



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE BIOLOGÍA

“EFECTO DE LA RADIACIÓN UV-B EN EL
DESARROLLO EMBRIONARIO DE
Ambystoma mexicanum.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

P R E S E N T A:

BIOL. PATRICIA DE LOURDES FRÍAS ÁLVAREZ

DIRECTOR DE TESIS: DRA. GABRIELA PARRA OLEA

MÉXICO, D. F.

ABRIL, 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias Biológicas por aceptarme y dar la oportunidad de realizar el proyecto, a **CONACYT** por el apoyo económico otorgado con el número de registro 198088 para la realización de esta investigación.

Al apoyo otorgado de:

RANA. Red de Análisis para los anfibios Neotropicales Amenazados (NSF:DEB-0130273)

SEMARNAT-CONACYT 2002-C01-0015.

Miembros del Comité Tutorial

Dra. Gabriela Parra Olea
Dr. Oscar Flores Villela
Dr. Joaquín Cifuentes Blanco

AGRADECIMIENTOS

A MI TUTORA: Dra. Gabriela Parra Olea, por enseñarme que el trabajo arduo y la universidad son los forjadores de mujeres de valor.

A MI COMITÉ TUTORAL: Dr. Oscar Flores Villela y Dr. Joaquín Cifuentes Blanco, por su tiempo, por sus comentarios certeros, por sus observaciones precisas y sus sugerencias para la realización de este trabajo.

A MI JURADO ASIGNADO: Dr. Jaime Zúñiga Vega y M. en C. Luís Canseco Márquez, por su entusiasmo, interés, dedicación, comentarios, sugerencias y observaciones que sirvieron para mejorar el trabajo.

A la Dra. Gabriela Parra Olea asesora de este proyecto de investigación. Gabriela te agradezco el haberme enseñado a poner los pies sobre la tierra, el haberme apoyado, el abrirme camino y enseñarme a darme valor para enfrentar el mundo.

Al equipo de trabajo del Dr. Miguel Lizana. Manu y Marí-Jo, por haberme enseñado el modelo experimental utilizado en este proyecto

Al Dr. Zambrano y su laboratorio de Restauración Ecológica, por haber prestado sus instalaciones. Muy especialmente al Dr. Zambrano, Lupita, Elsa, Vicky, Teo y Daniel.

A CPFilms LLUMAR, y Rodolfo Moreno por la donación del filtro de película UVCL SR, HPR, utilizada en este proyecto.

Al Dr. Jaime Zúñiga-Vega, por su enseñanza y guía en estadística.

Al Dr. Agustín Muhlia Velázquez coordinador del Observatorio de Radiación Solar y al Instituto de Geofísica, UNAM, por su apoyo en la obtención de datos de radiación solar y préstamo de equipo para calcular las propiedades de transmisión de los filtros.

A la M. en C. Lupita Vidal y todos los micólogos de la facultad de ciencias. Gracias por su amistad, entusiasmo y enseñanza.

A todos los integrantes del Instituto de Biología especialmente a Laura Márquez y Gerardo Pérez Ponce de León

A mis compañeros de laboratorio en orden alfabético. Cinthia, Edna, Juan Carlos, Liz, Muñoz, Noemí, Ruth. Gracias por compartir este tiempo de preparación y por enseñarme lo que es el trabajo en equipo.

A mis compañeros del IB y anexos en orden alfabético: Ámbar, Aníbal, Cristy, Jaime, Noemí, Nors, Rafa, Rodo, Verito.

A todos los miembros del equipo del laboratorio del Dr. Gerardo Pérez Ponce de León.
Roger y Ulises

A todos los integrantes del Instituto de Biología que sin ser por ellos no se hubiera podido realizar este estudio.

A todos los herpetólogos del Museo de Zoología de la Facultad de Ciencias.

A la familia Pérez-Parra

Expreso un *agradecimiento muy especial* a las siguientes personas:

A mi familia por todo su apoyo.

A mi Panino, a mi tía Addy, a la Gorda y Sergy, a mi Dany y sus papas, a mi tía Mona, y tío Nacho y todos sus hijos y los hijos de sus hijos.

A mis amigos de la universidad: Alex, Lucia, Caro, Ana.

A mi familia energética.

A mis amigos del POSSENTI, una amistad y unión de toda la vida

A todos aquellos que estuvieron en mi camino en este periodo de tiempo.

DEDICO este trabajo a las personas que son el motor de mi vida, que me han apoyado y han estado en todo momento junto a mí. Que los logros de uno son los logros de todos y que sin ellos no lo hubiera podido hacer.

A MIS PADRES

Dr. Alejandro Frías Guillot y Ma. De Lourdes Álvarez Craules

A MI HERMANO

Ing. Alejandro Frías Álvarez

A MI CUÑADA

Ing. Ma. De los Ángeles López García

.....a todos aquellos Maestros y Ángeles que guían mi camino

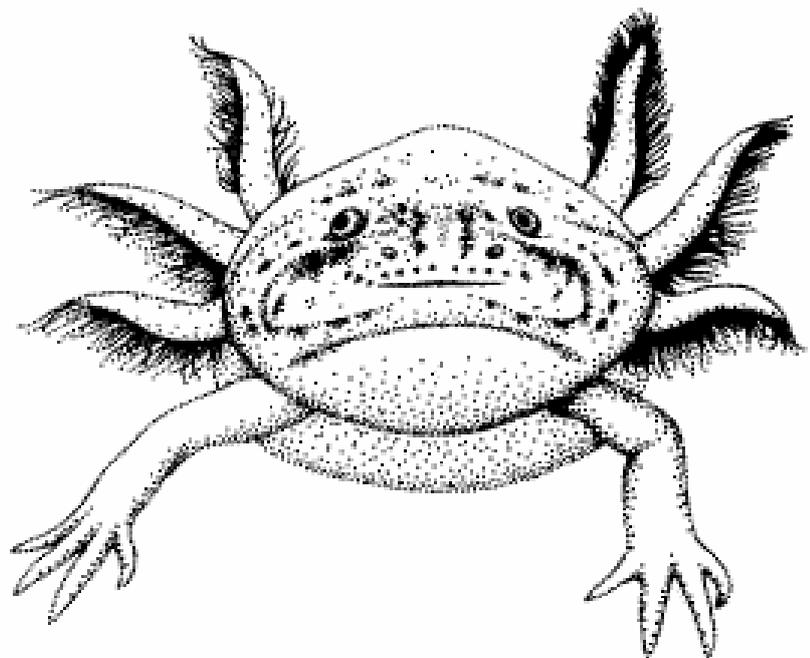
INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
INTRODUCCION	5
<i>Ambystoma mexicanum</i>	10
OBJETIVOS	18
OBJETIVOS GENERAL.....	18
OBJETIVOS PARTICULARES	18
HIPOTESIS	19
MATERIAL Y METODOS	20
<i>Obtención de puestas de Ambystoma mexicanum</i>	20
<i>Diseño experimental</i>	20
<i>Montaje experimental</i>	23
<i>Trabajo experimental</i>	23
<i>Propiedades de transmisión de los filtros</i>	23
<i>Obtención y manejo de los datos de radiación UV-B</i>	24
<i>Pruebas estadísticas aplicadas</i>	25
RESULTADOS	27
<i>Propiedades de transmisión de los filtros y datos obtenidos de radiación UV-B</i>	27
<i>Resultado entre meses</i>	28
<i>Malformaciones</i>	28

<i>Tamaño de los embriones al eclosionar.....</i>	31
<i>Éxito de eclosión.....</i>	34
<i>Datos obtenidos por mes.....</i>	37
<i>Resultados por mes.....</i>	37
<i>ENERO.....</i>	37
<i>FEBRERO.....</i>	38
<i>MARZO</i>	44
<i>ABRIL.....</i>	44
<i>MAYO.....</i>	47
<i>JULIO.....</i>	47
<i>AGOSTO.....</i>	48
<i>SEPTIEMBRE</i>	52
<i>OCTUBRE</i>	52
<i>NOVIEMBRE.....</i>	53
<i>DICIEMBRE</i>	54
<i>Correlación de la radiación UV-B y efectos encontrados</i>	59
<i>Correlación entre los días transcurridos hasta la última eclosión y tamaño de eclosión.....</i>	67
<i>Malformaciones</i>	68
<i>Diferencias entre tipo de malformaciones por tratamiento</i>	72
<i>Malformaciones de tipo II por mes</i>	78
DISCUSION Y CONCLUSIONES	81
<i>Éxito de eclosión</i>	83
<i>Tiempo y tamaño que alcanzan los embriones al eclosionar.....</i>	83
<i>Malformaciones</i>	86

<i>Comparación entre meses</i>	88
<i>Ciudad de México y Republica mexicana</i>	89
<i>Campo y laboratorio</i>	90
<i>Defensas de anfibios contra la radiación UV-B</i>	91
<i>Radiación UV-B y enfermedades infecciosas</i>	92
<i>Ambystoma mexicanum como modelo de estudio</i>	94
<i>Plan de manejo</i>	94
BIBLIOGRAFIA	96
APENDICE I	103
<i>Radiación UV-B</i>	103
APENDICE II	109
<i>Especie</i>	109
<i>Taxonomía</i>	109
<i>Nombre válido</i>	109
<i>Sinonimia</i>	109
<i>Nombre común</i>	110
<i>Morfología</i>	110
<i>Larvas</i>	110
<i>Anatomía del cráneo</i>	110
<i>Cuerpo</i>	110
<i>Coloración</i>	112
<i>Medidas</i>	112
<i>Adultos</i>	112

<i>Anatomía del cráneo</i>	112
<i>Cuerpo</i>	113
<i>Coloración</i>	113
<i>Medidas</i>	113
<i>Distribución</i>	114
<i>Registros adicionales</i>	115
<i>Estado actual de conservación</i>	115
<i>Hábitat</i>	116
<i>Depredadores</i>	116
<i>Especies crípticas</i>	116
<i>Importancia</i>	117
<i>Filogenia</i>	118
APENDICE III	120
<i>Tamaños de eclosión por tratamiento</i>	120
APENDICE IV	121
<i>Tipo I</i>	121
<i>Múltiples malformaciones corporales</i>	121
<i>Desarrollo incompleto</i>	122
<i>Curvatura de espina y cola</i>	123
<i>Tipo II</i>	124
<i>Ampollas</i>	124
<i>Edemas</i>	125
<i>Varias malformaciones en un individuo</i>	126



Ambystoma mexicanum por Tim Halliday.
Tomado de Froglog 25(2005)

RESUMEN

La pérdida de la biodiversidad está afectando principalmente a los anfibios. Los informes de las disminuciones poblacionales de anfibios a nivel mundial son hechos bien documentados. Algunos factores como deforestación, introducción de especies exóticas y sobreexplotación son algunas de las causas de dicho declive. Las causas llamadas enigmáticas como cambio climático, enfermedades infecciosas y aumento de la radiación UV-B, han sido registradas como las responsables del declive en lugares alejados y sin perturbaciones. Los efectos de la radiación UV-B en anfibios pueden ser letales (mortalidad) o sub-letales (malformaciones, bajo rangos de crecimiento) y pueden presentarse en diferentes estadios de desarrollo (embriones, larvas, juveniles y adultos), siendo probablemente el estadio embrionario el más sensible a la radiación UV-B.

Ambystoma mexicanum coloquialmente conocido como ajolote, es una especie endémica de México localizada en remanentes de Xochimilco, Chalco y Chapultepec. En los últimos cinco años ha mostrado una disminución aproximada del 60% en su hábitat natural. Existe una falta de información referente al efecto de la radiación UV-B en la especie. Como un primer paso en esta línea de investigación, se condujeron experimentos ambientales controlados, para conocer el efecto de la radiación UV-B ambiental de la Ciudad de México, en el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum*.

Durante el 2006 se realizaron 11 experimentos de exposición de radiación UV-B a huevos de *Ambystoma mexicanum* bajo tres tratamientos: (1) filtro, que bloquea la

radiación UV-B, (2) filtro, que permite el paso de la radiación UV-B (control del filtro), (3) sin filtros (exposición directa de la radiación UV-B).

Nuestros resultados obtenidos muestran que la radiación UV-B ambiental de la Ciudad de México afecta negativamente el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum*. Los embriones expuestos al 100% de la radiación UV-B ambiental presentaron: bajo éxito de eclosión, mayor incidencia de malformaciones, menor tamaño y tiempo de eclosión, en comparación con los embriones que fueron protegidos contra la radiación solar en un 99%. La temporada natural de oviposición de la especie es la época más perjudicial para la exposición de los huevos a la radiación UV-B.

En Xochimilco el efecto de la radiación UV-B posiblemente afecte a la especie a lo largo de su ciclo de vida y actúe de forma conjunta con otros factores como patógenos y contaminantes químicos, los cuales podrían estar causando daños letales ó sub-letales en la especie. Se propone un plan de manejo de la especie *in situ* el cual incluya protección contra la radiación UV-B.

ABSTRACT

Amphibians are the most affected group by diversity loss. The reports of amphibian population declines are well documented facts. Land use change, introduction of exotic species, and over-exploitation are some causes for this decline. Other causes like global climate change, emerging infectious diseases and increase in UV-B radiation have been reported to affect amphibian decline in pristine areas causing the so-called Enigmatic declines. The effects of an increase in UV-B radiation in amphibians could be lethal (mortality) or sub-lethal (malformations, lowered rates of growth) and can affect different developmental stages (embryos, tadpoles, juveniles and adults). The embryo stage is probably the most vulnerable to UV-B radiation.

Ambystoma mexicanum, commonly known as Axolotl is an endemic species of México it occurs in Xochimilco, Chalco and Chapultepec. A 60% decline in the population of this species has been reported in Xochimilco in the last five years. There is no information about UV-B effects in the species. To begin this investigation line we made environmental controlled experiments to find out the UV-B effects in the *Ambystoma mexicanum* embryos.

During 2006, we made 11 different UV-B exposed experiments with eggs of *Ambystoma mexicanum* under three different treatments (1) filter that blocks the UV-B radiation, (2) filter that allows UV-B radiation (control filters), (3) without filters (direct expose to UV-B radiation).

Our results indicate that environmental UV-B radiation of Mexico City affects adversely the embryos of *Ambystoma mexicanum*. The embryos exposed at 100% of

UV-B radiation had lower hatching success, lower time to hatch, reduced hatching size and higher number of malformations, than those UV-B shields in 99%. The natural breed season of the Axolotl is the most harmful moment to expose the eggs to radiation UV-B.

In Xochimilco the UV-B effects may affect the species during its life cycle and they could act together with others factors like disease and chemical contaminants, which could cause lethal or sub-lethal damages in the species. We proposed an *Ambystoma mexicanum* management plan in situ that include protection from UV-B radiation.

INTRODUCCION

La disminución dramática de las poblaciones de anfibios es un fenómeno que está ocurriendo desde 1960 (Houlahan, et al. 2000). Los informes y evidencias anecdóticas del declive mundial de anfibios que fueron presentados en los noventas (Wake, 1991) son hoy en día hechos bien documentados en todo el mundo (Laurance, et al. 1996; Houlahan, et al. 2000; Stuart, et al. 2004; Lips, et al. 2005; Lips, et al. 2005b). El análisis del estatus y la tendencia mundial de las poblaciones de anfibios señalan que de las 5743 especies de anfibios que han sido descritas hasta el momento, 122 (2.1%) están probablemente extintas, 32.5% se encuentran amenazadas y 43% experimentan alguna forma de disminución (Stuart, et al. 2004). Collins y Storfer, (2003) agrupan las posibles causas del declive de anfibios en seis categorías: (1) introducción de especies exóticas, (2) sobreexplotación, (3) cambio en el uso del suelo y deforestación, (4) contaminantes, (5) enfermedades emergentes infecciosas, y (6) cambios globales. Dentro de la última, se encuentra el cambio climático global y el incremento de la radiación ultravioleta B (UV-B). En la superficie terrestre la radiación UV-B (280-315 nm) ha sido propuesta como la causante de diversos efectos sub-letales y de la mortalidad de un gran número anfibios (Blaustein, et al. 2001).

La radiación UV-B es extremadamente importante en términos biológicos, ya que los organismos vivos absorben la radiación UV-B (remueven los fotones) eficientemente (Blaustein, et al. 2003), mientras que las longitudes de onda más grandes (UV-A; 315-400 nm) no son absorbidas eficientemente por biomoléculas críticas (Blaustein, et al. 2003) y longitudes de onda más cortas (UV-C; 100-280 nm) son filtradas completamente por el oxígeno atmosférico y por el ozono (Madronich y Flocke, 1997),

por lo que estas ondas no afectan los procesos biológicos en la superficie de la tierra (Simon, 1997).

Muchas moléculas orgánicas en tejidos vivientes absorben eficientemente la región UV-B, (Madronich y Flocke, 1997) lo que frecuentemente da como resultado mutaciones y muerte celular (Blaustein, et al. 2003). Por ejemplo la irradiancia (densidad de flujo de energía de radiación) de UV-B a moléculas de DNA induce la formación de dímeros de pirimidina y (6-4) foto-productos, incrementando la probabilidad de una replicación génica defectuosa (Madronich y Flocke, 1997).

Al nivel del suelo y en un lugar específico, la intensidad de la radiación UV-B está dada por: 1) movimiento solar diurno (dependiente de la rotación de la Tierra sobre su eje), 2) variaciones estacionales de la elevación solar (dependiente del movimiento de la tierra alrededor del sol), 3) la cobertura de nubes y humedad atmosférica, 4) bruma o neblina y contaminación de la tropósfera , 5) grosor de la columna total de ozono (que es dependiente de la concentración de ozono) y la capa estratosférica de ozono (Acosta y Evans, 2000). Además, la atenuación de radiación UV-B en sistemas acuáticos, está determinada por diferentes factores físicos como: la superficie del albedo, turbidez y acidez del agua (Xenopoulos y Schindler, 2001). Información más detallada de la radiación UV-B se anota en el Apéndice I.

