondiente a cada porcentaje de mortalidad (eje Y).

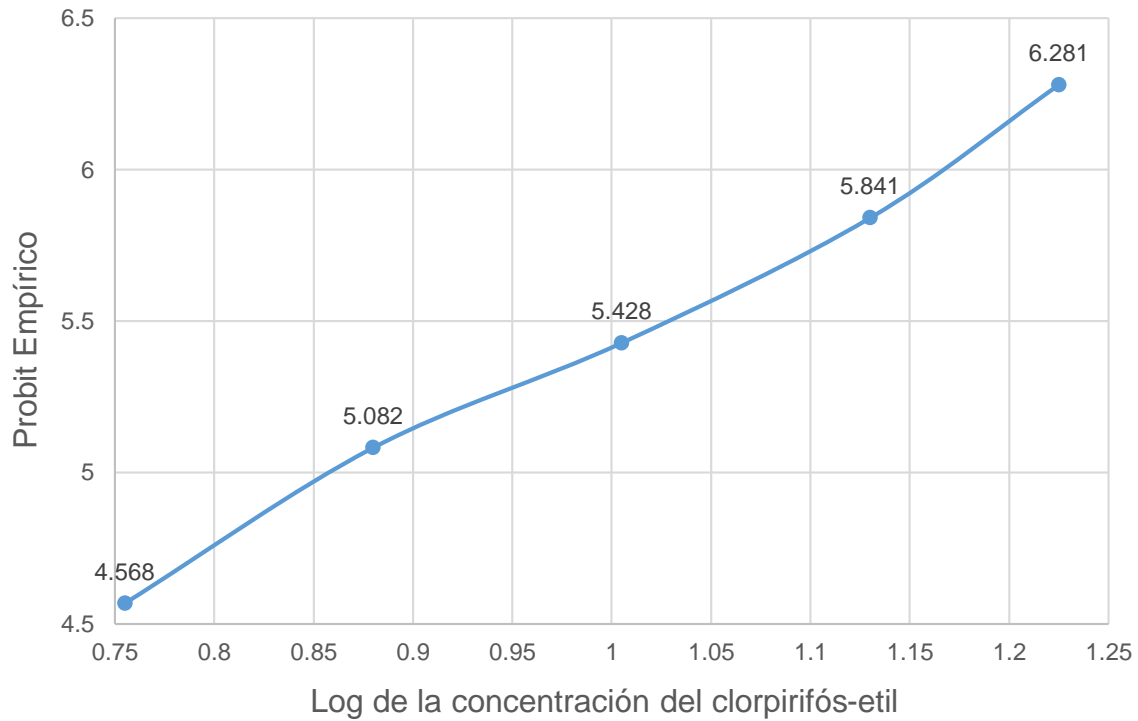


Figura 15. Gráfica del Log de la concentración de clorpirifós-etil contra el valor Probit.

A continuación, en la **figura 16**, se encuentra el ajuste de la recta realizado por el método de mínimos cuadrados. La recta obtenida corresponde a la siguiente ecuación: $y = 3.507x + 1.9365$; donde “y” es el valor probit, “x” es el Log de la concentración y 1.9365 es el valor de la pendiente.

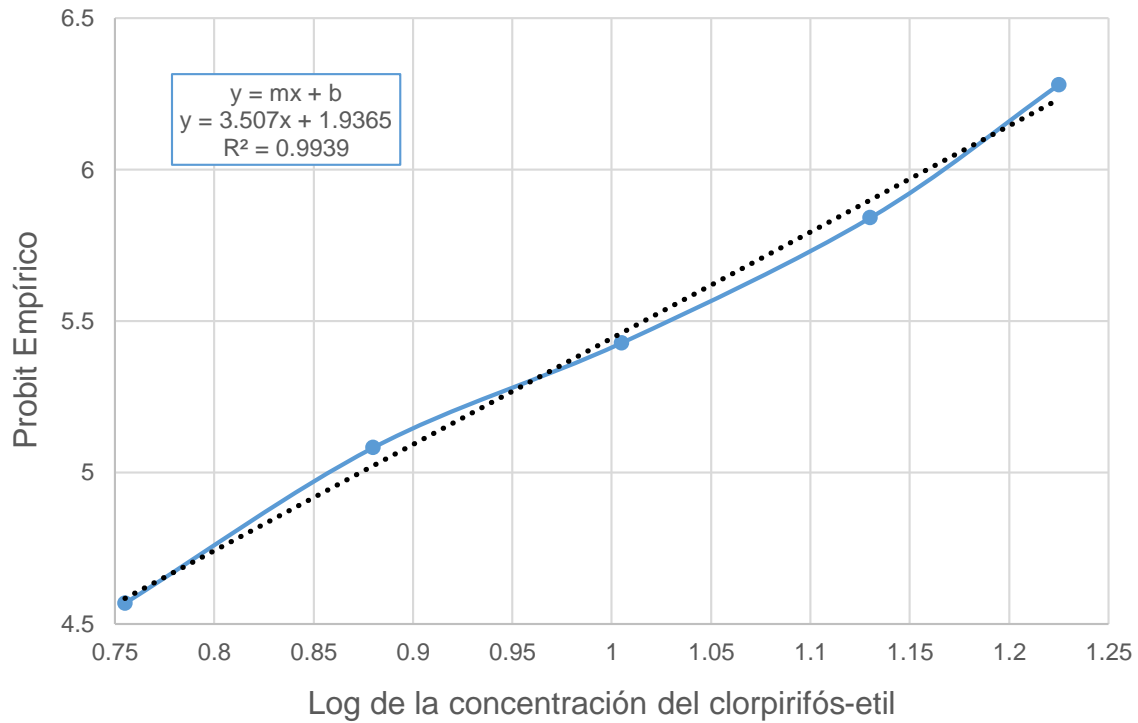


Fig. 16. Recta resultante del ajuste por mínimos cuadrados del Log de la concentración de clorpirifós-etil contra el valor Probit.

En la **figura 17** se observa la gráfica de la recta ajustada por mínimos cuadrados a la cual se le trazó una línea perpendicular al eje Y en el valor Probit empírico 5, que corresponde a un 50% de mortalidad, y que en su punto de intersección con la recta ajustada se proyectó hacia el eje x, lo cual nos indica el Log de la concentración de clorpirifós-etil que elimina la mitad de una población de *Capitella cf. capitata* en 48h (Log CL₅₀), que en este caso es **0.873**.

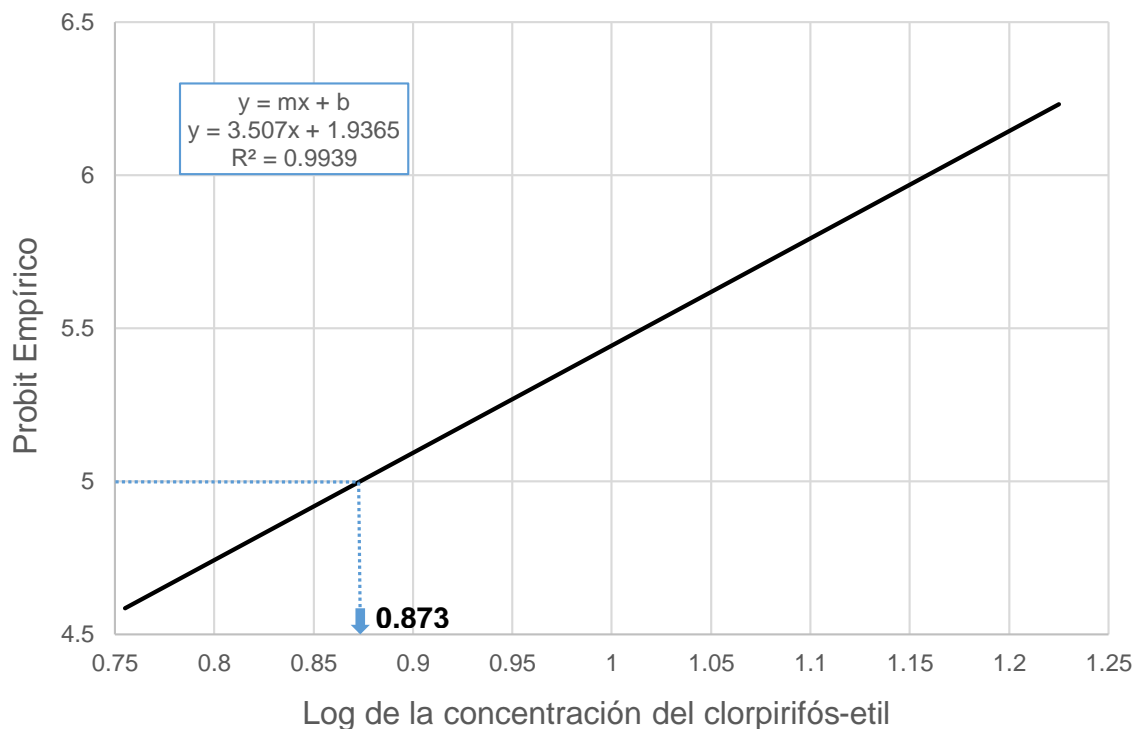


Fig. 17. Representación gráfica del Log de la CL_{50} a 48h del Clorpirifós-etil en *Capitella cf. capitata*.

Al aplicar el Antilogaritmo al Log de la CL_{50} se obtuvo el valor de la CL_{50} a 48 h del clorpirifós-etil en *Capitella cf. capitata* con un intervalo de confianza del 95%, el cual es de 7.46 ± 1.59 mg/L.

Análisis estadístico de la cámara de bioensayos del clorpirifós-etil.

Al realizar el análisis estadístico exploratorio de la variable dependiente (número de organismos muertos) se encontraron los valores del **cuadro XIX**.

CUADRO XIX. Estadística descriptiva de la variable dependiente número de muertos de la cámara de bioensayos del clorpirifós-etil.

Número de valores	15
Media	6.4
Límite de confiabilidad inferior 95%	5.2
Límite de confiabilidad superior 95%	7.7
Mediana	7
Moda	8
Frecuencia de moda	3
Mínimo	3
Máximo	10
Amplitud	7
Varianza	5.12
Desviación estándar	2.26
Error estándar	0.58

Se encontró que el comportamiento de los datos de la variable dependiente tiene una distribución normal mediante el test de normalidad de Shapiro-Wilk ($W = 0.94$, $p = 0.36$) al cumplirse la condición $p > 0.05$. De forma gráfica se puede observar que los valores esperados de normalidad se encuentran dentro del elipse de confianza del 95% (**Fig. 18**).

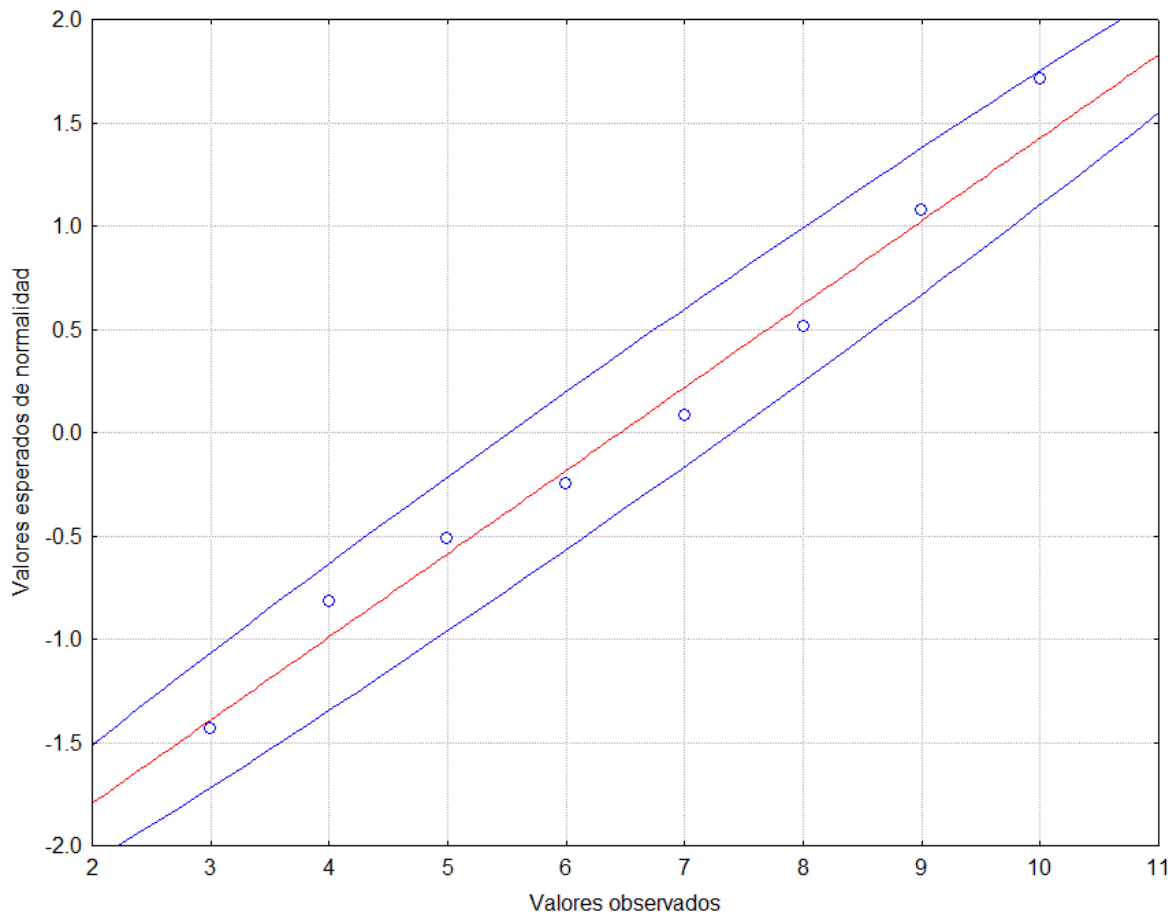


Fig. 18. Normalidad y elipse de confianza del 95% de la variable dependiente de la cámara de bioensayos del clorpirifós-etil.

El análisis de varianza ANOVA demostró que existen diferencias significativas ($F = 12.44$, $p < .05$) entre las concentraciones de clorpirifós-etil y su mortalidad respectiva (**Fig. 19**). Por el contrario, al realizar el mismo análisis entre las tres réplicas y su mortalidad se encontró que no existen diferencias significativas ($F = 0.04$, $p > .05$) como se muestra en la **figura 20**.

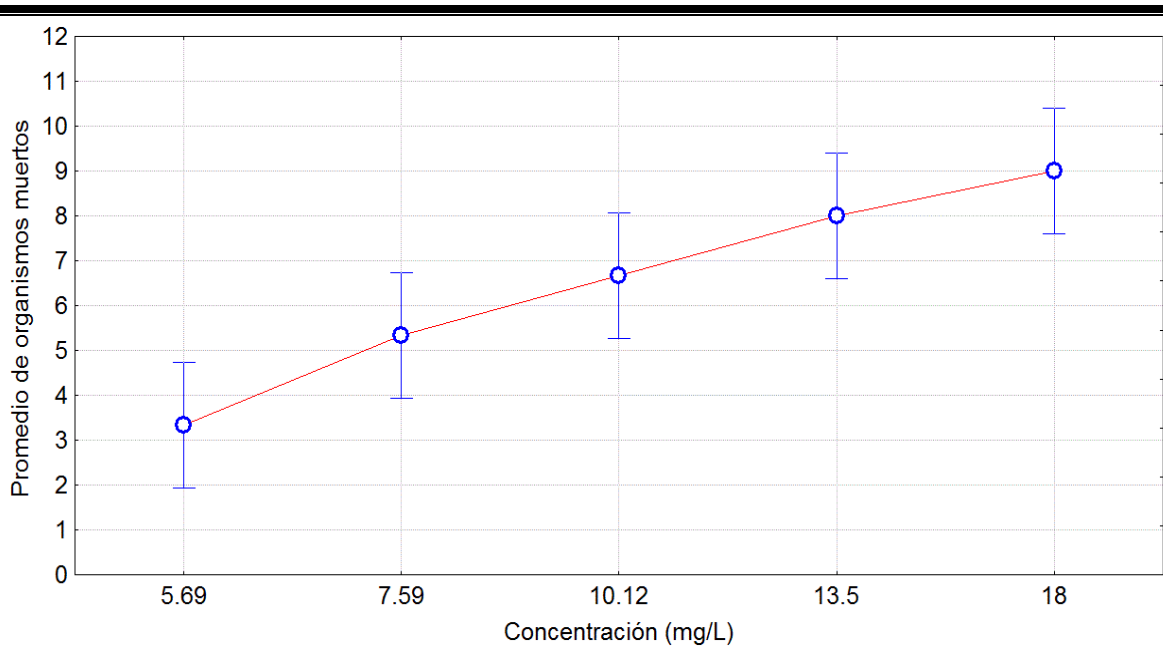


Fig. 19. Promedios y errores estándar de organismos muertos por concentración de clorpirifós-etil.