En su hábitat natural los anfibios, las puestas de huevos de anfibios reciben una dosis de radiación UV-B que esta determinada por los atributos biológicos de las especies como: lugar, profundidad y tiempo estacional de la oviposición, concentración de melanina en los huevos, capacidad de los embriones de reparar el DNA y las características de la cubierta gelatinosa para la transmisión de luz (Blaustein, et al. 1994, Perrotti y Diéguez

2006; Starnes, et al. 2000; Licht, 2003). Los efectos de la radiación UV-B en anfibios pueden ser letales o sub-letales (Blaustein, et al. 2001), pueden presentarse en embriones, larvas, juveniles y adultos (Blaustein, et al. 2001), siendo probablemente el estadio embrionario el más sensible a la radiación UV-B (Langhelle, et al. 1999).

Se considera que en anfibios, la mortalidad es el efecto más extremo de la radiación UV-B (Blaustein, et al. 2001) tal como se ha demostrado en Estados Unidos de Norteamérica con los embriones de *Ambystoma macrodactylum*, donde solo el 14.5 % de los embriones sobrevivieron cuando fueron expuestos a un 90% de radiación UV-B ambiental, a diferencia del 95% de los embriones que sobrevivieron cuando fueron protegidos en un 94% de la radiación UV-B ambiental (Blaustein, et al. 1997). Asimismo en Finlandia el 35.5% de embriones de *Rana arvalis* sobrevivieron cuando fueron expuestos al 100% de radiación UV-B ambiental a comparación del 48.3% de los embriones que sobrevivieron al estar protegidos en un 100% de la radiación UV-B ambiental (Häkkinen, et al. 2001).

Los experimentos realizados en España mostraron que solo el 16 % de los embriones de *Bufo bufo* sobrevivieron cuando fueron expuestos a un 100 % de radiación UV-B ambiental, a comparación del 49% de los embriones que sobrevivieron cuando fueron bloqueados en 80-85% de radiación UV-B y del 78% de los embriones que sobrevivieron cuando fueron cubiertos en un 100% de la radiación UV-B (Lizana y Pedraza, 1998). Otros ejemplos de especies de anfibios que presentaron un aumento en la mortalidad de sus embriones al ser expuestos a la radiación UV-B son: *Ambystoma gracile*, *Hyla cadaverina* y *Taricha torosa* (Estados Unidos de Norteamérica), *Litoria*

verreauxii alpina y *Crineria signifera* (Australia; Blaustein, et al. 1995; Anzalone, et al. 1998; Broomhall, et al. 2000; tabla 1).

Los efectos sub-letales en anfibios ocasionados por la radiación UV-B (Blaustein, et al. 2001) son igualmente importantes ya que éstos pueden alterar el crecimiento, desarrollo y conducta. Por ejemplo un experimento en Estados Unidos de Norteamérica (EUA) con *Ambystoma macrodactylum* mostró que el 91.9% de los embriones expuestos a un 90% de radiación UV-B ambiental, presentaron anomalías en su desarrollo a comparación del 0.05% de anomalías encontradas en los embriones expuestos a menos del 6% de radiación UV-B ambiental (Blaustein, et al. 1997).

Igualmente en EUA *Hyla chrysoscelis* presentó el 8.2% de embriones malformados cuando fueron expuestos al 100% de radiación solar a comparación del 2.9% de embriones malformados encontrados al ser cubiertos en un 98% de la radiación solar. Mientras que el 0.1% de los embriones de *Pseudacris triseriata* presentaron algún tipo de malformación cuando fueron cubiertos en un 98% de la radiación solar a comparación del 8.3% de los embriones malformados que fueron expuestos al 100% de radiación solar (Starnes, et al. 2000). En Argentina se observó un incremento en el número de embriones malformados de *Pleuroderma bufoninum* cuando fueron expuestos a radiación UV-B (Perotti y Diéguez, 2006; Las malformaciones observadas en cada experimento se especifican en la tabla 1).

Cuando los embriones de *Rana blair* fueron expuestos a niveles altos de radiación no se observó ningún efecto, sino hasta el estadio de larva fue donde se presentó un menor crecimiento y desarrollo, sugiriendo que a pesar de que no se observan niveles letales

en estadios particulares se pueden manifestar niveles sub-letales en otros estadios, posiblemente afectando el éxito de los individuos a largo plazo y de las poblaciones expuestas (Smith, et al. 2000). Las larvas de *Rana pipiens*, expuestas continuamente a un 50-60 % de radiación UV-B ambiental en los estadios previos al desarrollo de los miembros posteriores presentaron una elevada incidencia de malformaciones en los miembros posteriores, las cuales consistían en ectromelia (carencia total o parcial de los miembros) y ectrodactilia (carencia de dígitos en los miembros incluyendo metatarsales y falanges; Ankley, et al. 2000).

En anfibios los efectos de la radiación UV-B pueden variar entre especies, y entre poblaciones (Tabla 1). En Oregon (EUA) los embriones de una población de *Bufo boreas* expuestos a >80% y 100% de radiación UV-B ambiental presentaron un aumento en la mortalidad (Blaustein, et al. 1994) a diferencia de los resultados encontrados en Colorado, donde los embriones de *Bufo boreas* expuestos a radiación ambiental de 0-100% no mostraron diferencias significativas en el éxito de eclosión (Corn, 1998; tabla 1). Las razones de las diferencias en los efectos de la radiación UV-B, están relacionadas a factores físico-químicos como: las condiciones del agua, geográficas, y climáticas, y por dos estrategias biológicas: la prevención al daño de la radiación UV-B (comportamiento, mecanismos fisiológicos y morfológicos) y la reparación del daño ocurrido por la radiación UV-B (aumento en la actividad de la enzima fotoliasa; Blaustein, et al. 1998; Blaustein y Kiesecker, 2002; Blaustein, et al. 2001; Blaustein, et al. 2003).

Como se ha mencionado, Argentina, Australia, España y EUA son algunos de los sitios donde se ha observado que los niveles ambientales de la radiación UV-B han producido daños a ciertas especies de anfibios (Blaustein, et al. 2001; Perotti y Diéguez, 2006;

Lizana y Pedraza, 1998; Broomhall, et al. 2000). Con lo que respecta a México, existe una carencia de información concerniente al tema.

México posee 361 especies de anfibios (Flores-Villela y Canseco-Marquez, 2004), y es considerado el quinto país con mayor diversidad de anfibios a nivel mundial (IUCN, 2006). Sin embargo se ha documentado una drástica disminución y aparentes extirpaciones en las poblaciones de anfibios mexicanos (Parra-Olea, et al. 1999; Lips, et al. 2004). Entre las posibles causas del fenómeno en México se encuentran: la pérdida del hábitat, deforestación (Parra-Olea, et al. 1999) y enfermedades infecciosas emergentes (Lips, et al. 2004, Frías-Álvarez, en prensa). Sin embargo, los efectos de la radiación UV-B en anfibios mexicanos es desconocida.

Ambystoma mexicanum

La familia Ambystomatidae se distribuye en Norteamérica desde el extremo sureste de Alaska hasta los bordes del sureste de la faja volcánica transmexicana (Duellman y Trueb, 1994). Las especies de la familia Ambystomatidae han contribuido en gran medida al número total de especies de anfibios con una rápida declinación, y han disminuido significativamente más rápido, que el promedio de todos los anfibios de las familias Hylidae y Ranidae (Stuart et al. 2004). De las 31 especies registradas del género *Ambystoma* (Frost, 2007), 17 se distribuyen en México (IUCN, 2006; Frost, 2007), de las cuales 16 son endémicas (Flores-Villela y Gerez, 1994). *Ambystoma mexicanum* es una de las 11 especies de este género que tienen un endemismo de distribución limitado y una de las pocas especie del género que se encuentra en el valle de México (Smith y Smith, 1971; Flores-Villela y Gerez, 1994).

En el género *Ambystoma* algunas especies presentan neotenia (fenómeno de alcanzar la madurez reproductiva mientras se retiene la morfología externa de larva; Duellman y Trueb, 1994), otras se caracterizan por transformarse y también se encuentran las que responden de forma variable a la metamorfosis (Armstrong y Malacinski, 1989). En la naturaleza *Ambystoma mexicanum* es considerada como neoténica obligada, pero bajo condiciones de laboratorio puede realizar la metamorfosis (Armstrong y Malacinski, 1989; Duellman y Trueb, 1994).

Ambystoma mexicanum es un anfibio muy importante en la cultura mexicana, perteneciente a la mitología náhuatl donde era un Dios (Ortega-Cambrais, 2000), en términos científicos es el animal más famoso de México y es una especie primordial en estudios y experimentos de laboratorio (Smith y Smith, 1971). Actualmente ésta especie endémica de México, se localiza restringida a pequeños canales y remanentes del lago de Xochimilco, Chalco y Chapultepec (Smith, 1989; Parra-Olea, datos sin publicar). Las larvas alcanzan una longitud de hocico cloaca de 128.5mm mientras que la longitud hocico cloaca en transformados es de 87.5 mm (Taylor, 1939). Se encuentra sujeta a protección especial según la NOM-059-ECOL-2001, y cuenta con una densidad promedio de 0.001 especie/m² (UNEP -WCMC, 2007). Las causas hasta el momento registradas sobre la mortalidad del ajolote se deben a múltiples factores tales como: la pérdida del hábitat, introducción de depredadores, contaminantes, recolecta ilegal para comida y medicina (Griffiths y Bride, 2005), urbanización, sobre explotación, drenaje y fragmentación del hábitat (amphibia web, 2007). Información más detallada sobre la especie puede observarse en el Apéndice II.

A pesar del estado precario en la naturaleza, *Ambystoma mexicanum* es uno de los anfibios más comunes en laboratorios y acuarios a través del mundo (Griffiths y Bride,

2005). México no es la excepción ya que diversos centros de investigación cuentan con colonias (Zambrano, comentario personal) de individuos nacidos en cautiverio y/o silvestres. Algunos individuos de estas colonias presentan malformaciones en sus extremidades tales como: polifalanga (presencia de múltiples falanges), ectrodactilia (carencia de dígitos en los miembros, incluyendo metatarsales y falanges) y polymelia (presencia de múltiples segmentos de miembros; Observación personal).

Pese a que los diferentes estudios realizados sobre las posibles causas de la pérdida del ajolote mexicano, existe una falta de información referente al efecto de la radiación UV-B como causa de mortalidad y de malformaciones en la especie, por lo que como un primer paso en esta línea de investigación en México y en la especie, se condujeron experimentos ambientales controlados, para conocer el efecto de la radiación UV-B ambiental de la Ciudad de México, en el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum*.

Tabla 1. Ejemplos de estudios realizados sobre el efecto de la radiación UV-B en anfibios en diferentes estadios de desarrollo y lugares del mundo.

Especies	Estadio de desarrollo	Efecto de UV	Lugar	Referencia
Caudatos				
<i>Ambystoma gracile</i>	Embriones	Aumento en la mortalidad.	Costa Sierra de Oregon. EUA.	Blaustein, et al. 1995.
<i>Ambystoma macrodactylum</i>	Embriones	Aumento en la mortalidad, malformaciones como: corneas densamente pigmentadas, edemas, curvatura en cola.	Cascadas de Oregon. EUA.	Blaustein, et al. 1997.
	Larvas	Bajos rangos de crecimiento.	Oregon. EUA.	Belden, et al. 2000.
		Mortalidad, bajos rangos de crecimiento.	Oregon y Washington.	Belden y Blaustein,

			EUA.	2002.
<i>Ambystoma maculatum</i>	Embriones	No produjo daños.	Montañas de los Apalaches del sur. EUA.	Starnes, et al. 2000.

Tabla 1. Continuación.

Anuros				
<i>Bufo boreas</i>	Embriones	No produjo daños.	Parque Nacional Rocky Mountain, Colorado. EUA.	Corn, 1998.
	Embriones	Aumento en la mortalidad o bajo éxito en la eclosión.	Cascadas de Oregon. EUA.	Blaustein, et al. 1994.
<i>Bufo bufo</i>	Embriones	Aumento en la mortalidad.	Prado de las Pozas, Sierra de Gredos, España.	Lizana y Pedraza, 1998.
	Embriones	No produjo daños.	Jardín Botánico de la Universidad de	Häkkinen, et al. 2001.

	nes				Joensuu, Joensuu Finlandia.	
	Larvas	Aumento en la mortalidad.	en	la	Jardín Botánico de la Universidad de Joensuu, Joensuu Finlandia.	Häkkinen, et al. 2001.

Tabla 1. Continuación.

<i>Bufo calamita</i>	Embriones	No produjo daños.			Prado de las Pozas, Sierra de Gredos, España.	Lizana y Pedraza, 1998.
<i>Crinia signifera</i>	Embriones	Aumento en la mortalidad	en	la	Montañas Snowy, Australia.	Broomhall, et al. 2000.

<i>Hyla cadaverina</i>	Embriones	Aumento en la mortalidad embrionaria.	Los Ángeles California. EUA.	Anzalone, et al. 1998.
<i>Hyla chrysoscelis</i>	Embriones	No produce mortalidad, causa malformaciones como: edemas, curvaturas en la cola y de espina, ampollas.	Montañas de los Apalaches del sur. EUA.	Starnes, et al. 2000.
<i>Litoria verreauxii alpina</i>	Embriones	Aumento en la mortalidad.	Montañas Snowy. Australia.	Broomhall, et al. 2000.
<i>Pleuroderma bufoninum</i>	Embriones	No presenta efectos negativos en la supervivencia. Causa aumento en las malformaciones como: curvatura de cola, nado errático y especialmente edemas. Aumenta la concentración de melanina	San Carlos de Bariloche, Provincia de Río Negro, Patagonia, Argentina.	Perotti y Diéguez, 2006.

Tabla 1. Continuación.

<i>Pseudacris triseriata</i>	Embriones	Malformaciones como: edemas, curvatura de cola y de espina, ampollas.	Montañas de los Apalaches del sur. EUA.	Starnes, et al. 2000.
------------------------------	-----------	---	---	-----------------------

No produce mortalidad.

<i>Rana arvalis</i>	Embriones	Aumento en la mortalidad.	Jardín Botánico de la Universidad de Joensuu, Joensuu Finlandia.	Häkkinen, et al. 2001.
	Larvas	No produce daños.	Jardín Botánico de la Universidad de Joensuu, Joensuu Finlandia.	Häkkinen, et al. 2001.

<i>Rana blairi</i>	Larvas	Bajos rangos de crecimiento y desarrollo en los individuos expuestos a radiación desde embriones.	Missouri, EUA.	Smith, et al. 2000.
--------------------	--------	---	----------------	---------------------

<i>Rana sylvatica</i>	Embrio	No produce daños.	Montañas de los	Starnes, et al.
-----------------------	--------	-------------------	-----------------	-----------------

OBJETIVOS

Con base a la información preliminar, en el siguiente trabajo se plantearon los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL:

- Observar el efecto de la radiación UV-B ambiental de la ciudad de México en el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum*.

OBJETIVOS PARTICULARES

Se desarrollaron los objetivos particulares en base a los siguientes tratamientos:

- Filtro (Bloqueo de la radiación UV-B en un 99 %),
 - Sol (Radiación UV-B directa en un 100%),
 - Control (Transmisión de radiación UV-B en un 18%).
-
- Observar si existe una diferencia significativa en el número de embriones malformados de *Ambystoma mexicanum* expuestos a los tres tratamientos.
 - Observar si existen distintos tipos de malformaciones en embriones de *Ambystoma mexicanum* expuestos a los tres tratamientos.
 - Cuantificar el número de días que tardan en eclosionar los embriones de *Ambystoma mexicanum* expuestos a los tres tratamientos.

- Observar si existe una diferencia significativa en el número de embriones eclosionados de *Ambystoma mexicanum* expuestos a los tres tratamientos.
- Observar si existe una diferencia significativa en la longitud promedio de eclosión de los embriones de *Ambystoma mexicanum* expuestos a los tres tratamientos.
- Observar si existe una diferencia significativa en los resultados obtenidos del número de embriones malformados, longitud promedio de los embriones al eclosionar y número de embriones eclosionados de *Ambystoma mexicanum* entre los tratamientos y distintos meses en que se llevaron a cabo los experimentos.
- Observar si existe una correlación entre la cantidad de radiación solar UV-B ambiental de la Ciudad de México y los efectos observados en el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum*, bajo los tres tratamientos.

HIPOTESIS

- Los efectos negativos esperados de la radiación UV-B en el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum* serán mayores bajo el tratamiento de sol que en control y estos a su vez serán mayores que en filtro (efectos negativos: sol>control>filtro).

MATERIAL Y METODOS

*Obtención de puestas de *Ambystoma mexicanum**

La obtención de las puestas de huevos de *Ambystoma mexicanum* fueron realizadas en el Laboratorio de Restauración Ecológica del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Para el proceso de la obtención de puestas de huevos de *Ambystoma mexicanum* se utilizó un sistema de cuatro tinajas de fibra de vidrio (141 cm. diámetro, 40 cm. altura) con agua en constante movimiento las 24 hrs. El sistema fue llenado con agua limpia y sin cloro (se colocó la dosis adecuada de anticloro y se dejó reposar 10 minutos antes de que entrara en función el modelo). Posteriormente se puso a andar el sistema y después de 24 a 48 hrs. se introdujeron los organismos. Para cada experimento, diferentes parejas reproductivas (por lo general 4 hembras, 3 machos) fueron colocadas en una tina previamente seleccionada, la cual contenía plantas de plástico y estructuras de unicel con rafia verde que simulan ser plantas acuáticas, esto con el fin de servir de sostén a las puestas de huevos. Durante el proceso de obtención de puestas se evitó alimentar a los individuos. Se mantuvo una temperatura ambiental baja de entre los 14 -17° C.

Diseño experimental

Blaustein et al. (1998) mencionan que un buen diseño experimental para el estudio de los efectos de la radiación UV-B en anfibios, debe contener un número adecuado de replicas (con el fin de capturar el rango de variabilidad presente), tratamientos de control (para medir los efectos de cualquier tipo de manipulación) y que estos puedan ser manejados como una unidad experimental. En el uso del filtro contra la radiación

UV-B es necesario colocar una protección sobre el control para evitar la posibilidad de que sea un efecto de escudo.