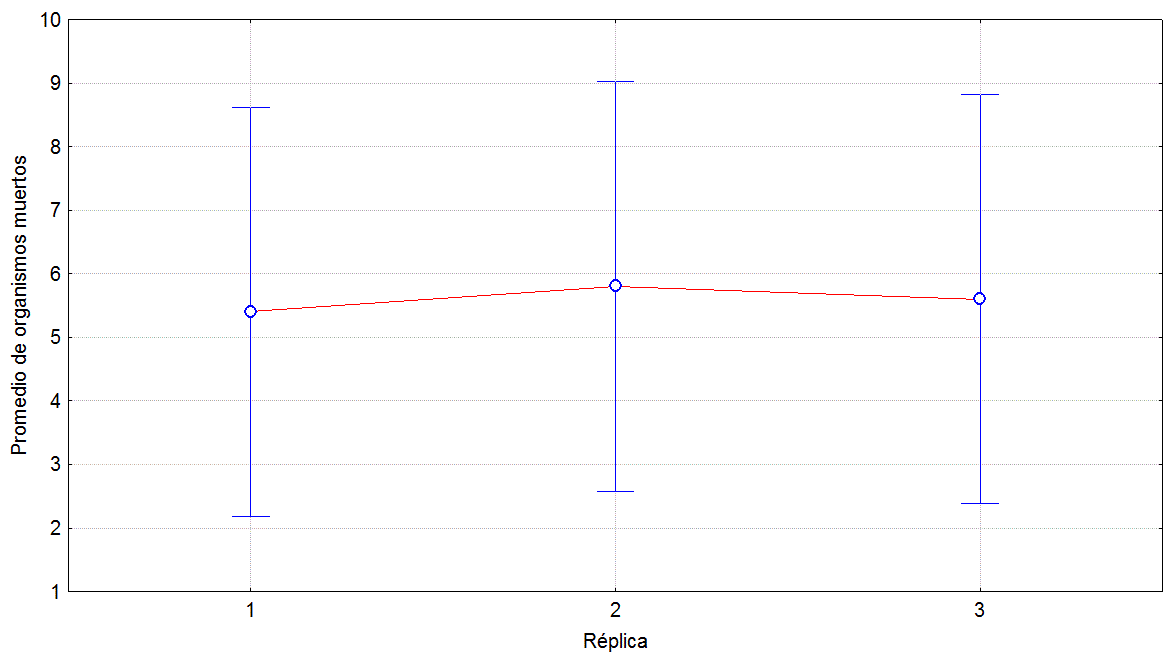


Fig. 20. Promedios y errores estándar de organismos muertos por réplica de la cámara de bioensayos del clorpirifós-etil.

Clasificación de toxicidad del clorpirifós-etil

El valor de la CL_{50} a 48h del clorpirifós-etil en *Capitella cf. capitata* se empleó para obtener las unidades de toxicidad (U.T. = 13.40), lo cual, comparado con la clasificación de toxicidad basada en unidades de toxicidad (Saldaña *et al.*, 2002) se obtuvo que el clorpirifós-etil se clasifica como un producto químico **Altamente Tóxico** para dicha especie (**Cuadro XX**).

CUADRO XX. Clasificación de toxicidad del clorpirifós-etil en *Capitella cf. capitata*.

Unidades de toxicidad (U.T.)	Clasificación
13.40	Altamente tóxico

Riesgo ecológico del Clorpirifós-etil.

Para el caso del riesgo ecológico del clorpirifós-etil tomando en consideración la CL_{50} de *Capitella cf. capitata*, el valor de la concentración ambiental de efectos no previstos (PNEC) es de 0.0726 mg/L, mientras que el de la concentración ambiental prevista (PEC) es de 0.00028 mg/L, con lo cual se obtiene un cociente de riesgo (RQ) de 0.0038, por lo tanto el riesgo ecológico es despreciable (**Cuadro XXI**).

CUADRO XXI. Riesgo ecológico del clorpirifós-etil considerando a *Capitella cf. capitata*.

PEC (mg/L)	PNEC (mg/L)	RQ	Riesgo ecológico
0.00028	0.0726	0.0038	Despreciable

DISCUSIÓN

Nunca antes se habían realizado bioensayos con malatión en poliquetos, sin embargo, si se tienen antecedentes con otras especies acuáticas, principalmente peces y crustáceos. La CL_{50} a 48 h de 27.79 mg/L obtenida en el presente estudio para *Capitella cf. capitata* resulta mayor comparada con la de otros invertebrados acuáticos; el oligoqueto *Limnodrilus hoffmeisteri*, que es el antecedente taxonómico más cercano, tiene una CL_{50} de 69 $\mu\text{g/L}$ a 96 h (Martínez Tabche *et al.*, 2001), que si bien es el doble de tiempo de exposición y eso supone que las concentraciones letales sean menores, la diferencia es bastante, siendo ese valor aproximadamente 400 veces más pequeño que el encontrado en *Capitella cf. capitata*, al parecer, esta especie de oligoqueto es mucho más sensible al malatión que la especie de poliqueto estudiada.

En otros invertebrados acuáticos que se han utilizado como especies de prueba en bioensayos con malatión se tienen concentraciones letales medias, tales como 13 $\mu\text{g/L}$ a 96 h para el cangrejo *Chasmagnathus granulata* (Ferrero *et al.*, 2001), 0.9 $\mu\text{g/L}$ a 48 h, 4.65 $\mu\text{g/L}$ a 96 h y 10 $\mu\text{g/L}$ a 72 h para los crustáceos plantónicos *Daphnia magna*, *Gammarus palustris* y *Moina macrocopa* respectivamente (Zongming Ren *et al.*, 2007; Leight & Van Dolah, 1999; Wong *et al.*, 1995), siendo *Capitella cf. capitata* menos sensible al malatión que dichas especies. Para los vertebrados acuáticos como los peces, se han obtenido CL_{50} más altas como la de *Cyprinus carpio* con un valor de 600 mg/L y la de *Salmo gairdneri* con 1400 mg/L a 96 h (Vitozzi & de Angelis, 1991) y otras más bajas que la de *Capitella cf. capitata* como en *Oreochromis niloticus* con 2.59 mg/L a 48 h e *Hyphessobrycon eques* con 3.04 mg/L a 48 h (Hassan *et al.*, 1993; Coleone *et al.*, 2014). Este amplio rango de sensibilidad al malatión entre las distintas especies de peces puede deberse a las condiciones en que se realizan las pruebas y a las características propias de cada organismo como su tamaño, edad, sexo y sus características morfológicas y fisiológicas. Además, cuando se utilizan organismos recolectados en campo existen otras variables, ya que estos pudieran tener alguna resistencia a la sustancia empleada, traer alguna enfermedad, estar estresados

por el procedimiento de recolecta o presentar algún deterioro crónico. En caso de ser alimentados, estos organismos recolectados pudieran verse afectados por el cambio de alimentación y también el propio alimento puede ocasionar alguna alteración en el efecto del tóxico.

Para el caso del clorpirifós-etil, la CL_{50} encontrada a 48 h para *Capitella cf. capitata* fue de 7.46 mg/L. Al igual que con el valor obtenido en el bioensayo de malatión, al comparar esta con el valor del antecedente taxonómico más cercano, que es la especie de oligoqueto *Limnodrilus hoffmeisteri* con una CL_{50} a 24 h de 1703 $\mu\text{g/L}$ (Iannacone *et al.*, 2000) Se observa que la especie del presente estudio es más tolerante a dicho plaguicida al tener una CL_{50} superior (4.3 veces más grande), esto a pesar de que el tiempo de exposición en el estudio del oligoqueto fue la mitad del empleado en este estudio y eso implicaría concentraciones letales mayores.

Comparándolo con la CL_{50} de clorpirifós-etil de otros invertebrados acuáticos, se tiene, por ejemplo, que es mayor que el de los cangrejos *Trichodactylus borellianus*, *Spiralothelphusa hydrodroma* y *Oziotelphusa senex senex* con valores de 114.57 $\mu\text{g/L}$ a 48 h, 120 $\mu\text{g/L}$ a 96 h y 200 $\mu\text{g/L}$ a 96 h respectivamente (Montagna, 2012; Senthilkumar *et al.*, 2007; Radhakrishnaiah *et al.*, 1995). Igualmente es mayor que el valor de los camarones *P. pugio* con 0.37 $\mu\text{g/L}$ a 96 h (Key & Fulton, 1993) y *Palaemonetes argentinus* con 0.49 $\mu\text{g/L}$ a 96 h (Montagna & Collins, 2008). También, especies de vertebrados como los peces resultaron tener una CL_{50} menor que la de *Capitella cf. capitata*. Murty (1986) realizó bioensayos de toxicidad aguda (96 h) con varias especies de peces de agua dulce, obteniendo valores de 2.4 a 280 $\mu\text{g/L}$. Aunque dichos peces habitan ambientes diferentes en cuanto a salinidad a aquellos que se pueden encontrar en los hábitats de la especie de estudio, no existen muchas diferencias en la sensibilidad al clorpirifós-etil entre organismos de agua dulce y agua salada que sean taxonómicamente similares (Barron & Woodburn, 1995).

Por lo tanto, de manera general, se puede decir que *Capitella cf. capitata* es más resistente al malatión que las demás especies de invertebrados y en algunos casos más resistente o en otros menos resistente que especies de vertebrados acuáticos. En cuanto al

clorpirifós-etil, esta especie de poliqueto es más resistente que los demás invertebrados, pero también más resistente que todas las especies de vertebrados acuáticos que se han estudiado.

Las concentraciones de malatión y clorpirifós-etil se prepararon con los plaguicidas comerciales Malation500[®] y Tyson4E[®] respectivamente, por lo tanto, si se realizara el mismo procedimiento pero con los ingredientes puros o con otros plaguicidas comerciales, se podrían obtener resultados diferentes. Esto es debido a que cada formulación contiene el ingrediente activo más diferentes solventes y emulsificantes, los cuales también podrían generar distintos efectos negativos en los organismos de prueba y aumentar o disminuir la persistencia de los plaguicidas.

La hipótesis formulada que menciona que *Capitella cf. capitata* es más resistente al malatión que al clorpirifós-etil se confirma con los resultados obtenidos, puesto que la CL₅₀ del malatión es 3.3 veces más grande que la del clorpirifós-etil. Solamente se tiene un antecedente de otro plaguicida empleado en pruebas de toxicidad con organismos de la familia Capitellidae; Méndez *et al.* (2008) empleó el insecticida organofosforado metamidofos en *Capitella* sp. Y del estero del Yugo en Mazatlán, México, obteniendo una CL₅₀ de 0.54 mg/g de sedimento seco a 16 días. Este valor no es comparable de forma directa con el del presente estudio debido a que el tiempo de exposición es mucho mayor y además, las CL₅₀ de *Capitella cf. capitata* expresa la concentración por litro de agua, a diferencia de la del estudio mencionado, que indica la concentración por gramo de sedimento.

No obstante, los resultados si se pueden comparar con los resultados de bioensayos de toxicidad aguda con otras sustancias en organismos de la familia Capitellidae. A continuación se presentan las sustancias que han sido empleadas en dicha familia ordenadas de menor a mayor toxicidad con base en su CL₅₀: detergentes comerciales (Uc Peraza & Delgado Blas, 2015) < malatión (este estudio) < petróleo crudo (Carr & Reish, 1977) < cadmio (Reish, 1980) < clorpirifós-etil (este estudio) < plomo (Reish, 1980) < cromo y trióxido de cromo (Reish, 1980; Water Research Centre, 1984) < zinc < cobre < mercurio (Reish, 1980) < cloruro de mercurio (Eisler, 1987).

Tanto en la cámara de bioensayos de malatión como en la de clorpirifós-etil, se observaron organismos muertos a partir de la lectura de mortalidad de las 16 h. A partir de

ahí el número de organismos muertos en las distintas lecturas se mantuvo variable; no se detectó ningún patrón que relacione la mortalidad con el tiempo.

Al realizar el análisis de varianza ANOVA al 95% de confiabilidad con la mortandad de los organismos como variable dependiente, se encontró que existieron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre la mortalidad de *Capitella* cf. *capitata* y las diferentes concentraciones de ambos plaguicidas. Esto comprueba que, como era de esperarse, los resultados de mortalidad dependen de la concentración empleada, y que a mayor concentración se tiene un mayor número de organismos muertos. Este mismo análisis se empleó para identificar las diferencias de mortalidad entre las tres réplicas de cada cámara de bioensayos, encontrándose que no existen diferencias significativas ($P > 0.05$) entre ellas.

Los parámetros fisicoquímicos de los puntos de muestreo en la bahía de Chetumal fueron, en promedio, los siguientes: $\text{pH} = 7.82 \pm 0.02$, $T = 25.3 \pm 0.15$ °C, $\text{OD} = 8.50 \pm 0.11$ mg/L y salinidad = 9 ‰. En las cámaras de bioensayos de ambos plaguicidas, el único parámetro que se mantuvo constante fue la salinidad, en 9 ‰, debido a que fue un parámetro controlado. Para los demás, se tienen promedios de $\text{pH} = 7.75$ y 7.70 , $T = 24.79$ y 25.74 °C y $\text{OD} = 5.02$ y 5.03 mg/L para las cámaras de bioensayos de malatión y clorpirifós-etil respectivamente. Los parámetros observados son muy similares a los encontrados en el hábitat natural de *Capitella* cf. *capitata*, exceptuando el oxígeno disuelto, que tuvo un valor menor en ambos casos. Sin embargo, se considera que esta diferencia de oxígeno disuelto no es determinante en los resultados, pues como mencionan Díaz & Rosenberg (1995) los poliquetos representan uno de los taxa más tolerante a bajas concentraciones de oxígeno, y esto se comprueba al no detectarse ningún organismo muerto en los controles sin plaguicida. El pH, en ambas cámaras de bioensayos, muestra una tendencia de disminuir ligeramente conforme se aumenta la concentración de los plaguicidas (Figuras 7 y 14). En la cámara de bioensayos de malatión, el pH disminuyó de un promedio máximo de 7.8 a un promedio mínimo de 7.72 (1.02 ‰), para el caso del clorpirifós-etil disminuyó de 7.77 a 7.61 (2.05 ‰). Así, se observa que el pH disminuye en mayor medida en el plaguicida más tóxico. Los demás parámetros fisicoquímicos no parecen estar relacionados con las diferentes concentraciones de plaguicidas al no detectarse ninguna tendencia.

Los dos plaguicidas empleados se degradan en el ambiente por medio de la hidrólisis, la cual depende en gran medida del pH; Chapman & Cole (1982) establecieron que el malatión en solución acuosa a una $T = 25^{\circ}\text{C}$, tiene una vida media de 11.9 y 3.71 días a un pH de 7 y 8 respectivamente; al contar con valores de pH intermedios y una temperatura similar en la cámara de bioensayos, posiblemente existió una degradación del malatión por hidrólisis en cada cristalizador, pero no suficiente para disminuir la concentración ni a la mitad de la concentración inicial. Por su parte, el clorpirifós-etil tiene una vida media en solución acuosa a una $T = 25^{\circ}\text{C}$ de 35.5 y 22.8 días a un pH de 6.9 y 8.1 respectivamente (Meikle & Youngson, 1978); así, se puede afirmar que el clorpirifós-etil tiene una mayor duración en el agua, por lo que no se considera que haya habido una reducción significativa en la concentración inicial del plaguicida en la cámara de bioensayos por esta vía. Por otra parte, no se puede descartar la degradación microbiana de los plaguicidas (Martínez Tabche *et al.*, 2001) debido a que los sedimentos son ambientes con altas cantidades de materia orgánica, pudiendo darse la proliferación de microorganismos. Para tener una mayor certeza, sería recomendable realizar la medición de los plaguicidas al inicio y al final de las pruebas, y en caso que las concentraciones disminuyan considerablemente realizar bioensayos con renovación de solución.