En contenedores de plástico (31.5 cm. por 51.5 cm, 17cm de altura) llenados en un 85% con agua limpia y sin cloro (1 gota de anticloro por litro, Feri grupo pro acua) se colocaron marcos rectangulares de unicel con cuatro soportes paralelos colocados a lo ancho del marco, para formar tres rectángulos de la misma dimensión. Cada rectángulo forma una hilera, la cual contiene tres redes (coladores de plástico) para dar un total de 9 redes por contenedor. Cada hilera de redes corresponden a un tratamiento, por cada red fueron colocados 20 huevos (dependiendo del experimento varia el número de huevos colocados por red; tabla 2; fig. 1). En general los estudios sobre los efectos de la radiación UV-B en anfibios, usan los siguientes tratamientos: (1) filtro, que bloquea la radiación UV-B, (2) filtro, que permite el paso de la radiación UV-B (usado como el control del filtro que bloquea la radiación UV-B), (3) sin filtros (Blaustein, et al. 1994, 1998, 2001). En la elaboración de este experimento los tratamientos utilizados fueron los siguientes: (1) filtros de película LLUMAR (filtro de película UVCL SR, HPR, bloquea la radiación UV-B), (2) acetato de celulosa (filtro que permite el paso de la radiación) (3) Para el tratamiento de sol o no filtros, se dejaron los huevos expuestos a la luz directa del sol. Se colocó en cada contenedor un filtro LLUMAR (25 cm x 60 cm) encima de una de las hileras del recipiente (a ≈ 7 cm sobre los embriones), el acetato de celulosa (25 cm x 60 cm) fué colocado sobre la hilera del extremo opuesto a la del filtro, (a ≈ 7 cm sobre los embriones), la hilera del centro no tuvo protección (Fig. 1).



Fig. 1. Ilustración que muestra el diseño experimental realizado para observar el efecto de la Radiación UV-B en el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum*.

Tabla 2. Número de experimentos realizados en este trabajo durante el año 2006, la fecha de inicio y de termino de cada experimento, el número de huevos depositados por red y el número de repeticiones por experimento. *Uno de los cinco recipientes con huevos en estadios más avanzados de desarrollo. ** Uno de los cinco recipientes con 15 huevos por red.

Experimento No.	Fecha de inicio	Fecha de término	No. De huevos por red	No. De repeticiones
1	25 – Enero	10 – Febrero	20	5
2	6 – Febrero	28 – Febrero	20	4
3	3 - Marzo	17 - Marzo	4 (20) 1 (20)*	5
4	31 – Marzo	10 – Abril	20	2
5	21 – Abril	3 – Mayo	20	6
6	10 – Julio	19 - Julio	20	5
7	22 – Agosto	6 -Septiembre	20	5
8	19 -	2 – Octubre	20	5

	Septiembre			
9	20 - Octubre	6 -Noviembre	20	5
10	18- Noviembre	10 - Diciembre	4 (20) 1(15)**	5
11	20 Diciembre	- 9 - Enero- 2007	20	2

Montaje Experimental

Se realizó un experimento por mes, de enero a diciembre del 2006 con excepción del mes de junio (por razones técnicas en la obtención de huevos, no se efectuaron pruebas) dando un total de 11 experimentos. Estos fueron conducidos en la azotea del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Dependiendo de la cantidad de huevos depositados por puesta, fue el número de repeticiones realizadas por experimento. Las fechas, y las repeticiones por experimento se pueden observar en la tabla 2.

Trabajo Experimental

Los experimentos iniciaron el día en que se instaló el diseño experimental, y se finalizaron en el momento en que el último embrión eclosionó (sin importar a qué tratamiento perteneciera). Durante los experimentos se les realizó diariamente la extracción de un litro de agua a todos los contenedores y se les deposito de 2 a 3 litros de agua limpia y sin cloro (1 gota de anticloro por litro, Feri grupo pro acua). Diariamente se efectuó el seguimiento embrionario de cada uno de los huevos, observando: el número de embriones vivos, el número de organismos malformados (presencia de edemas, malformaciones en la cola, anormalidades en el desarrollo), número de organismos eclosionados. Se cuantificó los días que tardaron en eclosionar los

embriones y se determino el tamaño de los embriones al eclosionar (por cada tratamiento se tomaron todas las medida hasta que el último individuo eclosionó).

Propiedades de transmisión de los filtros

Las propiedades de transmisión del filtro LLUMAR (filtro de película UVCL SR, HPR) y el acetato de celulosa fueron calculadas por medio de un contador de ultravioleta portátil Modelo 3D (Solar Light Company, Hand-Held Ultraviolet meter model 3D). Se hicieron las mediciones de la radiación UV-B ambiental el día 12 de febrero del 2007, de la siguiente forma: En el lugar donde se llevaron a cabo los experimentos se colocó el contador de ultravioleta, se realizaron tres mediciones directas de la radiación UV-B con el fin de equilibrar el aparato, posteriormente se hizo una nueva medición directa de la radiación UV-B. El dato obtenido fue utilizado como medida estándar de la cantidad de radiación UV-B ambiental. Para tomar la transmisión total de radiación UV-B bajo el filtro LLUMAR (filtro de película UVCL SR, HPR) se cubrió el medidor de radiación UV-B con la película y se realizaron las mediciones. Se repitió el mismo procedimiento en tres ocasiones, y el resultado obtenido fue la media del porcentaje de transmisión de la radiación UV-B conseguido en cada medición. Este método fue repetido para el acetato de celulosa.

Obtención y manejo de los datos de radiación UV-B

Los datos utilizados en este trabajo fueron obtenidos del Observatorio de Radiación Solar (ORS) del Instituto de Geofísica (IG) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El ORS proporcionó lecturas de la radiación UV-B ambiental de la ciudad de México realizadas cada minuto durante todo el año 2006, en unidades W/m^2 . El instrumento utilizado por la ORS y su constante son: Radiómetro Solar Light, 501A

V3 UV-Biometer #2010, $K=4.288 \text{ V/W/m}^2$. Los datos proporcionados de la radiación UV-B ambiental, se analizaron con estadística básica.

Pruebas estadísticas aplicadas

Los análisis estadísticos se efectuaron en los programas Sigma-Stat 2 y Statistica 7. Se realizó la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov para probar la normalidad de los datos, y se examinó la homocedasticidad de las varianzas. Si los datos cumplieron los requerimientos necesarios para realizar una estadística paramétrica, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) de una vía, con el fin de probar las diferencias significativas entre los tres tratamientos para: el número de embriones malformados, número de embriones eclosionados, y longitud promedio de eclosión. La prueba estadística post-hoc utilizada fue: Tukey. En el caso de que los datos estadísticos no cumplieran los requerimientos de normalidad y homocedasticidad se realizó la prueba estadística de Kruskal-Wallis de una vía con la prueba post-hoc de Dunn (Zar, 1999; Sokal y Rohlf, 1995).

Para observar la diferencia significativa en el tamaño del embrión al eclosionar, en los tratamientos donde ningún embrión sobrevivió, y cuyos datos cumplieron con la normalidad se realizó la prueba estadística t-Sudent. Se realizó la prueba de Mann-Whitney en los datos que no cumplieron con la normalidad. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías, para probar las diferencias significativas entre los tratamientos (factor 1) y los meses de exposición a la radiación UV-B (factor 2) para: el

número de embriones malformados, número de embriones eclosionados, longitud promedio de eclosión y malformaciones encontradas en mayor frecuencia por mes. La prueba post-hoc utilizada fue la de Tukey. Para analizar la relación entre cantidad de radiación UV-B ambiental de la ciudad de México y los efectos encontrados en el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum* y observar una relación entre los días transcurridos hasta la última eclosión y el tamaño de eclosión de los embriones bajo el tratamiento de sol, se realizó una correlación de Pearson, para los datos que cumplieron la normalidad y para aquellos datos que la fallaron, se realizó una correlación de Spearman. Para observar las diferencias significativas en el tipo de malformación presentada en los embriones, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de tres vías, para probar las diferencias significativas entre los tratamientos (factor 1), meses (factor 2) y tipos de malformación (factor 3). La prueba post-hoc utilizada fue la de HSD para muestras desiguales (Zar, 1999; Sokal y Rohlf, 1995).

RESULTADOS

Propiedades de transmisión de los filtros y datos obtenidos de radiación UV-B

Nuestros resultados indican que el filtro LLUMAR (filtro de película UVCL SR, HPR) bloquea el 98.666 % de la radiación UV-B, concordando con las especificaciones del fabricante, mientras que el acetato de celulosa utilizado como control para este trabajo, bloquea el 82% de la radiación UV-B. La media de los datos de la radiación UV-B dada en W/m^2 , utilizada para cada mes o experimento se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3. Promedio de la cantidad diaria de radiación UV-B para cada experimento. Unidades (W/m^2).

Experimento No.	Mes	Promedio de la cantidad de radiación UV-B (W/m^2)
1	Enero	0.036
2	Febrero	0.043
3	Marzo	0.053
4	Abril	0.057
5	Mayo	0.048
6	Julio	0.048
7	Agosto	0.043
8	Septiembre	0.038
9	Octubre	0.038
10	Noviembre	0.028
11	Diciembre	0.0330

Resultado entre meses

Malformaciones

Al analizar el porcentaje de las malformaciones mediante un ANOVA de dos vías (factor I = tratamientos, factor II = meses) se encontraron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos (control, sol y filtro. Tratamiento: $F_{2, 126} = 164.398$, $P < 0.001$). Todos los tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre sí. El tratamiento donde hubo mayor número de malformaciones fue sol, seguido por control y por último filtro (Medias ajustadas: control = 0.0941, sol = 0.234, filtro = 0.0185; Prueba post-hoc, Student-Newman-Keuls: control vs. sol: $P < 0.001$; control vs. filtro: $P < 0.001$; filtro vs. control: $P < 0.001$). A partir de este mismo ANOVA de dos vías también se encontraron diferencias significativas entre los meses. Los meses de febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre fueron los que presentaron mayor porcentaje de malformaciones en comparación con los meses restantes ($F_{10, 126} = 42.608$, $P < 0.001$; fig. 2). También se detectó un efecto significativo de la interacción entre tratamientos y meses ($F_{20, 126} = 17.191$, $P < 0.001$; tabla 4). En marzo, noviembre y diciembre bajo el tratamiento de sol generaron porcentajes significativamente mayores de malformaciones en comparación con los demás meses en todos los tratamientos (Fig. 3). Asimismo, febrero, marzo y abril en el tratamiento de filtro generaron porcentajes de malformaciones significativamente menores que aquellos en estos mismos meses pero en los otros dos tratamientos (control y sol; fig. 3).

Tabla 4. Resultados estadísticos totales de la variación de porcentaje de malformaciones para los dos factores (I) Tratamiento, (II) Mes y la interacción entre cada uno. Grados de libertad (GL), Suma de cuadrados (SC), Cuadrado medio (CM).

Fuente de variación	de	GL	SC	CM	F	P
Tratamiento		2	1.218	0.609	164.398	<0.001
Mes		10	1.578	0.158	42.608	<0.001
Trat. x Mes		20	1.273	0.064	17.191	<0.001
Residual		126	0.467	0.004		
Total		158	4.344	0.027		

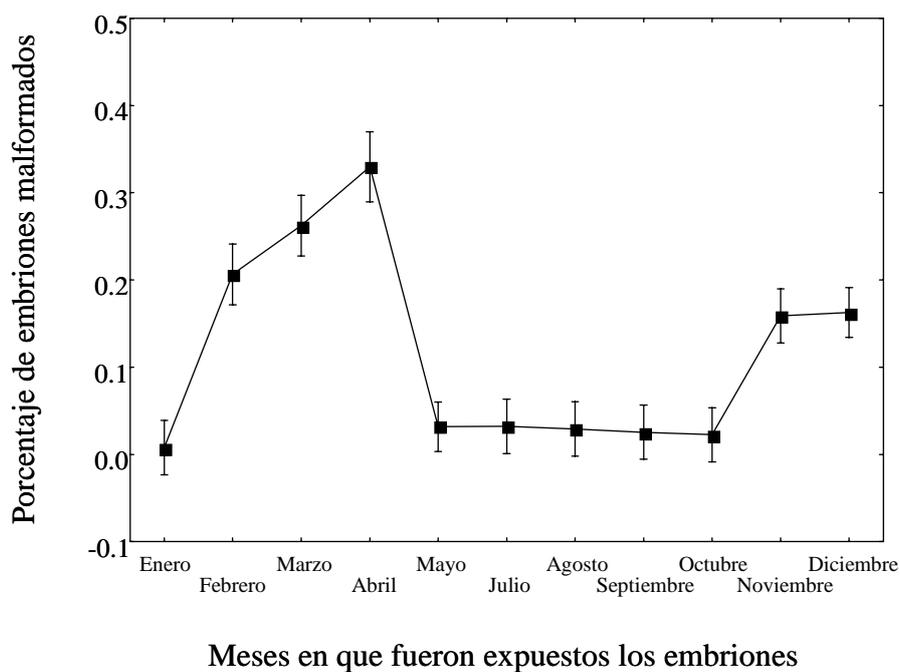


Fig. 2. Media de las proporciones de embriones malformados durante todos los meses en que se llevaron a cabo los experimentos.

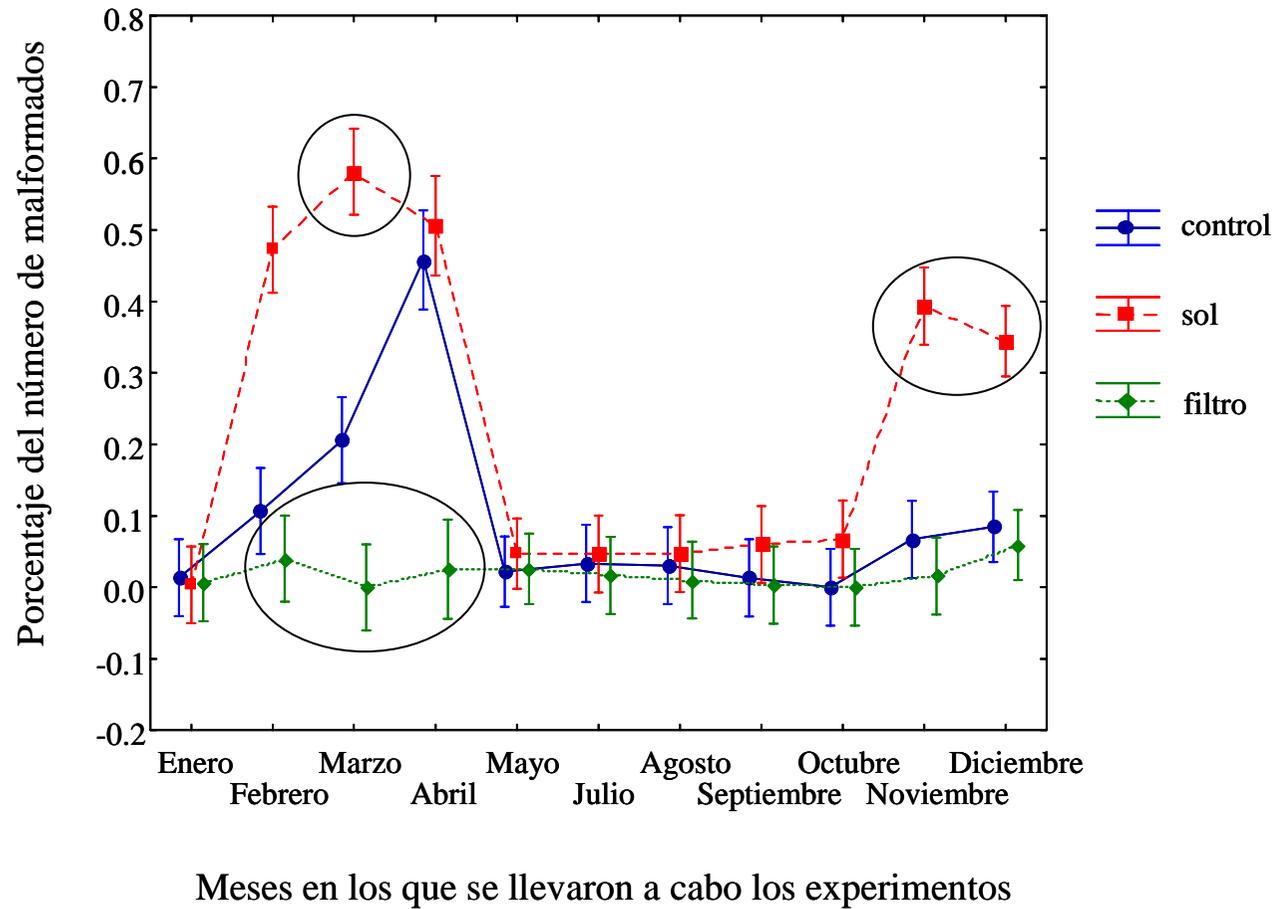


Fig. 3. Porcentaje del número de embriones que presentaron algún tipo de malformación por tratamiento control, sol, filtro. En círculos se destacan las combinaciones entre mes y tratamiento cuyas medias son estadísticamente distintas y de interés particular (ver texto).