Las CL_{50} obtenidas también fueron de utilidad para obtener la clasificación de toxicidad de los plaguicidas estudiados en *Capitella* cf. *capitata* y para realizar una estimación de su riesgo ecológico. Primeramente, en cuanto a la clasificación toxicológica, se obtuvo que el malatión se encuentra clasificado como Tóxico y el clorpirifós-etil como Altamente Tóxico para la especie estudiada. Sin embargo, a pesar que dichos plaguicidas resulten tóxicos para la especie de poliqueto, se obtuvieron cocientes de riesgo de 0.00034 para el malatión y 0.0038 para el clorpirifós-etil, con lo cual, al ser valores menores a 1, se estima que no representan un riesgo ecológico cuando se toma en cuenta a *Capitella* cf. *capitata*. Esto es debido a que las concentraciones ambientales previstas (PEC) son muy bajas. Si se consideraran las CL_{50} de especies más sensibles, se obtendrían cocientes de riesgo mayores. Sin embargo, no se descarta que dichos plaguicidas por sí mismos, o en combinación con otras sustancias químicas, puedan tener efectos sinérgicos o generar efectos a largo plazo (crónicos), ya que estos últimos se pueden manifestar a concentraciones muy

bajas. Pese a que el riesgo es despreciable para ambos plaguicidas, se recomienda emplear el malatión en vez del clorpirifós-etil para aplicación urbana en campañas de fumigación, ya que ambos son altamente efectivos para combatir las enfermedades transmitidas por vector (CENAPRECE, 2016) y su cociente de riesgo es 11.17 veces más pequeño. Es importante resaltar que los valores PEC utilizados para obtener los cocientes de riesgo, fueron calculados por Vryzas *et al.* (2008) con base en 88 muestreos realizados de 1999 a 2007 en 8 puntos de muestreo ubicados a lo largo de los ríos Ardas, Evros y Erythropotamos en la frontera de Grecia con Bulgaria. Por lo tanto, por las diferencias climatológicas, geológicas y sociales, estos valores calculados podrían diferir a las concentraciones ambientales previstas para la Bahía de Chetumal, no obstante, nos permiten tener una referencia con respecto a este término y las posibles consecuencias. Se recomienda en futuros trabajos la determinación de dicha variable.

Debido a la alta resistencia al malatión y sobre todo al clorpirifós-etil de *Capitella cf. capitata*, en comparación con otras especies acuáticas, podría utilizarse como bioindicador de contaminación de los plaguicidas estudiados en las comunidades bénticas de la Bahía de Chetumal. Así mismo, podría ser utilizada con fines de remediación en sustratos contaminados, pues aunque no haya referencias bibliográficas del uso de poliquetos con este fin, sí se han empleado gusanos de tierra para remover metales, plaguicidas y otros compuestos orgánicos del suelo; a lo cual se le conoce como vermirremediación (Sinha *et al.*, 2008). Por lo tanto, sería recomendable estudiar y evaluar la capacidad de *Capitella cf. capitata* para biodegradar y bioacumular dichos plaguicidas.

CONCLUSIONES

- Mediante los bioensayos de toxicidad aguda con organismos de *Capitella cf. capitata* se obtuvieron las CL_{50} a 48 h de los plaguicidas organofosforados malatión y clorpirifós-etil, con valores de $27.79 \text{ mg/L} \pm 2.67$ y $7.46 \text{ mg/L} \pm 1.59$ respectivamente; el clorpirifós-etil resultó ser más tóxico que el malatión.
- La mortalidad de *Capitella cf. capitata* aumenta conforme se aumenta la concentración de los plaguicidas estudiados, puesto que existieron diferencias significativas ($p < 0.05$) en la mortalidad de las diferentes concentraciones de ambas cámaras de bioensayos.
- Por las Unidades de Toxicidad obtenidas en el presente estudio, el malatión (U.T. = 3.59) se clasifica como Tóxico y el clorpirifós-etil (U.T. = 13.40) como Altamente Tóxico para organismos de *Capitella cf. capitata*.
- Los cocientes de riesgo del malatión y clorpirifós-etil indican que no existe un riesgo ecológico al realizar aplicaciones de estos plaguicidas considerando a *Capitella cf. capitata* y que el riesgo del clorpirifós-etil es mucho mayor que el del malatión.
- *Capitella cf. capitata* es más tolerante al malatión y al clorpirifós-etil que muchos otros organismos acuáticos, por lo que pueden ser buenos bioindicadores de presencia de ambos plaguicidas, pero principalmente del clorpirifós-etil.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar bioensayos de toxicidad aguda de los plaguicidas estudiados con otras especies de la Bahía de Chetumal, debido a que *Capitella cf. capitata* resultó ser, de forma general, resistente a dichos plaguicidas si se compara con los resultados obtenidos en los antecedentes.
- Realizar mediciones y los análisis correspondientes de los plaguicidas malatión y clorpirifós-etil en la Bahía de Chetumal en sus temporadas de mayor aplicación urbana, que por lo regular son en épocas de lluvia durante las campañas de fumigación, para lograr determinar las Concentraciones Ambientales Previstas (PEC) del cuerpo de agua en específico y así obtener un Cociente de Riesgo más representativo y certero que ayude a determinar si existe un riesgo ecológico en la bahía.
- Es recomendable que la instancia encargada de la aplicación de plaguicidas para campañas de fumigación contra enfermedades transmitidas por vector, utilice preferentemente malatión en lugar de clorpirifós-etil, dado que su Cociente de Riesgo es considerablemente menor.
- Estudiar y evaluar la capacidad de *Capitella cf. capitata* para biodegradar y bioacumular los plaguicidas malatión y clorpirifós-etil, ya que estos organismos resultaron ser más resistentes que otros organismos acuáticos. Esto con el objetivo de determinar si es factible su utilización para la remediación de sustratos contaminados con dichos plaguicidas.
- Determinar los efectos reproductivos, conductuales, de crecimiento y cualquier otra afectación a los órganos y sistemas de los organismos de *Capitella cf. capitata* y de otras

especies acuáticas mediante bioensayos de toxicidad crónicos o subletales con los plaguicidas malatión y clorpirifós-etil.

- Realizar monitoreos en la Bahía de Chetumal sobre los niveles de contaminación de los plaguicidas en general, y específicamente del malatión y clorpirifós-etil para verificar que no sobrepasen las concentraciones letales medias de los organismos, o en caso de excederse, realizar acciones de prevención y remediación de tal manera de evitar provocar daños en los ecosistemas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA, AEEA, & WPCF. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid: Dias de Santos.
- Barron, M. G., & Woodburn, K. B. (1995). Ecotoxicology of chlorpyrifos. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, 144, 1-93.
- Campbell, P. C., Chapman, P. M., & Hale, B. A. (2006). Risk Assessment of Metals in the Environment. *Chemicals in the Environment: Assessing and Managing Risk, Issues in Environmental Science and Technology*, No. 22, 103.
- Carr, R., y Reish, D. J. (1977). The effect of petroleum hydrocarbons on the survival and life history of polychaetous annelids. En Wolfe D. A., *Fate and Effects of Petroleum Hydrocarbons in Marine Ecosystems and Organisms* (pp. 168-173). Pergamon: Oxford,
- CENAPRECE (Centro Nacional de Programas Preventivos y Control de Enfermedades). (2016). Monitoreo de resistencia a insecticidas (adulticidas) utilizados en el programa de enfermedades transmitidas por vectores en México. 38-61. Ciudad de México: Secretaría de Salud.
- Chapman, R. A., & Cole, C. M. (1982). Observations on the influence of water and soil pH on the persistence of insecticides. *J Environ Sci Health B*, 17(5), 487-504. doi:10.1080/10934528209375049