Tamaño de los embriones al eclosionar

Al analizar las medidas obtenidas del tamaño de los embriones al eclosionar mediante una ANOVA de dos vías (factor I = tratamientos, factor II = meses) se encontraron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos (control, sol y filtro. Tratamiento: $F_{2, 5058} = 2481.534$, $P < 0.001$). Todos los tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre si. El tratamiento donde se presentó el tamaño de eclosión mayor fue filtro seguido por control y por último sol (Medias ajustadas: control = 11.317, Sol = 7.069, filtro = 12.953; Prueba post-hoc Tukey: control vs. sol: $P < 0.001$; control vs. filtro: $P < 0.001$; filtro vs. control: $P < 0.001$; observar el Apéndice III). A partir de este mismo ANOVA de dos vías también se encontraron diferencias significativas entre los meses. Los meses de febrero, marzo, abril y octubre presentaron los embriones con menor tamaño de eclosión ($F_{10, 5058} = 354.840$, $P < 0.001$; fig. 4). También se detectó un efecto significativo en la interacción entre tratamientos y meses ($F_{20, 126} = 52.127$, $P < 0.001$; tabla 5). Bajo el tratamiento de sol los meses de febrero, marzo y abril los embriones no lograron sobrevivir. El mes de mayo los embriones sometidos al tratamiento de sol, tuvieron tamaños significativamente más pequeños a comparación con los embriones de los otros dos tratamientos (control y filtro). En el mes de noviembre bajo el tratamiento de filtro se observó el tamaño más grande de los embriones al eclosionar en comparación con los otros tratamientos (control y sol; fig. 5).

Tabla 5. Resultados estadísticos totales de la variación del tamaño de los embriones al eclosionar para los factores (I) Tratamiento, (II) Mes y la interacción entre cada uno. Grados de libertad (GL), Suma de cuadrados (SC), Cuadrado medio (CM).

Fuente de Variación	GL	SC	CM	F	P
Tratamiento	2	2958.189	1479.09	2481.534	<0.001
Mes	10	2114.991	211.50	354.840	<0.001
Trat x Mes	20	621.391	31.070	52.127	<0.001
Residual	5058	3014.772	0.596		
Total	5090	13541.682	2.660		

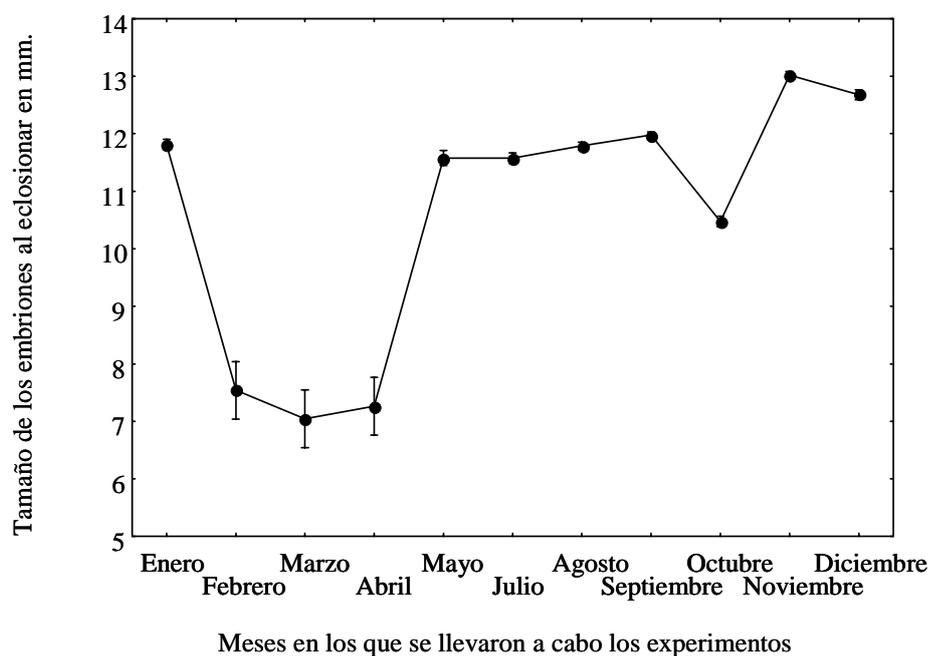


Fig. 4. Media del tamaño de los embriones al eclosionar durante todos los meses en que se realizaron los experimentos

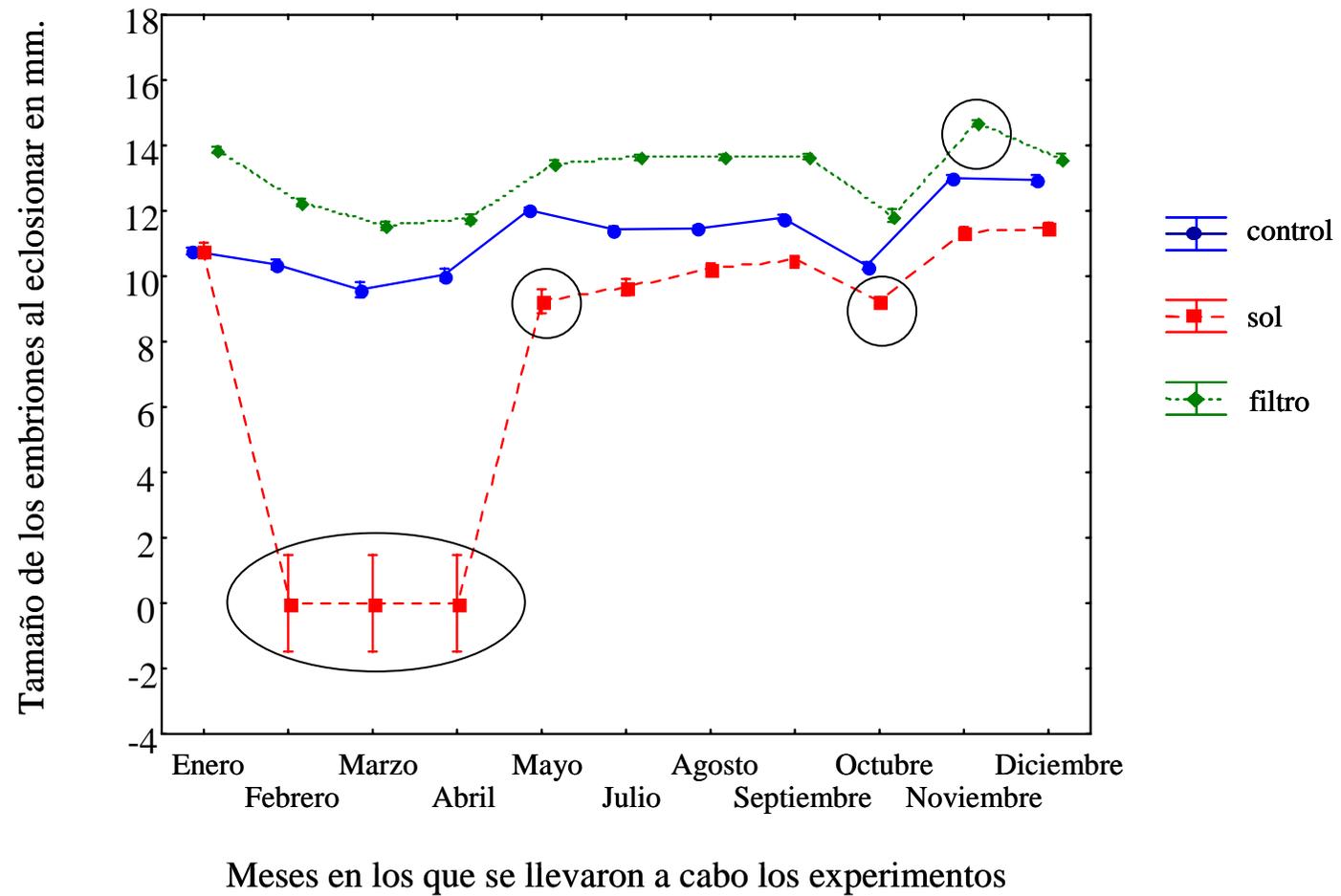


Fig. 5. Tamaño de los embriones al eclosionar por tratamiento. En círculos se destacan las combinaciones entre mes y tratamiento cuyas medias son estadísticamente distintas y de interés particular (ver texto).

Éxito de eclosión

Al analizar el promedio de las proporciones del éxito de eclosión mediante un ANOVA de dos vías (factor I = tratamientos, factor II = meses) se encontraron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos (control, sol, filtro. Tratamiento: $F_{2, 126} = 861.920$, $P < 0.001$). Todos los tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre sí. El tratamiento que presentó el mayor éxito de eclosión fue filtro, seguido por control y por último sol (Medias ajustadas: control = 0.768, sol = 0.294, filtro = 0.979: Prueba post-hoc Tukey: control vs. sol: $P < 0.001$; control vs. filtro: $P < 0.001$; filtro vs. control: $P < 0.001$). A partir de este mismo ANOVA de dos vías también se encontraron diferencias significativas entre los meses. Los meses de febrero, marzo y abril fueron los que presentaron menor porcentaje en el éxito de eclosión en comparación con los meses restantes ($F_{10, 126} = 47.131$, $P < 0.001$; fig. 6). También se encontró un efecto significativo entre tratamientos y meses ($F_{20, 126} = 19.270$, $P < 0.001$; tabla 6). El periodo comprendido entre febrero y agosto bajo el tratamiento de sol generaron los porcentajes significativamente menores en el éxito de eclosión en comparación con los demás meses bajo el tratamiento de filtro. Se destaca que los meses de febrero, marzo y abril bajo el tratamiento de sol no lograron eclosionar. Todos los meses bajo el tratamiento de filtro tuvieron un alto éxito de eclosión (fig. 7).

Tabla 6. Resultados estadísticos totales de la variación del promedio de las proporciones del éxito de eclosión para los factores (I) Tratamiento, (II) Mes y la interacción entre cada uno. Grados de libertad (GL), Suma de cuadrados (SC), Cuadrado medio (CM).

Fuente de Variación	GL	SC	CM	F	P
Tratamiento	2	12.585	6.293	861.920	<0.001
Mes	10	3.441	0.344	47.131	<0.001
Trat. x Mes	20	2.814	0.141	19.270	<0.001
Residual	126	0.920	0.007		
Total	158	19.594	0.124		

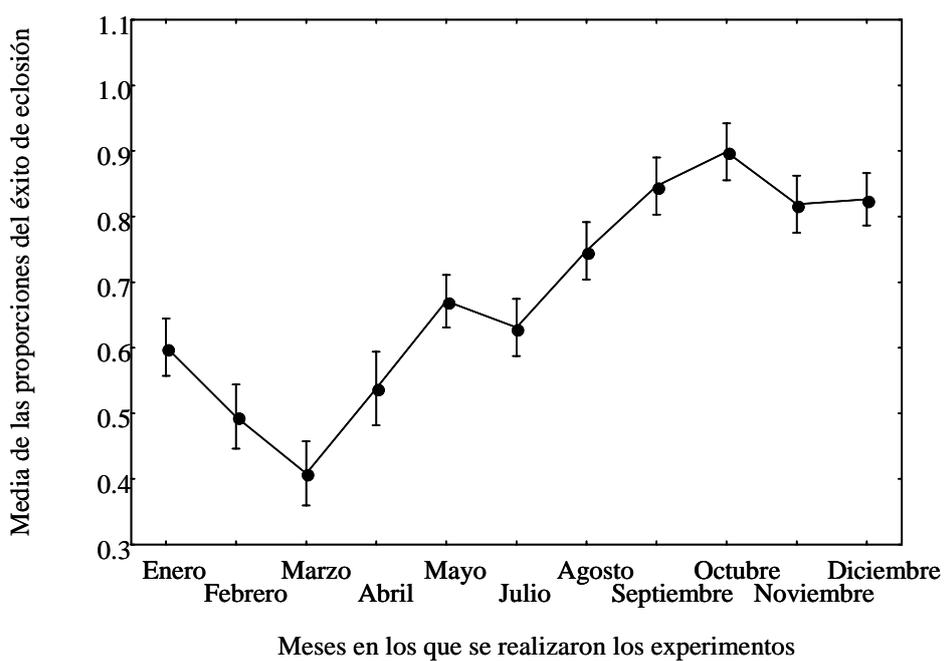


Fig. 6. Media de las proporciones del éxito de eclosión de los embriones durante cada mes en que se llevaron a cabo los experimentos

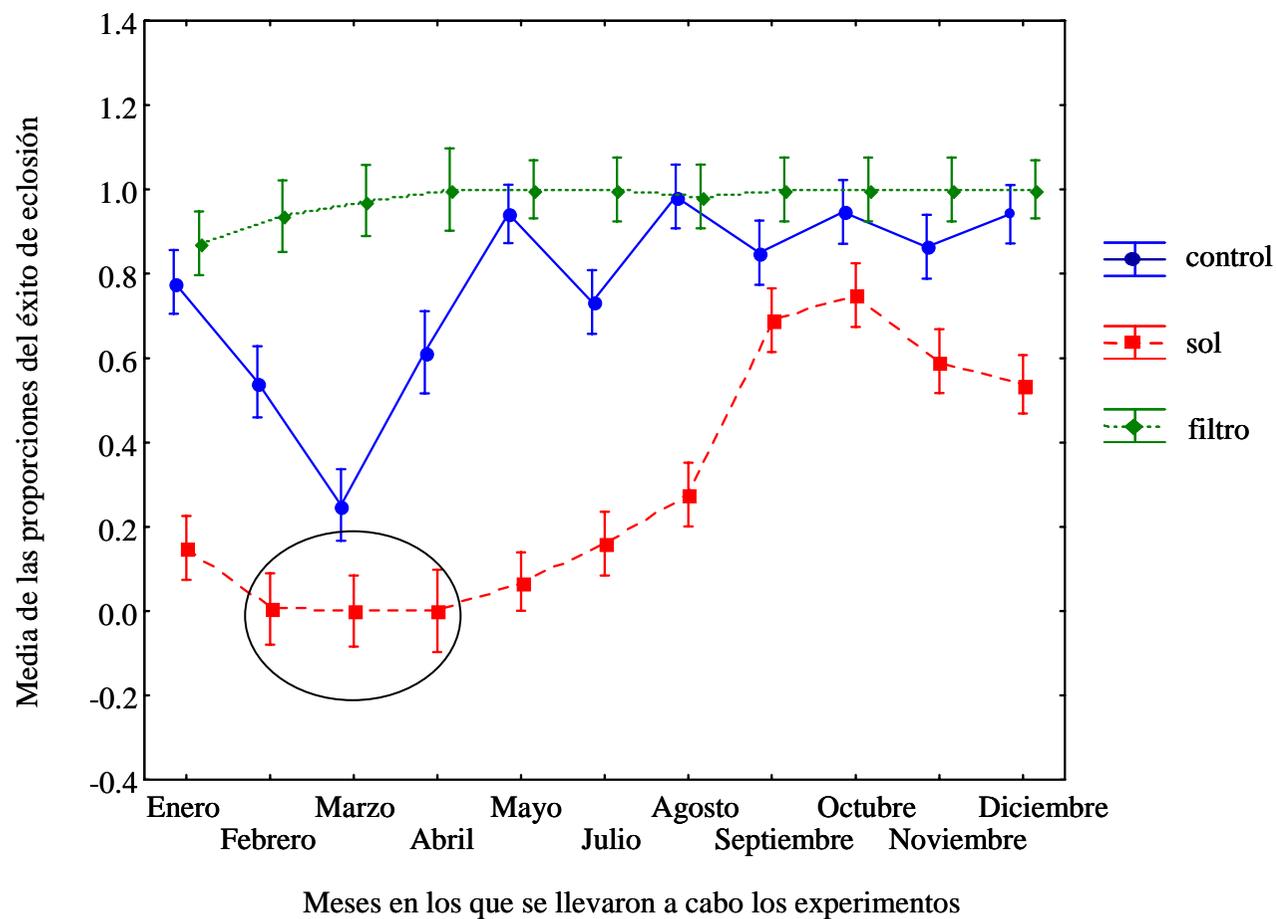


Fig. 7. Media de las proporciones del éxito de eclosión de los embriones para cada tratamiento control, sol, filtro. En círculos se destacan las combinaciones entre mes y tratamiento cuyas medias son estadísticamente distintas y de interés particular (ver texto).

Datos obtenidos por mes

En la tabla 7 se pueden observar: el número total de huevos colocados, huevos viables, embriones eclosionados, tamaño del embrión al eclosionar, embriones malformados y días transcurridos hasta la última eclosión, por cada experimento, además el porcentaje del número total de huevos viables del éxito de eclosión y embriones malformados.

Los resultados obtenidos de las diferencias significativas observadas entre los tratamientos de filtro, sol y control por cada mes (experimento realizado) para el número de embriones malformados, éxito de eclosión y tamaño del embrión al eclosionar se desarrollan y explican en *Resultados por mes*. La síntesis de los resultados observados para los tratamientos de filtro, sol y control por cada mes se presenta en la tabla 8.

Resultados por mes

ENERO

- Número de embriones malformados: No existe una diferencia significativa entre los tres tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 0.789$, $P = 0.674$; fig. 8A).
- Éxito de eclosión: Diferencia significativa entre tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,12} = 121.893$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en filtro y control a comparación del sol (Prueba post-hoc de Tukey: diferencias de medias entre filtro y sol = 0.72, $P < 0.001$; diferencia de medias entre control y sol = 0.63, $P < 0.001$). No existe diferencia significativa entre filtro y control (diferencia de medias = 0.09, $P = 0.21$; fig. 8B).

- Tamaño del embrión al eclosionar: Diferencia significativa entre tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 350.4$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en filtro que en sol y control (Prueba post-hoc Dunn: diferencias de rangos entre filtro y sol = 9.8, $P < 0.05$; diferencias de rangos entre filtro y control = 17.8, $P < 0.05$). No existe diferencia significativa entre sol y control (diferencias de rango entre sol y control = 0.021, $P > 0.05$; fig. 8C).

FEBRERO

- Número de embriones malformados: Diferencia significativa entre tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 7.731$, $P = 0.007$). Significativamente mayor en sol a comparación de filtro (Prueba post-hoc Dunn: diferencias de rangos entre sol y filtro = 2.648, $P < 0.05$) No existe diferencia significativa entre filtro y control, sol y control (diferencias de rango entre filtro y control = 0.588, $P > 0.05$; sol y control = 2.1 $P > 0.05$; fig. 9A).
- Éxito de eclosión: Diferencia significativa entre tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2, 9} = 109.719$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en filtro que en control y sol y significativamente mayor en control que en sol (Prueba post-hoc Tukey: diferencias de medias entre: filtro y control = 0.93, $P < 0.001$; filtro y sol = 0.39, $P < 0.001$; control y sol = 0.53 $P < 0.001$; fig. 9B).
- Tamaño del embrión al eclosionar: Significativamente mayor en filtro que en control (U de Mann-Whitney: $U = 6249.5$, $P < 0.001$; fig. 9C).