-
- Coleone, A. C., Abe, F. R., Machado, A. A., Américo, J. H., de Oliveira Marinho, M., Machado neto, J. G., & Da silva Paganini, W. (2014). Ecotoxicidade e avaliação de risco ambiental do malation (FYFANON) utilizado no combate a dengue para Peixe Mato Grosso.
- Deka, S., & Mahanta, R. (2012). A Study on the Effect of Organophosphorus Pesticide Malathion on Hepato-Renal and Reproductive Organs of Heteropneustes fossilis (Bloch). *The Science Probe*.
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (1995). Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and behavioral responses of benthic macrofauna. *Oceanography Marine Biology, Annual Review*(33), 245-303.
- Eisler, R. (1987). Mercury hazards to fish, wildlife and invertebrates: An synoptic review, Biological Report 85 (1.10) Contaminant Hazard Review, No. 10, . *U.S. Fish and Wildlife Research centre*.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (1989). *Guidelines for Legislation on the Control of Pesticides*. Obtenido de <http://www.fao.org/AG/AGP/AGPP/Pesticid>
- Ferrando, A., Esteves, J. L., Elías, R., & Méndez, N. (2010). Intertidal macrozoobenthos in sandy beaches of Bahía Nueva (Patagonia, Argentina) and their use as bioindicators of environmental impact. *Scientia Marina*, 74(2), 345-352.
- Ferrero, A. A., Gutiérrez , M. M., & Cervellini, P. M. (2001). Evaluación en laboratorio de la toxicidad aguda de los insecticidas malatión y deltametrina en *Chasmagnathus*

granulata Dana (Crustacea, Brachyura, Grapsidae). *Investig. mar.* 29 (1), 107-111.

doi: 10.4067/S0717-71782001000100009

García Garza, M. E. (2009). Capitellidae Grube, 1862. En J. A. De León González, J. R. Bastida Zavala, L. F. Carrera Parra, M. E. García Garza, A. Peña Rivera, S. I. Salazar Vallejo, & V. Solís Weiss, *Poliquetos (Annelida: Polychaeta) de México y América tropical* (págs. 101-104). Monterrey: Universidad Autónoma de Nuevo León.

Hassan, I. M., Abdallah, M. A., Naguib, M. M., & Abou Donia, M. A. (1993). Toxicity, distribution, accumulation and cooling loss of malathion in tissues of tilapia and common carp fishes. *Grasas y Aceites*, 44(6), 339-344.

Hermanutz, R. O. (1978). Endrin and malathion toxicity to flagfish (*Jordanella floridae*). *Archives of environmental contamination and toxicology*, 159-168.

Iannacone, J., Alvarino, L., Caballero, C., & Sánchez, J. (2000). Cuatro ensayos ecotoxicológicos para evaluar lindano y clorpirifos. *Gayanna (Concepción)*, 64(2). doi:10.4067/S0717-65382000000200003

key, P. B., & Fulton, M. H. (1993). Lethal and sub-lethal effects of chlorpyrifos exposure on adult and larval stages of the grass shrimp. *Palaemonetes pugio*. *J. Environ. Sci Health*, 28, 621-640.

Leight, A. K., & Van Dolah, R. F. (1999). acute toxicity of the insecticides endosulfan, chlorpyrifos, and malathion to the epibenthic estuarine amphipod *Gammarus palustris* (Bousfield). *Environ. Toxicol. Chem*, 18(5), 958-964.

-
- Liñero Arana, M. (2009). Prólogo. En J. A. De León González, J. R. Bastida Zavala, L. F. Carrera Parra, M. E. García Garza, A. Peña Rivera, S. I. Salazar Vallejo, & V. Solís Weiss, *Poliquetos (Annelida: Polychaeta) de México y América* (pág. v). Monterrey: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Martínez Tabche, L., Galar Martínez, M., Olvera Hernández, E., Chehue Romero, A., López López, E., & Proal Nájera, J. B. (2001). Captación de malatión en sedimento artificiales y su efecto tóxico sobre *Limnodrilus hoffmeisteri*. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 17, 137-146.
- Meikle, R. W., & Youngson, C. R. (1978). The hydrolysis rate of chlorpyrifos, O-O-diethyl O-(3,5,6-trichloro-2-pyridyl) phosphorothioate, and its dimethyl analog, chlorpyrifos-methyl, in dilute aqueous solution. *Arch Environ Contam Toxicol*, 7(1), 13-22.
- Mendez, N., & Green-Ruiz, C. (2006). Cadmium and Copper Effects on Larval Development and Mortality of the Polychaete *Capitella* Sp Y from Estero Del Yugo, Mazatlan, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*(172), 291-299. doi:10.1007/s11270-005-9047-0
- Méndez, N., Aguas-Cabrera, D. N., & García-de la Parra, L. M. (2008). Effects of methamidophos on sediment processing and body mass of *Capitella* sp. Y from Estero del Yugo, Mazatlán, Mexico. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*(361), 92-97.

-
- Montagna, M. C. (2012). Toxicidad de clorpirifos como elemento activo de un formulado comercial en juveniles del cangrejo *Trichodactylus borellianus*. *Natura Neotropicalis*, 31-40.
- Montagna, M. C., & Collins, P. A. (2008). Oxygen consumption and ammonia excretion of the freshwater crab *Trichodactylus borellianus* exposed to chlorpyrifos and endosulfan insecticides. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 53, 150-155.
- Montenegro, R. A. (2001). *Informe sobre los riesgos sanitarios y ambientales del Malathion*. Córdoba, Argentina. Recuperado de <http://webs.chasque.net/~rapaluy1/malation/informe1.html>
- Moore, M. T., Huggett, D. B., Gillette, W. B., Rodgers, J. H., & Cooper, C. M. (1998). Comparative Toxicity of Chlordane, Chlorpyrifos, and Aldicarb to Four Aquatic Testing Organisms. *ARCHIVES OF Environment Contamination and Toxicology*.
- Murty, A. S. (1986). Toxicity of Pesticides to Fish. *CRC Press (Boca Raton, FL)*, 2, 143.
- National Wildlife Federation. (1984). *34 Plaguicidas. Es posible su uso seguro?* Washington: NWF.
- Oshida, P., & Reish, D. J. (1975). effects of chromium on reproduction in polychaetes. *So. Calif. Coastal Water Research Project, Annual Rept.*, 55-60.
- Puig, A. (s.f.). *Ensayos de toxicidad*. Recuperado en 2016, de <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Ensayosde.htm>

-
- Radhakrishnaiah, K., Sivaramakrishna, B., Suresh, A., & Chamundeswari, P. (1995). Pesticidal impact on the protein metabolism of freshwater field crab, *Oziotelphusa senex senex* (Fabricius). *Biomed. Environ.*, 8(2), 137-148.
- Ramírez Romero, P., & Mendoza Cantú, A. (2008). Introducción. En P. Ramírez Romero, & A. Mendoza Cantú, *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo. La experiencia en México* (primera ed., pág. 11). México: SEMARNAT.
- Reigart, J. R., & Roberts, J. R. (1999). Organophosphate Insecticides. *Recognition and Management of Pesticide Poisonings 5th ed.*; U.S Environmental Protection Agency, Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances, Office of Pesticide Programs, U.S. Government Printing Office: Washington, DC, 34-47.
- Reish, D. J. (1980). The effect of different pollutants on ecological important polychaete worms. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Narragansett, R. I. EPA, 600/3-80-053, 138.
- Relyea, R. A. (2004). Synergistic impacts of malathion and predatory stress on six species of North American tadpoles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 23(4), 1080-1084.
- Saldaña, P., Lerdo de Tejada, A., Gómez, M. A., & López, R. (2002). *La importancia de incluir análisis de toxicidad en descargas industriales y municipales que afectan a los cuerpos receptores*. Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

-
- Senthilkumar, P., K. Samyappan, S. Jayakumar, & M. Ddeecaraman. (2007). Effect of chlorpyrifos on the nutritive value in a freshwater field crab, *Spiralothelphusa hydrodroma*. *Res. J. Agric. and Biol.*, 3(6), 760-766.
- Sinha, R. K., Bharambe, G. & Ryan, D. (2008) Converting wasteland into wonderland by earthworms—a low-cost nature’s technology for soil remediation: a case study of vermiremediation of PAHs contaminated soil. *The Environmentalist*, 28(4), 466-475. doi: 10.1007/s10669-008-9171-7
- Uc Peraza, R. G., & Delgado Blas, V. H. (2015). Acute toxicity and risk assessment of three commercial detergents using the polychaete *Capitella* sp. C from Chetumal Bay, Quintana Roo, Mexico. *Internacional Aquatic Research*, 2-3. doi:10.1007/s40071-015-0112-z
- US EPA. (1992). *Framework for Ecological Risk Assessment*. Washington: Risk Assessment Forum Report No. EPA/630/R-92/00.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1986). *Ambient water quality criteria for Chlorpyrifos*. Washinton, DC.
- Vitozzi, L., & de Angelis, G. (1991). A critical review of comparative acute toxicity data on freshwater fish. *Aquatic Toxicol.*, 19, 167-204.
- Vryzas, Z., Vassiliou, G., Alexoudis, C., & Papadopoulou Mourkidou, E. (2008). Spatial and temporal distribution of pesticide residues in surface waters in northeastern Greece. *Elsevier*, 8. doi:10.1016/j.watres.2008.09.021

Water Research Centre. (1984). *Proposed Enviromental Quality Standars for List II Substances in Water, Chromium.*

Watts, M. (2012). *Clorpirifos: Un posible COP a nivel global.* Pesticide Action Network Norteamérica (PANNA). Oakland, California. 46 pp.

Wong , C. K., Chu, K. H., & Shum, F. F. (1995). Acute and chronic toxicity of malathion to the freshwater cladoceran *Moina macrocopa*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 84(3), 399-405. doi:10.1007/BF00475351

Zongming Ren, Jinmiao Zha, Mei Ma, Zijian Wang, & Almut Gerhardt. (2007). The early warning of aquatic organophosphorus pesticide contamination by on-line monitoring behavioral changes of *Daphnia magna*. *Environ Monit Assess*, 377. doi:10.1007/s10661-007-9629-y

ANEXOS

Anexo 1. Pruebas exploratorias

CUADRO XXII. Resultados de la prueba exploratoria de malatión donde se expusieron 10 organismos de *Capitella cf. capitata* por cada concentración.

Concentración (mg/L)	Número de organismos muertos			
	16h	24h	48h	Total
Control	0	0	0	0
1.62	0	0	0	0
5.4	0	0	0	0
18	0	0	2	2
60	3	4	3	10
200	10	0	0	10

CUADRO XXIII. Resultados de la prueba exploratoria de clorpirifós-etil donde se expusieron 10 organismos de *Capitella cf. capitata* por cada concentración.

Concentración (mg/L)	Número de organismos muertos			
	16h	24h	48h	Total
Control	0	0	0	0
1.62	0	0	0	0
5.4	0	0	3	3
18	0	4	3	7
60	9	1	0	10
200	10	0	0	10

Anexo 2. Parámetros fisicoquímicos de los bioensayos

CUADRO XXIV. Parámetros fisicoquímicos de la cámara de bioensayos de malatión al inicio de la prueba.

Concentración (mg/L)	Réplica	pH	Oxígeno disuelto (mg/L)	Temperatura (°C)	Salinidad (‰)
Control	1	7.81	6	24.6	9
18.5	1	7.77	5.6	24.8	9
	2	7.79	6.1	24.5	9
	3	7.77	5.7	24.5	9
23.72	1	7.77	5.4	24.6	9
	2	7.78	5.8	24.7	9
	3	7.76	5.6	24.7	9
30.42	1	7.75	5.7	24.6	9
	2	7.74	5.7	24.5	9
	3	7.75	5.3	24.5	9
39	1	7.75	5.8	24.6	9
	2	7.74	5.6	24.7	9
	3	7.74	5.9	24.6	9
50	1	7.75	5.4	24.5	9
	2	7.73	5.8	24.5	9
	3	7.72	5.6	24.7	9

CUADRO XXV. Parámetros fisicoquímicos de la cámara de bioensayos de malatión al final de la prueba.

Concentración (mg/L)	Réplica	pH	Oxígeno disuelto (mg/L)	Temperatura (°C)	Salinidad (‰)
Control	1	7.79	4.2	25.1	9
18.5	1	7.76	4.3	25	9
	2	7.76	4.5	24.9	9
	3	7.77	4.6	25	9
23.72	1	7.74	4.1	25.1	9
	2	7.75	4.7	25.1	9
	3	7.75	4.5	25	9
30.42	1	7.73	4.3	24.9	9
	2	7.72	4.2	25	9
	3	7.75	4.6	24.9	9
39	1	7.73	4.2	25	9
	2	7.73	4.3	24.9	9
	3	7.71	4.3	25.1	9
50	1	7.72	4.2	25	9
	2	7.73	4.5	25	9
	3	7.72	4.3	24.9	9

CUADRO XXVI. Parámetros fisicoquímicos de la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil al inicio de la prueba.

Concentración (mg/L)	Réplica	pH	Oxígeno disuelto (mg/L)	Temperatura (°C)	Salinidad (‰)
Control	1	7.8	5.6	25.6	9
18.5	1	7.79	5.6	25.5	9
	2	7.79	5.9	25.5	9
	3	7.78	6.1	25.7	9
23.72	1	7.77	5.6	25.6	9
	2	7.78	5.8	25.7	9
	3	7.77	5.6	25.7	9
30.42	1	7.71	5.3	25.6	9
	2	7.72	5.5	25.5	9
	3	7.7	5.7	25.6	9
39	1	7.69	5.4	25.5	9
	2	7.7	5.3	25.5	9
	3	7.68	5.6	25.6	9
50	1	7.64	5.5	25.6	9
	2	7.63	5.7	25.6	9
	3	7.63	5.4	25.7	9

CUADRO XXV11. Parámetros fisicoquímicos de la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil al final de la prueba.

Concentración (mg/L)	Réplica	pH	Oxígeno disuelto (mg/L)	Temperatura (°C)	Salinidad (‰)
Control	1	7.75	4.8	25.8	9
5.69	1	7.75	3.9	25.9	9
	2	7.74	4.5	25.9	9
	3	7.75	4.5	25.8	9
7.59	1	7.72	4.3	26	9
	2	7.71	4.5	25.9	9
	3	7.71	4.5	25.9	9
10.12	1	7.66	4.8	25.8	9
	2	7.69	4.5	26	9
	3	7.67	4.6	25.9	9
13.5	1	7.62	4.6	26	9
	2	7.64	4.3	25.9	9
	3	7.62	4.1	25.9	9
18	1	7.6	4.2	25.9	9
	2	7.59	4.7	25.8	9
	3	7.6	4.5	26	9

Anexo 3. Resultados de las lecturas de mortalidad de las cámaras de bioensayos.

CUADRO XXVIII. Resultados de las lecturas de mortalidad de la cámara de bioensayos de malatión en *Capitella cf. capitata*.

Concentración (mg/L)	Réplica	Número de organismos muertos										
		1h	2h	4h	8h	16h	24h	36h	48h	Total por réplica	Total por concentración	
Control	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18.5	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	5	
	2	0	0	0	0	0	0	0	3	3		
	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
23.72	1	0	0	0	0	0	1	1	1	3	10	
	2	0	0	0	0	0	0	1	2	3		
	3	0	0	0	0	0	1	1	2	4		
30.42	1	0	0	0	0	0	1	1	3	5	16	
	2	0	0	0	0	0	1	1	3	5		
	3	0	0	0	0	0	1	2	3	6		
39	1	0	0	0	0	0	1	2	6	9	25	
	2	0	0	0	0	0	1	3	4	8		
	3	0	0	0	0	0	1	3	3	8		
50	1	0	0	0	0	2	1	2	4	9	28	
	2	0	0	0	0	1	2	3	4	10		
	3	0	0	0	0	2	1	4	2	9		

CUADRO XXIV. Resultados de las lecturas de mortalidad de la cámara de bioensayos del clorpirifós-etil en *Capitella cf. capitata*.