Tabla 7. Datos totales por tratamiento y por mes del número total de huevos colocados, número total de huevos viables, número total de embriones eclosionados, porcentaje del éxito de eclosión (de los huevos viables), promedio del tamaño de eclosión (mm.), número de embriones malformados, porcentaje de embriones malformados (de los huevos viables) y días transcurridos hasta la última eclosión de *Ambystoma mexicanum*. Control (acetato de celulosa), sol (radiación UV-B directa), filtro (filtro de película LLUMAR).

	Número total de huevos	Número total de huevos viables	Número total de embriones eclosionados	Porcentaje del éxito de eclosión del # total de huevos viables (%)	Promedio del tamaño de eclosión en mm.	Número total de embriones malformados	Porcentaje de embriones malformados del # total de huevos viables (%)	Días transcurridos hasta la última eclosión
ENERO								
Control	300	296	194	65.5	10.77	4	1.35	14
Sol	300	297	39	13.13	10.79	1	0.33	13
Filtro	300	298	252	84.56	13.87	2	0.67	16
FEBRERO								
Control	240	211	121	57.34	10.365	22	10.42	12
Sol	240	209	1	0.47	0	99	47.3	10
Filtro	240	198	186	93.9	12.262	8	4.04	13
MARZO								
Control	240	158	33	20.88	9.597	33	20.88	11
Sol	240	163	0	0	0	97	59.5	---
Filtro	240	170	165	97	11.542	0	0	14
ABRIL								
Control	120	112	69	61.6	10.046	29	25.89	10
Sol	120	110	0	0	0	47	42.72	---
Filtro	120	118	118	100	11.749	3	2.5	12

Tabla 7. Continuación.

	Número total de huevos	Número total de huevos viables	Número total de embriones eclosionados	Porcentaje del éxito de eclosión del # total de huevos viables (%)	Promedio del tamaño de eclosión en mm.	Número total de embriones malformados	Porcentaje de embriones malformados del # total de huevos viables (%)	Días transcurridos hasta la última eclosión
MAYO								
Control	360	353	332	94	12.023	8	2.2	10
Sol	361	361	26	7.2	9.235	17	4.7	10
Filtro	360	353	353	100	13.474	9	2.5	12
JULIO								
Control	300	299	219	73.24	11.434	10	3.34	10
Sol	300	300	48	16	9.662	14	4.66	9
Filtro	300	300	300	100	13.632	5	1.66	14
AGOSTO								
Control	300	297	292	98.3	11.466	9	3	14
Sol	300	298	82	27.51	10.208	14	4.6	13
Filtro	300	297	292	98.3	13.643	3	1	15
SEPTIEMBRE								
Control	300	299	254	84.9	11.797	7	2.3	10
Sol	300	300	207	69	10.472	18	6	9
Filtro	300	300	300	100	13.663	1	0.33	13
OCTUBRE								
Control	300	201	189	94.02	10.324	0	0	14
Sol	300	187	140	74.86	9.244	13	6.9	11
Filtro	300	209	209	100	11.862	0	0	17
NOVIEMBRE								
Control	285	274	240	87.59	13.011	19	6.9	20
Sol	285	271	159	58.67	11.373	104	38.37	18
Filtro	285	263	263	100	14.678	4	1.52	22
DICIEMBRE								
Control	120	118	111	94.06	12.954	10	8.4	19
Sol	120	112	60	53.57	11.472	42	37.5	16
Filtro	120	115	115	100	13.613	10	8.6	20

Tabla 8. Síntesis de las diferencias significativas obtenidas por mes (experimento realizado) entre los tratamientos. Resultados obtenidos de: número de embriones malformados, éxito de eclosión y tamaño de eclosión. Se muestra (X) cuando existió una diferencia significativa entre los tratamientos. Se muestra (---) cuando no fue posible realizar la comparación estadística, porque no sobrevivió ningún embrión en algún tratamiento ó no presentaron ninguna malformación

		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Número de embriones malformados												
	Control vs. Sol			X						---	X	X
	Sol vs. Filtro		X	---	X		X		X	---	X	X
	Control vs. Filtro			---	X					---		
Éxito de eclosión												
	Control vs. Sol	X	X	---	---	X		X			X	X
	Sol vs. Filtro	X	X	---	---	X	X	X	X	X	X	X
	Control vs. Filtro		X	X	X							
Tamaño del embrión al eclosionar												
	Control vs. Sol		---	---	---	X	X	X	X	X	X	X
	Sol vs. Filtro	X	---	---	---	X	X	X	X	X	X	X
	Control vs. Filtro	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

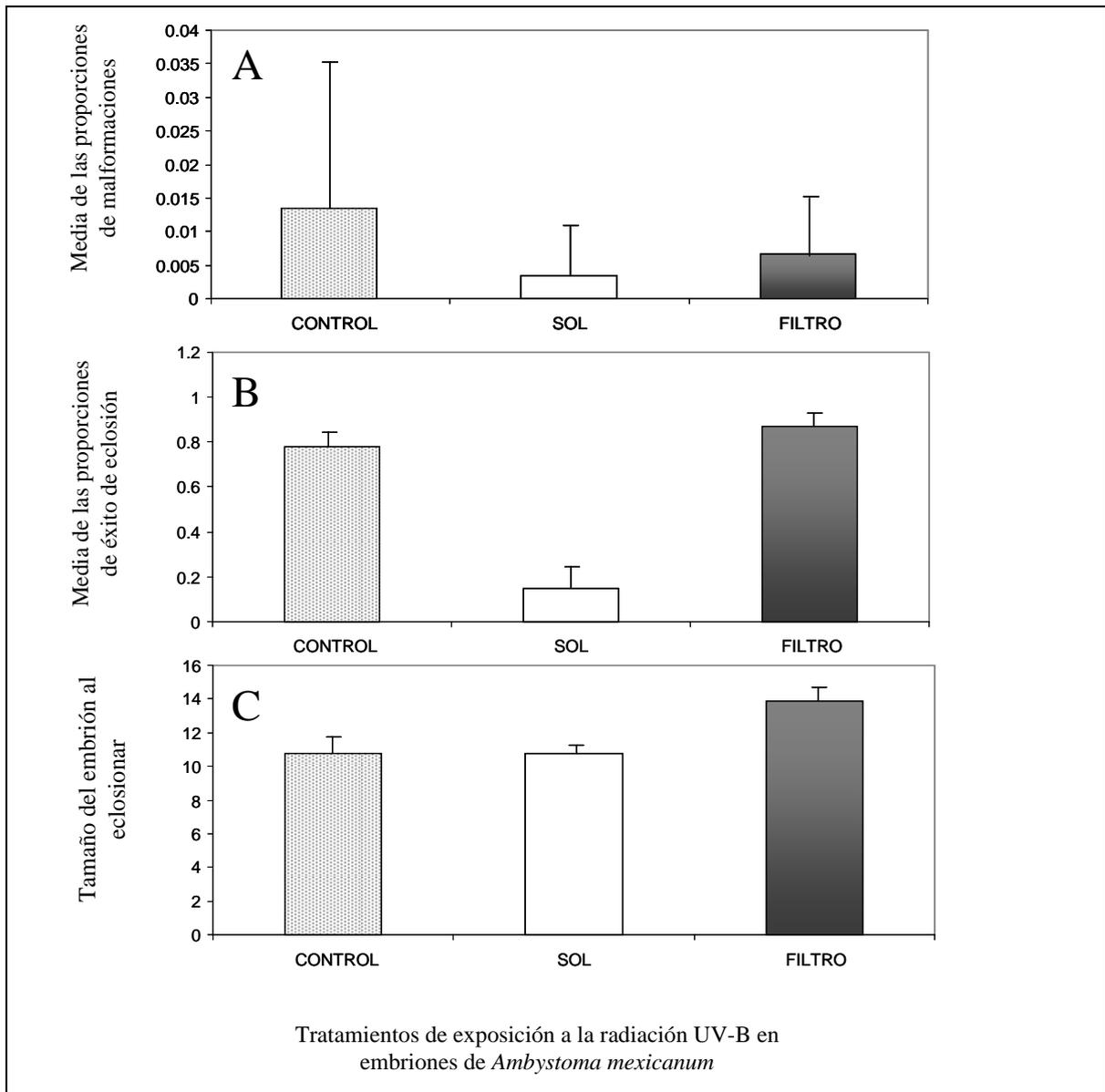


Fig. 8. Efecto de la radiación UV-B del mes de enero en los embriones de *Ambystoma mexicanum* bajo los tratamientos de control (transmisión de radiación UV-B), sol (radiación directa de la radiación UV-B), filtro (bloqueo del 99% de la radiación UV-B). (A) Media de las proporciones de las malformaciones [$X \pm$ Desviación estándar (DST)], (B) Media de las proporciones del éxito de eclosión ($X \pm$ DST), (C) Media del tamaño del embrión al eclosionar ($X \pm$ DST) en *Ambystoma mexicanum* bajo los tres tratamientos.

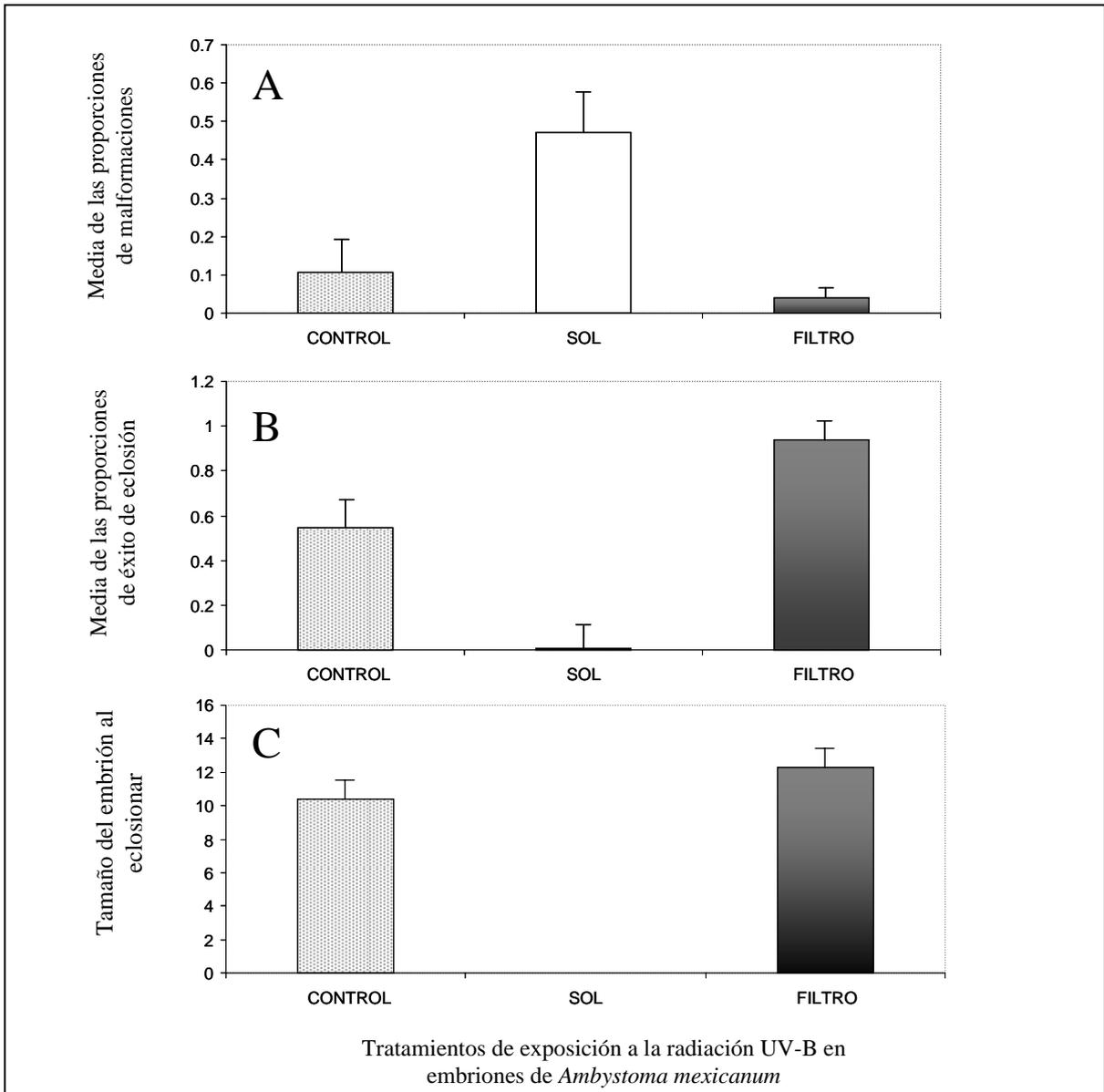


Fig. 9. Efecto de la radiación UV-B del mes de febrero en los embriones de *Ambystoma mexicanum* bajo los tratamientos de control (transmisión de radiación UV-B), sol (radiación directa de la radiación UV-B), filtro (bloqueo del 99% de la radiación UV-B). (A) Media de las proporciones de las malformaciones ($X \pm DST$), (B) Media de las proporciones del éxito de eclosión ($X \pm DST$), (C) Media del tamaño del embrión al eclosionar ($X \pm DST$) en *Ambystoma mexicanum* bajo los tres tratamientos.

MARZO

- Número de embriones malformados: Significativamente mayor en sol que en control (t de Student: $t = -3.876$, $df = 2$, $P = 0.008$; fig. 10A).
- Éxito de eclosión: Significativamente mayor en filtro que en control (t de Student: $t = -13.496$, $df = 6$, $P < 0.001$; fig. 10B).
- Tamaño del embrión al eclosionar: Significativamente mayor en filtro que en control (Student t-test: $t = -18.823$, $df = 179$, $P < 0.001$; fig. 10C).

ABRIL

- Número de embriones malformados: Diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,6} = 29.782$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en sol y control a diferencia de filtro (Prueba post-hoc Tukey: diferencias entre medias sol y filtro = 0.48, $P < 0.001$; control y filtro = 0.433, $P = 0.002$). No hubo diferencia significativa entre control y sol (Diferencias entre medias = 0.0497, $P = 0.773$; fig. 11A).
- Éxito de eclosión: Significativamente mayor en filtro que en control (U de Mann-Whitney: $U = 10$, $P = 0.029$; fig. 11B).
- Tamaño del embrión al eclosionar: Significativamente mayor en filtro a comparación de control (t de Student: $t = -18.839$, $df = 165$, $P < 0.001$; fig. 11C).

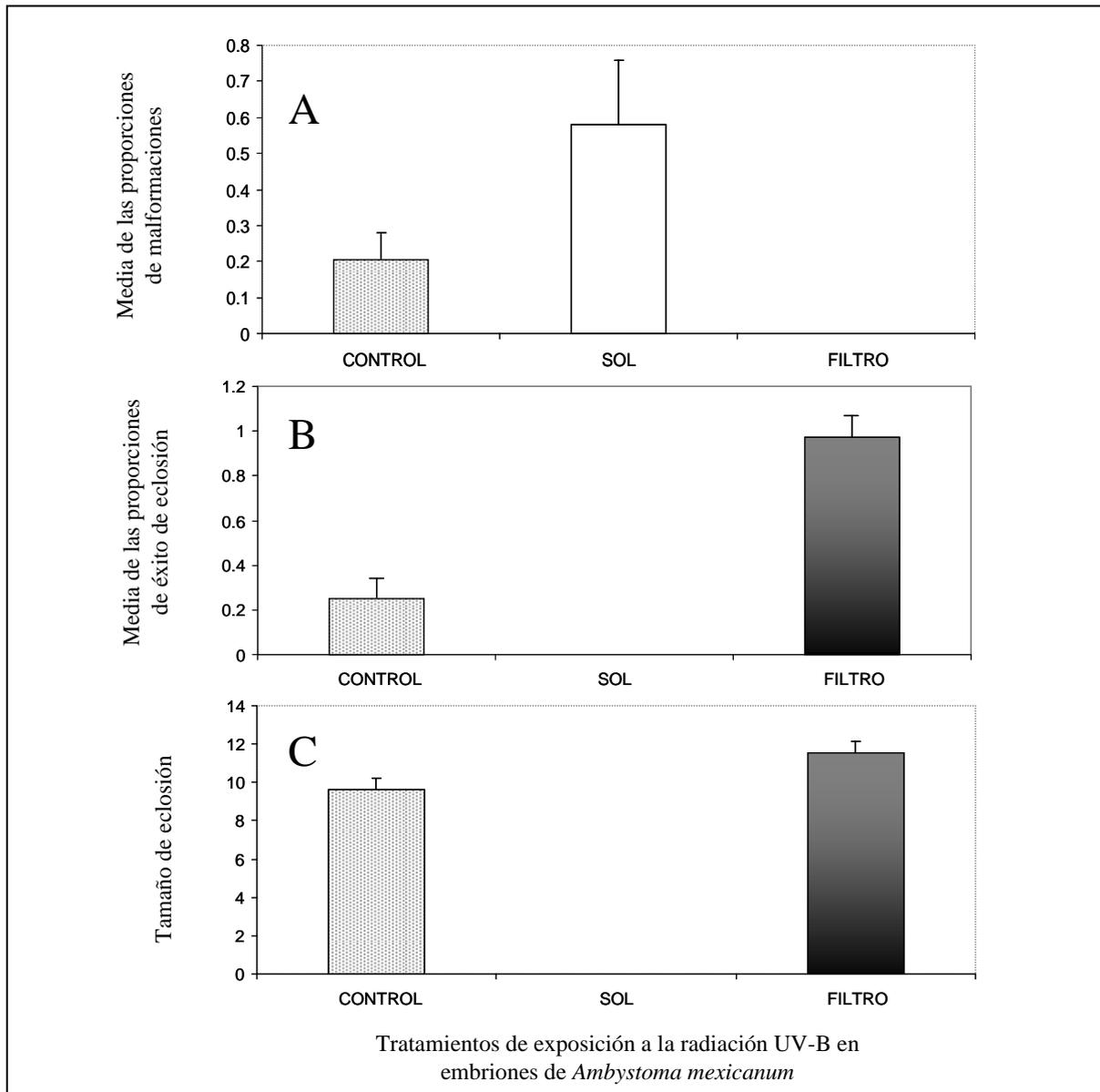


Fig. 10. Efecto de la radiación UV-B del mes de marzo en los embriones de *Ambystoma mexicanum* bajo los tratamientos de control (transmisión de radiación UV-B), sol (radiación directa de la radiación UV-B), filtro (bloqueo del 99% de la radiación UV-B). (A) Media de las proporciones de las malformaciones ($X \pm DST$), (B) Media de las proporciones del éxito de eclosión ($X \pm DST$), (C) Media del tamaño del embrión al eclosionar ($X \pm DST$) en *Ambystoma mexicanum* bajo los tres tratamientos.