Concentración (mg/L)	Réplica	Número de organismos muertos										
		1h	2h	4h	8h	16h	24h	36h	48h	Total por réplica	Total por concentración	
Control	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.69	1	0	0	0	0	0	0	1	2	3	10	
	2	0	0	0	0	0	0	1	3	4		
	3	0	0	0	0	0	1	0	2	3		
7.59	1	0	0	0	0	1	1	2	2	6	16	
	2	0	0	0	0	0	1	1	2	4		
	3	0	0	0	0	0	0	3	3	6		
10.12	1	0	0	0	0	1	1	0	3	5	20	
	2	0	0	0	0	1	1	4	2	8		
	3	0	0	0	0	0	1	3	3	7		
13.5	1	0	0	0	0	2	0	3	4	9	24	
	2	0	0	0	0	2	1	1	3	7		
	3	0	0	0	0	2	2	3	1	8		
18	1	0	0	0	0	2	4	1	3	10	27	
	2	0	0	0	0	3	0	2	3	8		
	3	0	0	0	0	3	1	3	2	9		

Anexo 4. Esquematización de las cámaras de bioensayos

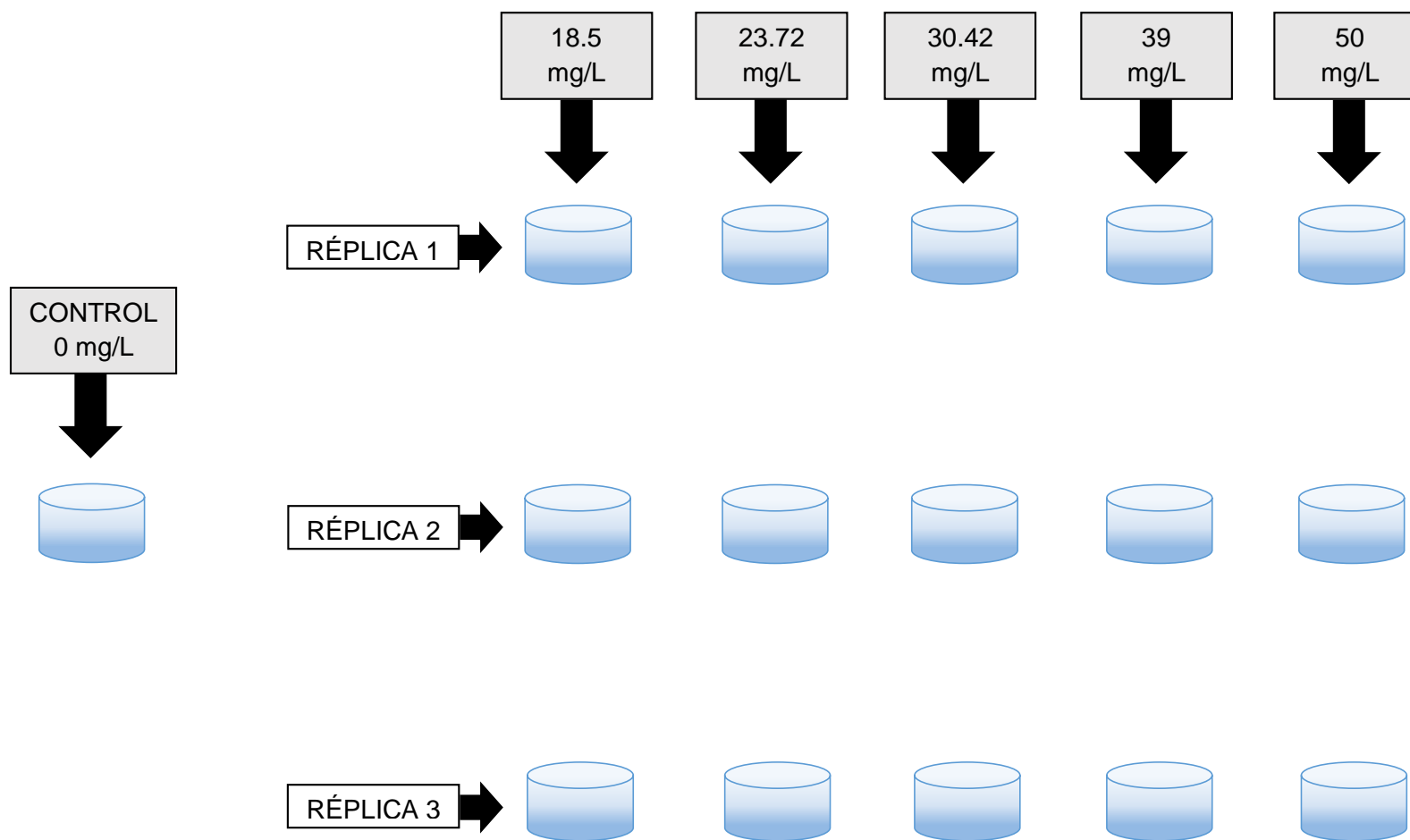


Fig. 21. Esquematización de la cámara de bioensayos de malatión con 10 organismos en cada cristalizador.

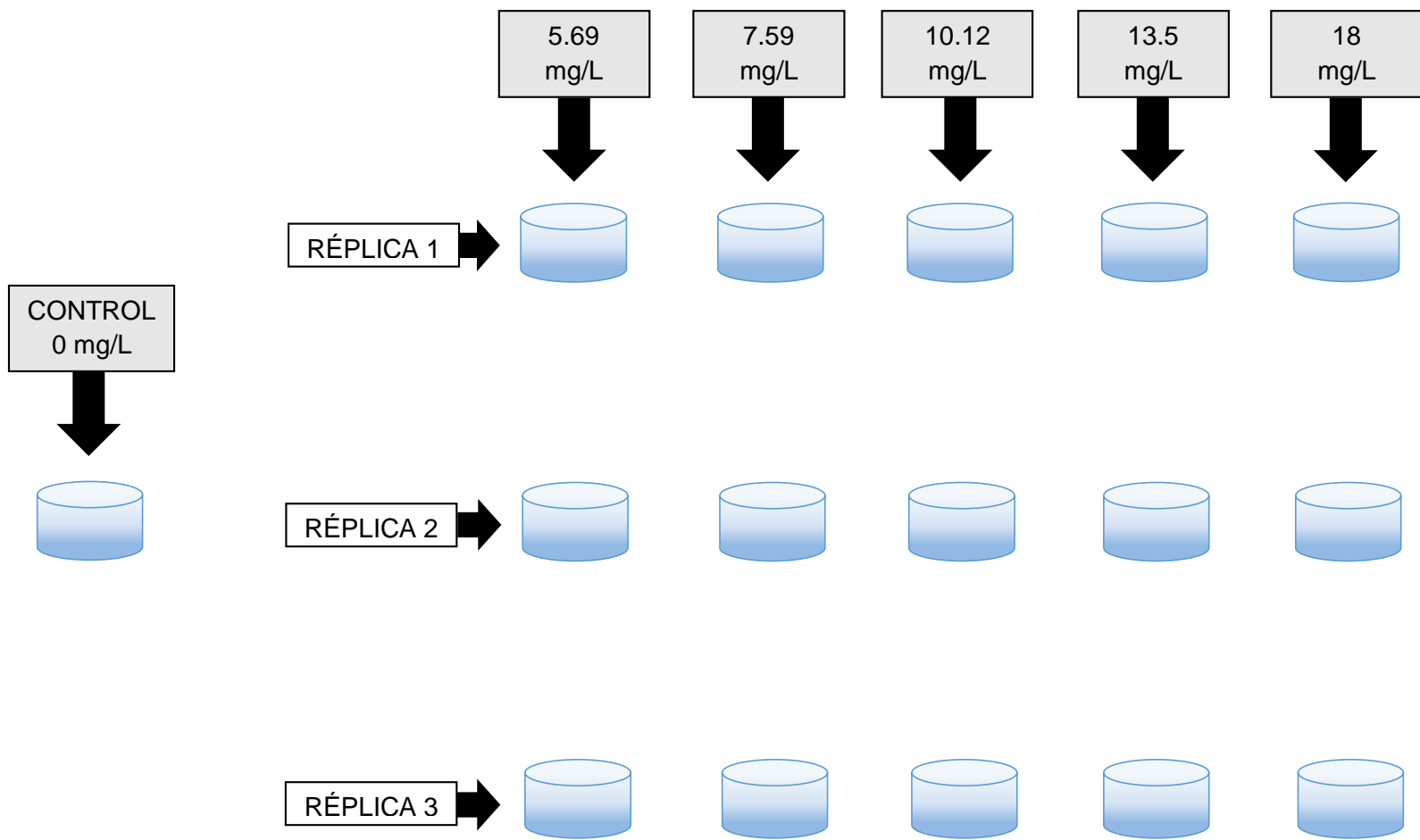


Fig. 22. Esquematización de la cámara de bioensayos de clorpirifós-etil con 10 organismos en cada cristizador.

Anexo 5. Clasificación taxonómica de la especie de prueba



Fig. 23. Organismos de *Capitella* cf. *capitata* empleados en los bioensayos.

Reino: Animal

Phylum: Annelida

Clase: Polychaeta

Orden: Capitellida

Familia: Capitellidae

Género: Capitella