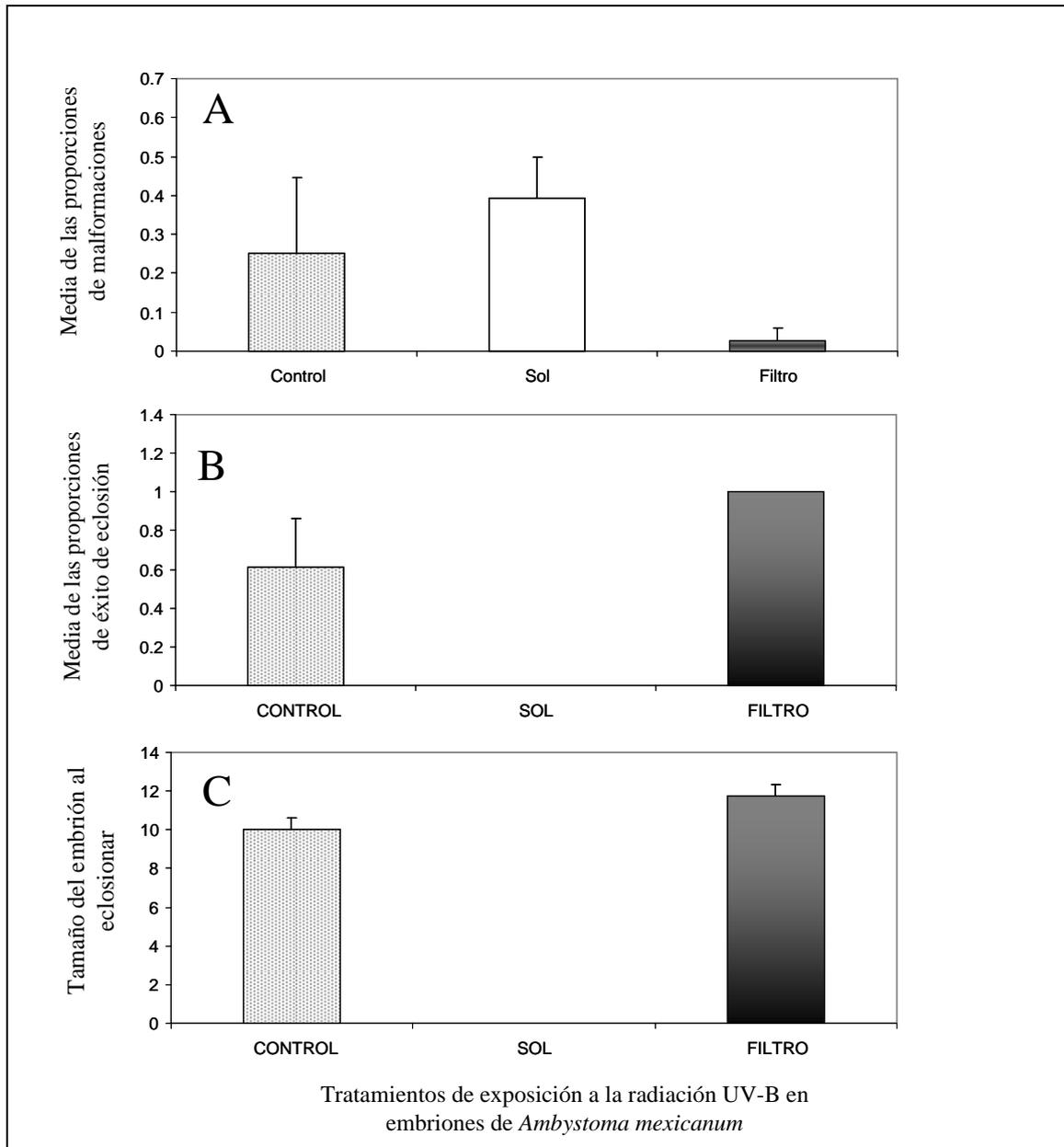


Fig. 11. Efecto de la radiación UV-B del mes de abril en los embriones de *Ambystoma mexicanum* bajo los tratamientos de control (transmisión de radiación UV-B), sol (radiación directa de la radiación UV-B), filtro (bloqueo del 99% de la radiación UV-B). (A) Media de las proporciones del éxito de eclosión ($X \pm DST$), (B) Media de las proporciones de las malformaciones, se presenta el 100 % de los datos por lo que no se observa $X \pm DST$ en filtro, (C) Media del tamaño del embrión al eclosionar ($X \pm DST$) en *Ambystoma mexicanum* bajo los tres tratamientos.

MAYO

- Número de embriones malformados: No existe diferencia significativa entre los tres tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,15} = 1.297$, $P = 0.302$; fig. 12A).
- Éxito de eclosión: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,15} = 503.294$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en filtro y control a comparación que sol (Prueba post- hoc Tukey: diferencia entre medias filtro y sol = 0.93, $P < 0.001$; control y sol = 0.872, $P < 0.001$). No existe diferencia significativa entre filtro y control (diferencias entre medias = 0.057, $P = 0.217$; fig. 12B).
- Tamaño del embrión al eclosionar: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 480.090$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en filtro a comparación de control y sol, y significativamente mayor en control y sol (Prueba post-hoc Dunn: diferencias entre rangos filtro y sol = 507.212, $P < 0.05$, filtro y control = 321.238, $P < 0.05$, control y sol = 185.974, $P < 0.05$; fig. 12C).

JULIO

- Número de embriones malformados: Diferencias significativa entre los tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,12} = 7.180$, $P = 0.009$). Significativamente mayor en sol a comparación de filtro (Prueba post-hoc Tukey: diferencias entre las medias sol y filtro = 0.03, $P = 0.007$). No existe diferencia significativa entre filtro y control, sol y control (diferencias entre medias sol y control = 0.0132, $P = 0.258$; control y filtro = 0.0168, $P = 0.129$; fig. 13A).
- Éxito de eclosión: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 13.011$, $P = 0.001$). Significativamente mayor en filtro a

comparación de sol (Prueba post- hoc utilizada Dunn: diferencia entre rangos filtro y sol = 10, $P < 0.05$). No existe diferencia significativa entre control y filtro, control y sol (diferencia entre rangos filtro y control = 5 $P > 0.05$; control y sol = 5, $P > 0.05$; fig. 13B).

- Tamaño del embrión al eclosionar: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 390.570$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en filtro a comparación de control y sol y significativamente mayor en control que sol (Prueba post- hoc Dunn: diferencia entre rangos filtro y sol = 386.61, $P < 0.05$; filtro y control = 246.3, $P < 0.05$; control y sol = 140.311, $P < 0.05$; fig. 13C).

AGOSTO

- Número de embriones malformados: No existe diferencia significativa en los tres tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,12} = 3.797$, $P = 0.053$; fig. 14A).
- Éxito de eclosión: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 10.261$, $P < 0.006$). Significativamente mayor en control y filtro a comparación de sol. (Prueba post- hoc Dunn: diferencias entre rangos filtro y sol = 8.2 $P < 0.05$; control y sol = 6.8, $P < 0.05$). No existe diferencia significativa entre control y filtro (diferencias entre rangos = 1.4, $P > 0.05$; fig. 14B).
- Tamaño del embrión al eclosionar: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,638} = 883.764$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en control y filtro a diferencia de sol y significativamente mayor en control que en sol (Prueba post- hoc Tukey: diferencias entre medias filtro y sol = 3.39, $P < 0.001$; filtro y control = 2.17, $P < 0.001$; control y sol = 1.216, $P < 0.01$; fig. 14C).

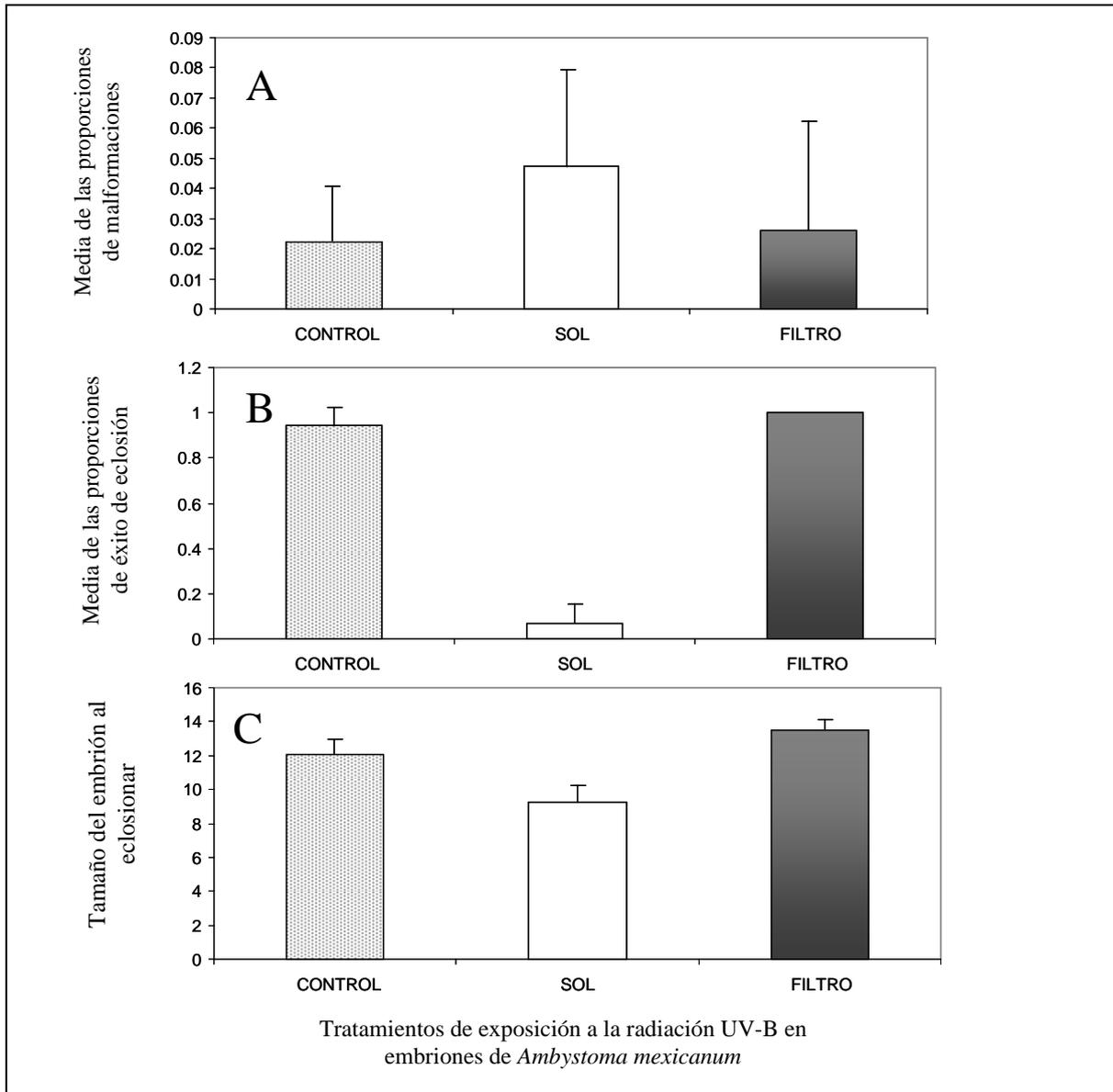


Fig. 12. Efecto de la radiación UV-B del mes de mayo en los embriones de *Ambystoma mexicanum* bajo los tratamientos de control (transmisión de radiación UV-B), sol (radiación directa de la radiación UV-B), filtro (bloqueo del 99% de la radiación UV-B). (A) Media de las proporciones de las malformaciones ($X \pm DST$), (B) Media de las proporciones del éxito de eclosión, se presenta el 100 % de los datos, por lo que no se observa $X \pm DST$ en filtro, (C) Media del tamaño del embrión al eclosionar ($X \pm DST$) en *Ambystoma mexicanum* bajo los tres tratamientos.

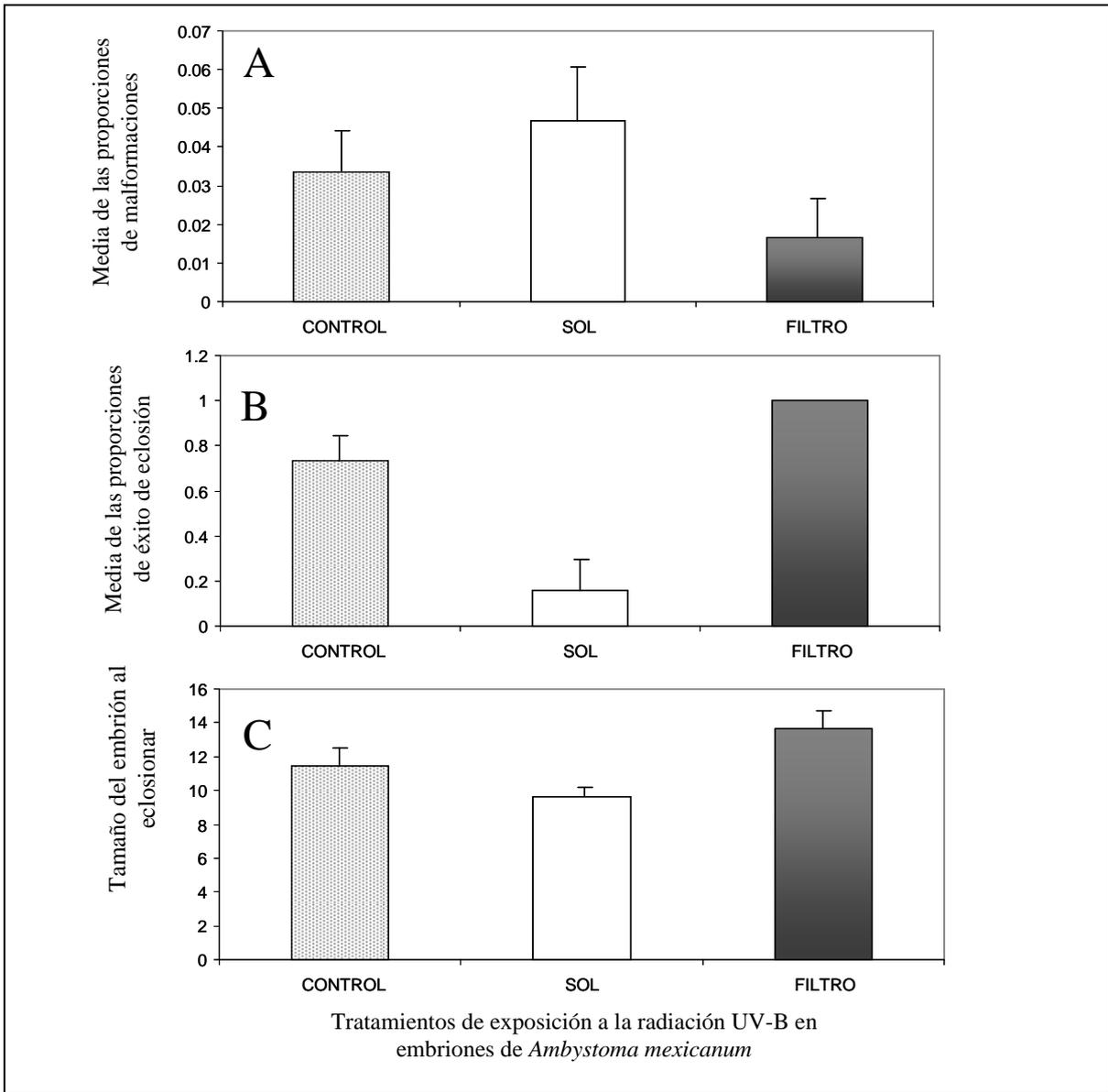


Fig. 13. Efecto de la radiación UV-B del mes de julio en los embriones de *Ambystoma mexicanum* bajo los tratamientos de control (transmisión de radiación UV-B), sol (radiación directa de la radiación UV-B), filtro (bloqueo del 99% de la radiación UV-B). (A) Media de las proporciones de las malformaciones ($X \pm DST$), (B) Media de las proporciones del éxito de eclosión, se presenta el 100 % de los datos, por lo que no se observa $X \pm DST$ en filtro, (C) Media del tamaño del embrión al eclosionar ($X \pm DST$) en *Ambystoma mexicanum* bajo los tres tratamientos.

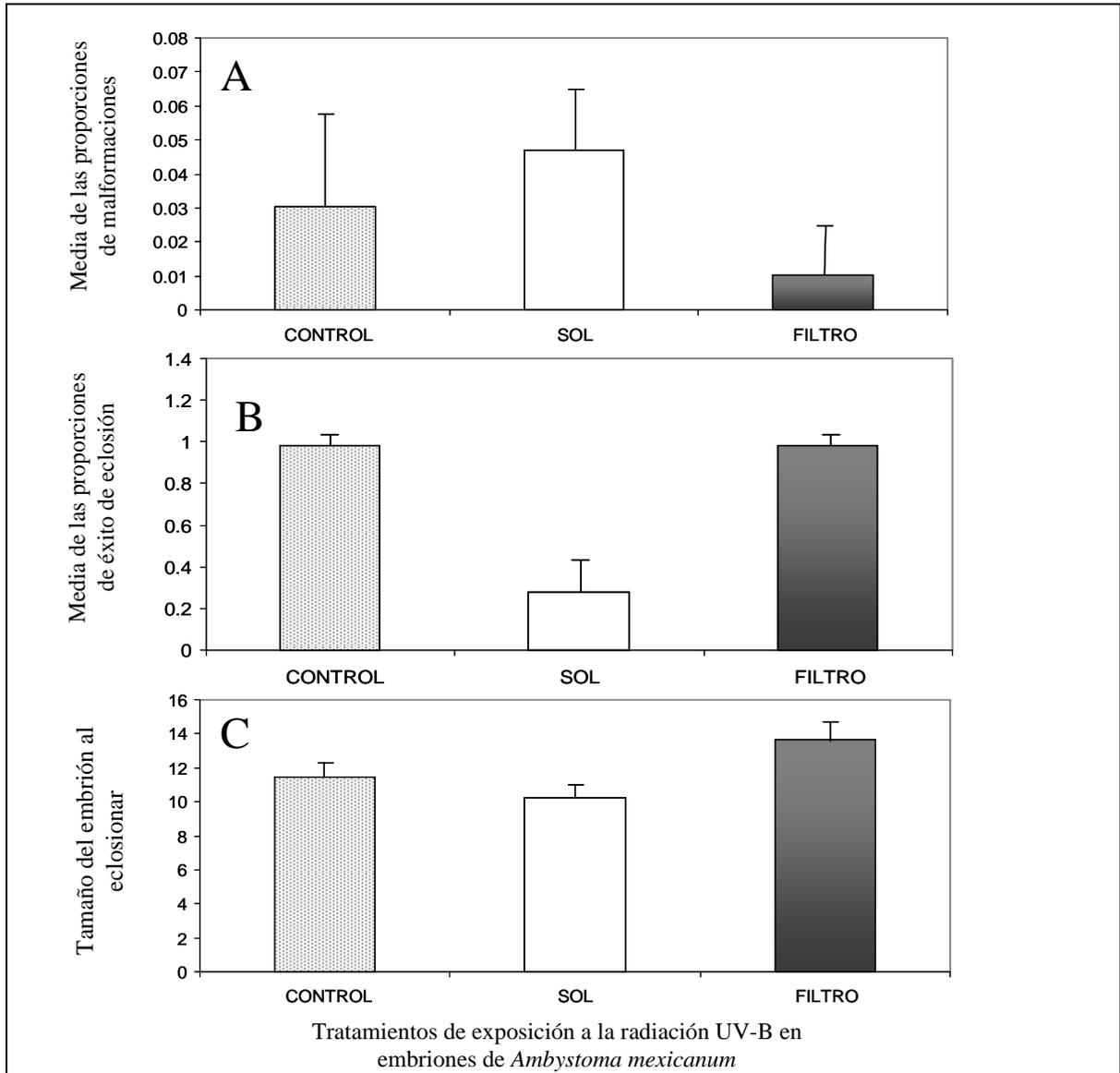


Fig. 14. Efecto de la radiación UV-B del mes de agosto en los embriones de *Ambystoma mexicanum* bajo los tratamientos de control (transmisión de radiación UV-B), sol (radiación directa de la radiación UV-B), filtro (bloqueo del 99% de la radiación UV-B). (A) Media de las proporciones de las malformaciones ($X \pm DST$), (B) Media de las proporciones del éxito de eclosión ($X \pm DST$), (C) Media del tamaño de los embriones al eclosionar ($X \pm DST$) en *Ambystoma mexicanum* bajo los tres tratamientos.

SEPTIEMBRE

- Número de embriones malformados: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,12} = 7.67$, $P = 0.007$). Significativamente mayor en sol a diferencia de filtro. (Prueba post- hoc Tukey: diferencias entre las medias sol y filtro = 0.0567, $P < 0.05$). No existe diferencia significativa entre filtro y control, sol y control (diferencia significativa entre medias sol y control = 0.036, $P > 0.05$; control y filtro = 0.0201, $P > 0.05$; fig. 15A).
- Éxito de eclosión: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,12} = 8.254$, $P = 0.006$). Significativamente mayor en filtro que en sol (Prueba post- hoc Tukey: diferencias entre medias filtro y sol = 0.31, $P = 0.004$). No existe diferencia significativa entre control y filtro, control y sol (diferencia entre medias control y filtro = 0.15, $P = 0.163$; control y sol = 0.16, $P = 0.133$; fig. 15B).
- Tamaño del embrión al eclosionar: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 618.862$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en filtro que en control y sol y significativamente mayor en control que en sol (Prueba post- hoc Dunn: diferencias entre rangos filtro y sol = 506.44, $P < 0.05$; filtro y control = 289.105, $P < 0.05$; control y sol = 217.339, $P < 0.05$; fig. 15C).

OCTUBRE

- Número de embriones malformados: Únicamente se observaron embriones malformados bajo el tratamiento de sol (Fig. 16A).
- Éxito de eclosión: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 9.647$, $P = 0.008$). Significativamente mayor en filtro a

comparación de sol (Prueba post- hoc Dunn: diferencias entre rangos filtro y sol = 74, $P < 0.05$). No existe diferencia significativa entre control y filtro, control y sol (diferencias entre rangos filtro y control = 1.6, $P > 0.05$; control y sol = $P > 0.05$; fig. 16B).

- Tamaño del embrión al eclosionar: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 244.505$, $P < 0.001$). Significativamente más grande en filtro que en control y sol y significativamente mayor en control que en sol (Prueba post- hoc Dunn: diferencias entre rangos filtro y sol = 261.67, $P < 0.05$; filtro y control = 129.84, $P < 0.05$; control y sol = 131.839, $P < 0.05$; fig. 16C).

NOVIEMBRE

- Número de embriones malformados: Diferencia significativa entre los tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,12} = 24.601$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en sol que en control y filtro (Prueba post- hoc Tukey: diferencias entre medias sol y filtro = 0.378, $P < 0.001$; sol y control = 0.326, $P < 0.001$). No existe diferencia significativa entre control y filtro (diferencias entre medias = 0.0513, $P = 0.663$; fig. 17A).
- Éxito de eclosión: Diferencia significativa entre los tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,12} = 22.170$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en filtro que en sol y significativamente mayor en control que sol (Prueba post- hoc Tukey: diferencia entre medias filtro y sol = 0.407, $P < 0.001$; control y sol = 0.271, $P = 0.003$). No existe diferencia significativa entre filtro y control (diferencia entre medias = 0.130, $P = 0.115$; fig. 17B).
- Tamaño del embrión al eclosionar: Diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 487.990$, $P < 0.001$)

Significativamente mayor en filtro que en control y sol, y significativamente mayor en control que en sol (Prueba post- hoc Dunn: diferencias entre rangos filtro y sol = 408.567, $P < 0.05$; filtro y control = 247.384, $P < 0.05$; control y sol = 166.184, $P < 0.05$; fig. 17C).

DICIEMBRE

- Número de embriones malformados: Diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA de una vía: $F_{2,15} = 42.830$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en sol que en control y filtro (Prueba post- hoc Tukey: diferencias entre medias sol y filtro = 0.342, $P < 0.001$; sol y control = 0.323, $P < 0.001$). No existen diferencias significativas entre control y filtro (diferencia entre medias = 0.0189, $P = 0.856$; fig.18A).
- Éxito de eclosión: Diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 14.073$, $P < 0.001$). Significativamente mayor en filtro a comparación de sol y significativamente mayor en control a comparación de sol (Prueba post- hoc Dunn: diferencias entre rangos filtro y sol = 10.5, $P < 0.05$; control y sol = 7.5, $P < 0.05$). No hubo diferencias significativas entre filtro y control (diferencias entre rangos = 3, $P > 0.05$; fig. 18B).
- Tamaño del embrión al eclosionar: Diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA de Kruskal-Wallis: $H^2 = 145.182$, $P = 0.001$). Significativamente mayor en filtro que en control y sol, y significativamente mayor en control que sol (Prueba post- hoc Dunn: diferencias entre rangos filtro y sol = 153.9, $P < 0.05$; filtro y control= 56.97, $P < 0.05$; control y sol = 96.957, $P < 0.05$; fig. 18C).

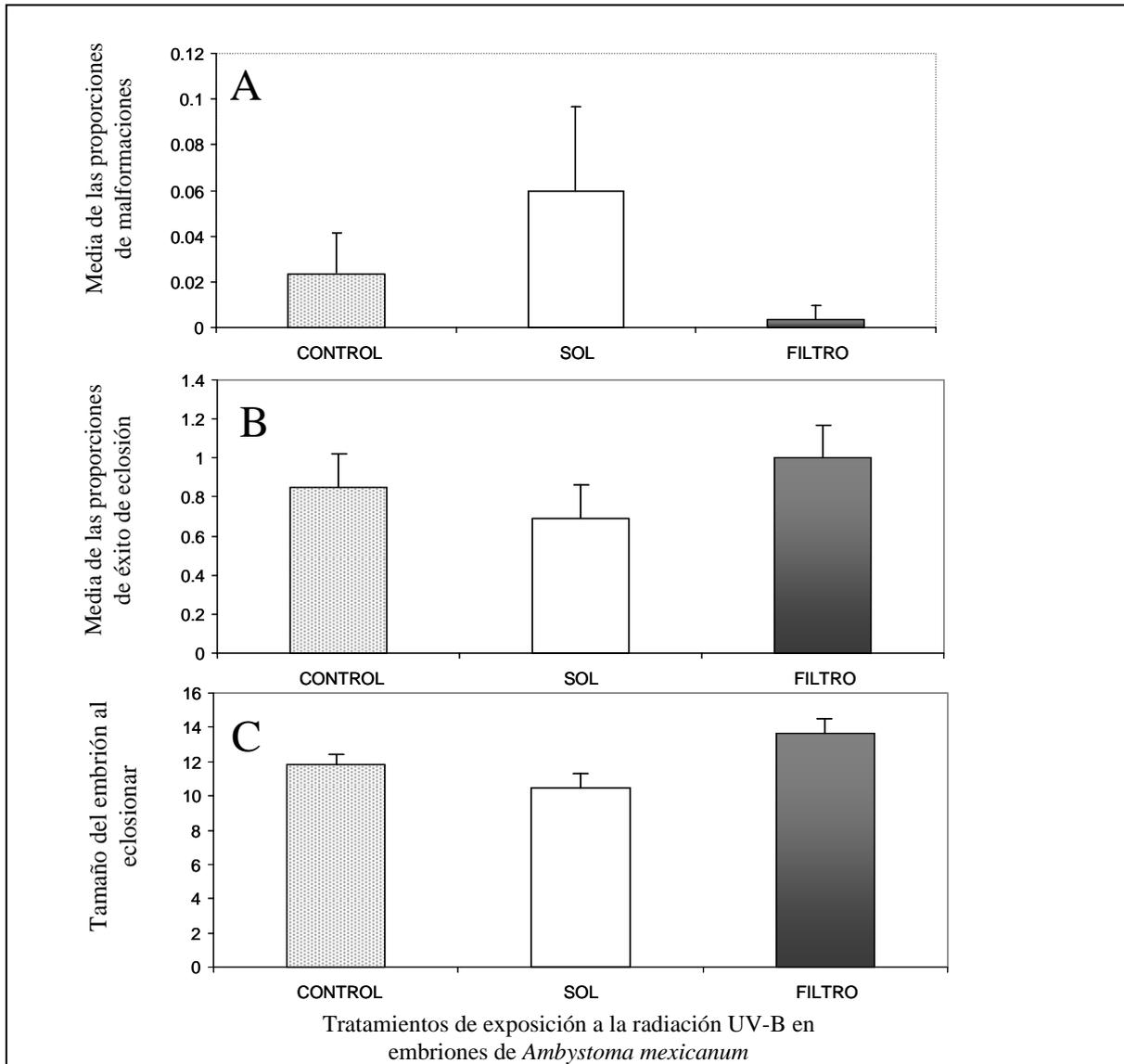


Fig. 15. Efecto de la radiación UV-B del mes de septiembre en los embriones de *Ambystoma mexicanum* bajo los tratamientos de control (transmisión de radiación UV-B), sol (radiación directa de la radiación UV-B), filtro (bloqueo del 99% de la radiación UV-B). (A) Media de las proporciones de las malformaciones ($X \pm DST$), (B) Media de las proporciones del éxito de eclosión ($X \pm DST$), (C) Media del tamaño del embrión al eclosionar ($X \pm DST$) en *Ambystoma mexicanum* bajo los tres tratamientos.

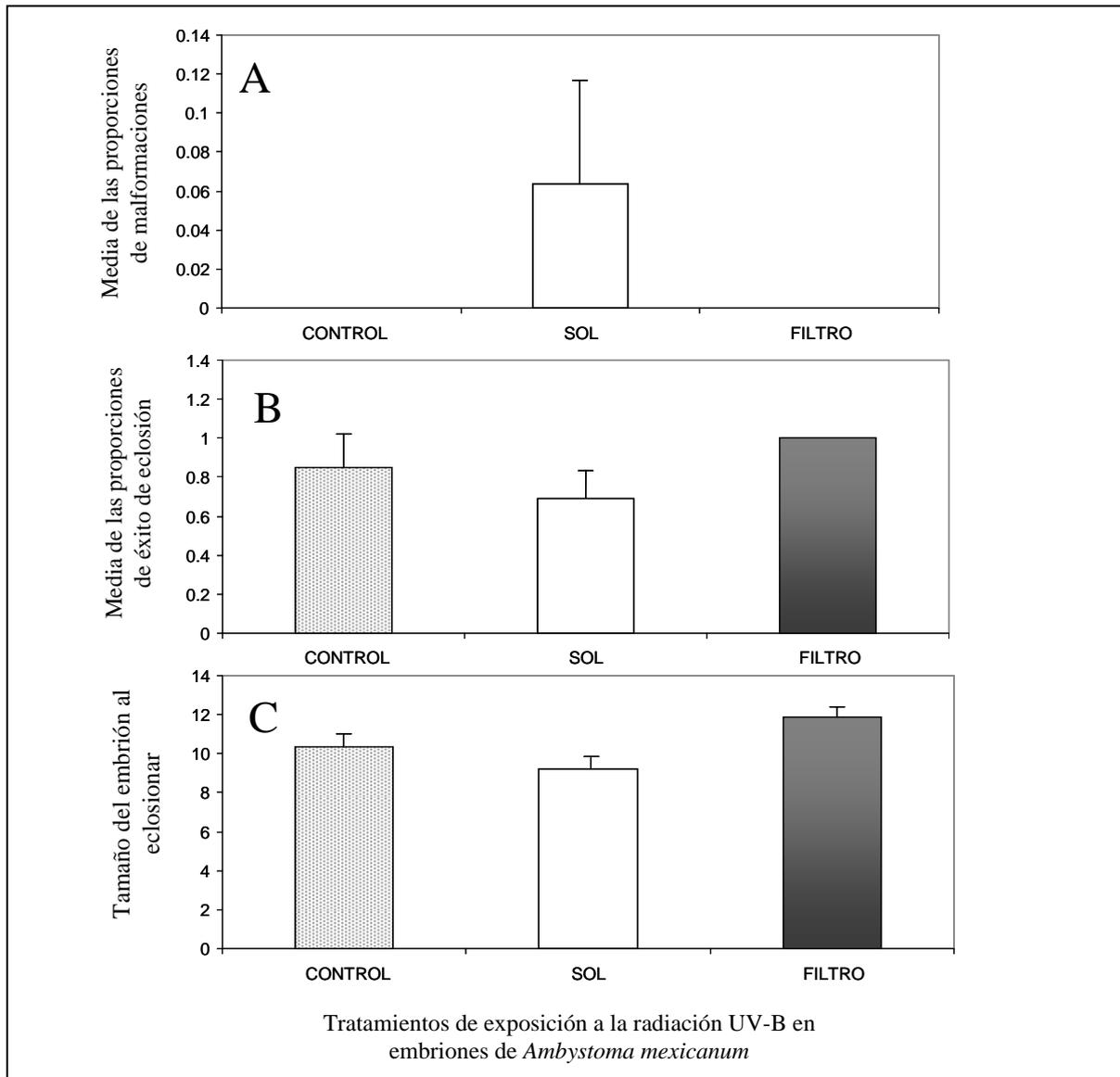


Fig. 16. Efecto de la radiación UV-B del mes de octubre en los embriones de *Ambystoma mexicanum* bajo los tratamientos de control (transmisión de radiación UV-B), sol (radiación directa de la radiación UV-B), filtro (bloqueo del 99% de la radiación UV-B). (A) Media de las proporciones de las malformaciones ($X \pm DST$), (B) Media de las proporciones del éxito de eclosión se presenta el 100 % de los datos, por lo que no se

observa $X \pm DST$ en filtro, (C) Media del tamaño del embrión al eclosionar ($X \pm DST$) en *Ambystoma mexicanum* bajo los tres tratamientos.

NOVIEMBRE

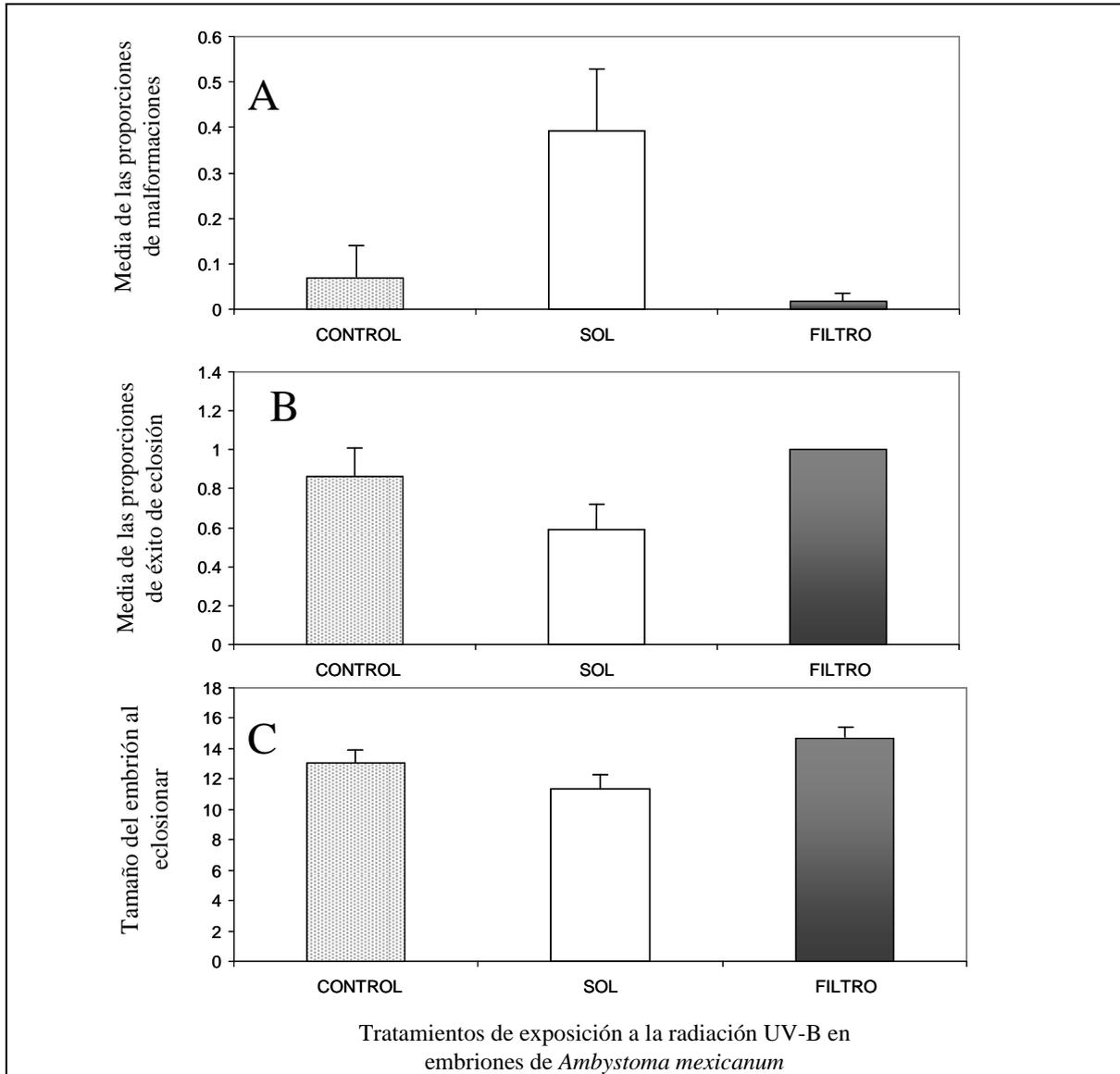


Fig. 17. Efecto de la radiación UV-B del mes de noviembre en los embriones de *Ambystoma mexicanum* bajo los tratamientos de control (transmisión de radiación UV-B), Sol (radiación directa de la radiación UV-B), filtro (bloqueo del 99% de la radiación UV-B). (A) Media de las proporciones de las malformaciones ($X \pm DST$), (B) Media de las proporciones del éxito de eclosión se presenta el 100 % de los datos, por lo que no se

observa $X \pm DST$ en filtro, (C) Media del tamaño del embrión al eclosionar ($X \pm DST$) en *Ambystoma mexicanum* bajo los tres tratamientos.

DICIEMBRE

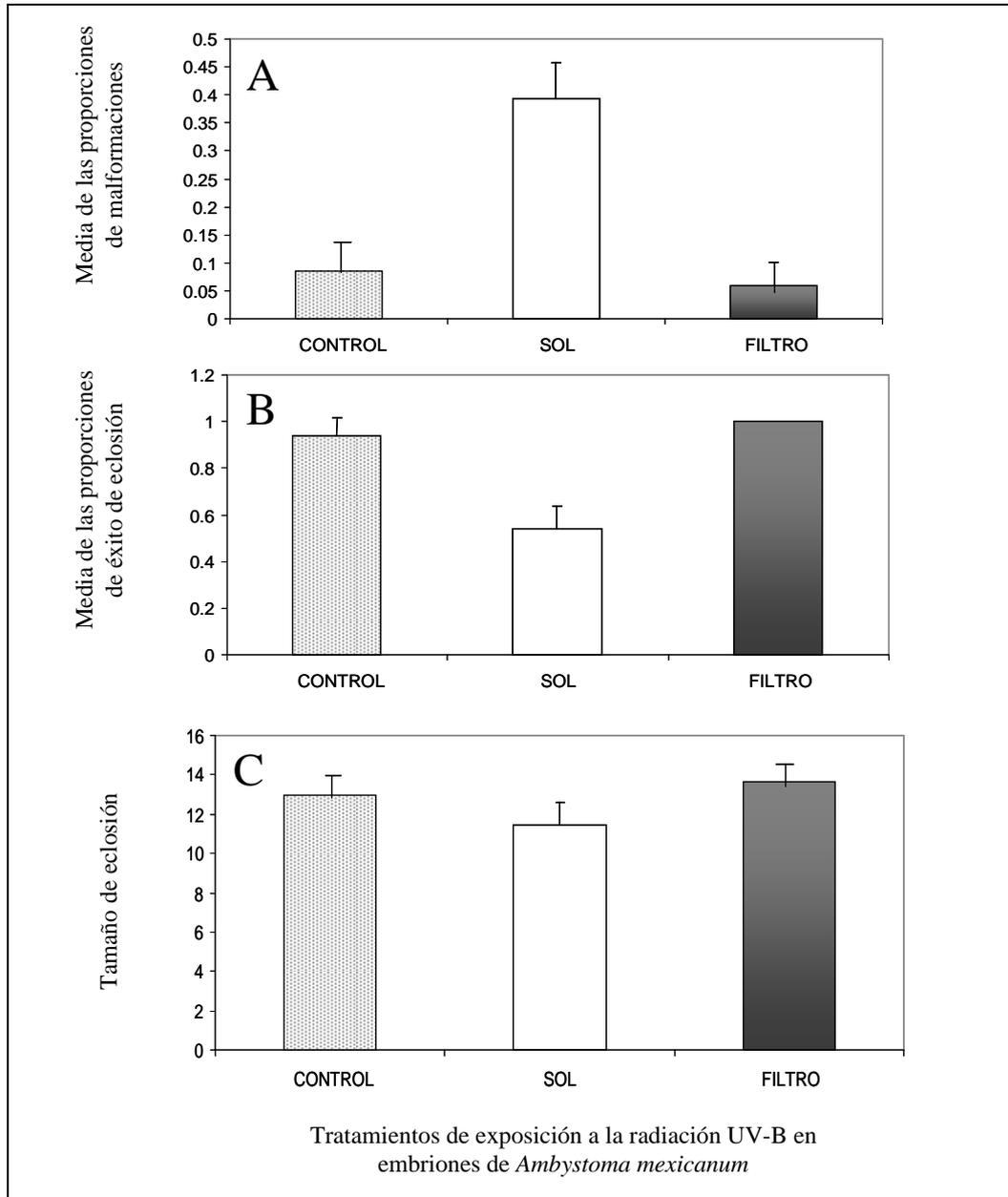


Fig. 18. Efecto de la radiación UV-B del mes de diciembre en los embriones de *Ambystoma mexicanum* bajo los tratamientos de control (transmisión de radiación UV-B), sol (radiación directa de la radiación UV-B), filtro (bloqueo del 99% de la radiación UV-B). (A) Media de las proporciones de las malformaciones ($X \pm DST$), (B) Media de

las proporciones del éxito de eclosión, se presenta el 100 % de los datos, por lo que no se observa $X \pm DST$ en filtro, (C) Media del tamaño del embrión al eclosionar ($X \pm DST$) en *Ambystoma mexicanum* bajo los tres tratamientos.

Correlación de la radiación UV-B y efectos encontrados

No fue significativa la correlación entre la cantidad de radiación UV-B (dada en W/m^2) y el número de embriones malformados bajo el tratamiento de control ($r = 0.208$, $R^2 = 0.043$, $P = 0.540$; fig. 19A), sol ($r = 0.411$, $R^2 = 0.169$, $P = 0.199$; fig. 19B) y filtro ($r = -0.099$, $R^2 = 0.01$, $P = 0.771$; fig. 19C).

Se encontraron correlaciones negativas significativas entre la cantidad de radiación UV-B y el número de embriones eclosionados sometidos al tratamiento de Sol ($r = -0.767$, $R^2 = 0.5882$, $P = 0.006$; fig. 20B, 21).

Se encontró una correlación negativa significativa entre la cantidad de radiación UV-B (dada en W/m^2) y el tamaño de los embriones al eclosionar para los tratamientos de control ($r = -0.656$, $R^2 = 0.430$, $P = 0.028$; fig. 22 A), sol ($r = -0.826$, $R^2 = 0.68$, $P = 0.0001$; fig.22 B) y filtro ($r = -0.664$, $R^2 = 0.44$, $P = 0.023$, fig. 22C, 23).

Se encontraron correlaciones negativas significativas entre la cantidad de radiación UV-B y los días que tardan en eclosionar los embriones sometidos a los tratamientos de control ($r = -0.772$, $R^2 = 0.59$, $P = 0.0053$; fig. 24A), sol ($r = -0.899$, $R^2 = 0.808$, $P = 0.000171$; fig. 24B), filtro ($r = -0.817$, $R^2 = 0.667$, $P = 0.0021$; fig. 24C, 25).

MALFORMADOS

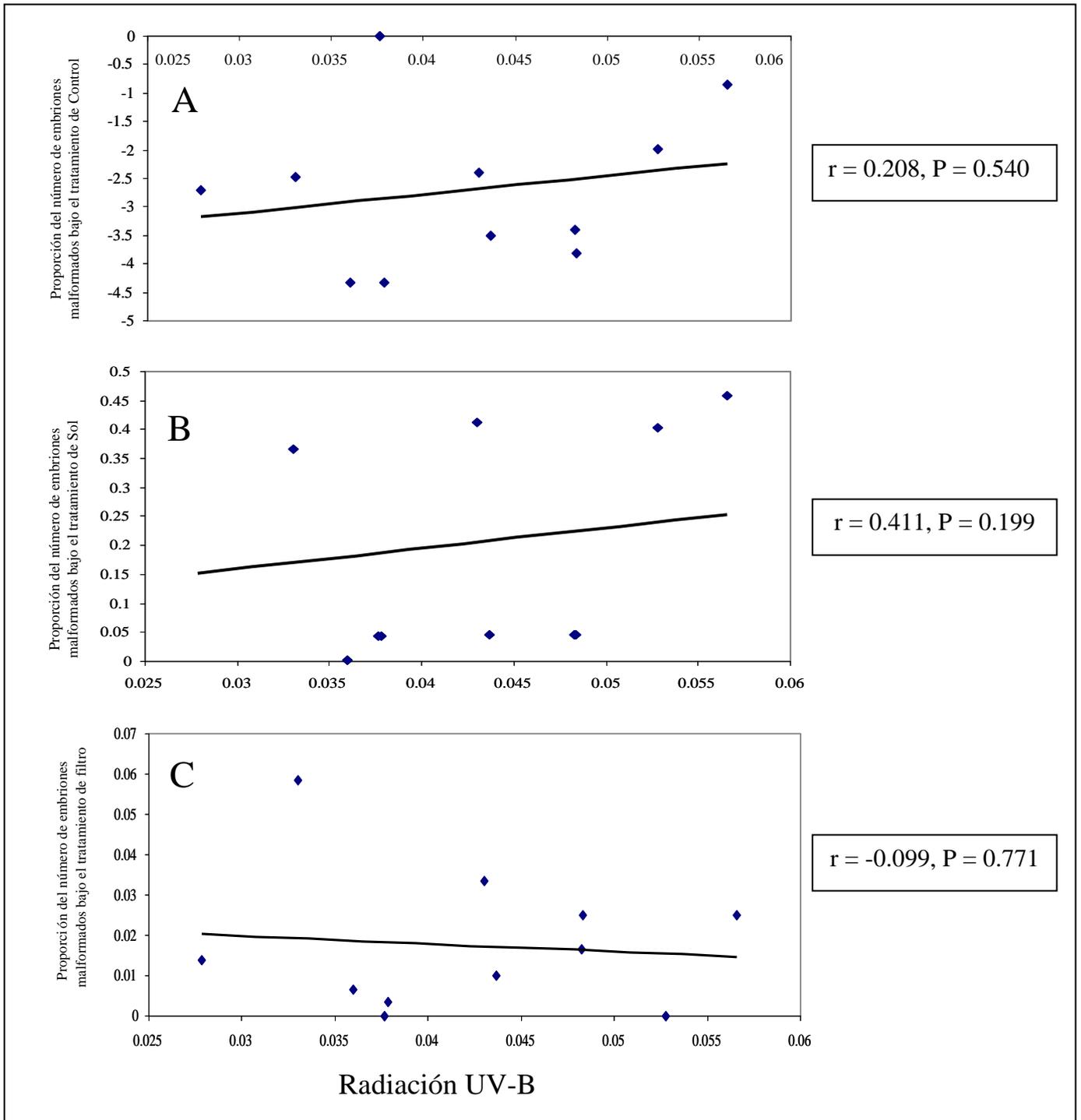


Fig. 19. Correlación entre la cantidad de radiación UV-B (dada en W/m^2) por experimento y la proporción de embriones malformados, bajo los tratamientos de: (A) control, (B) sol, (C) filtro.

ÉXITO DE ECLOSIÓN

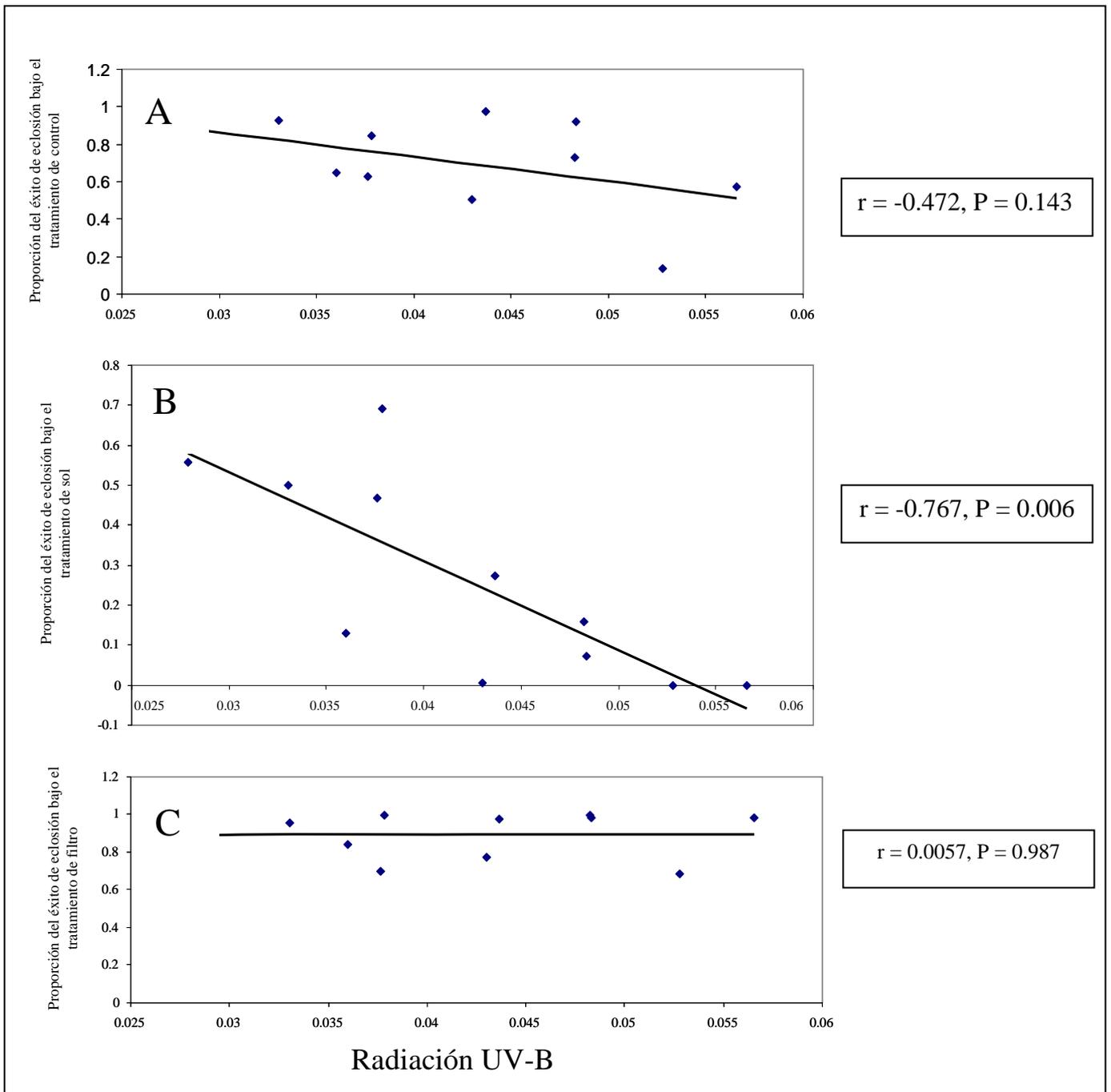


Fig. 20. Correlación entre la cantidad de radiación UV-B (dada en W/m^2) por experimento y la proporción de éxito de embriones eclosionados bajo los tratamientos de: (A) control, (B) sol, (C) filtro.

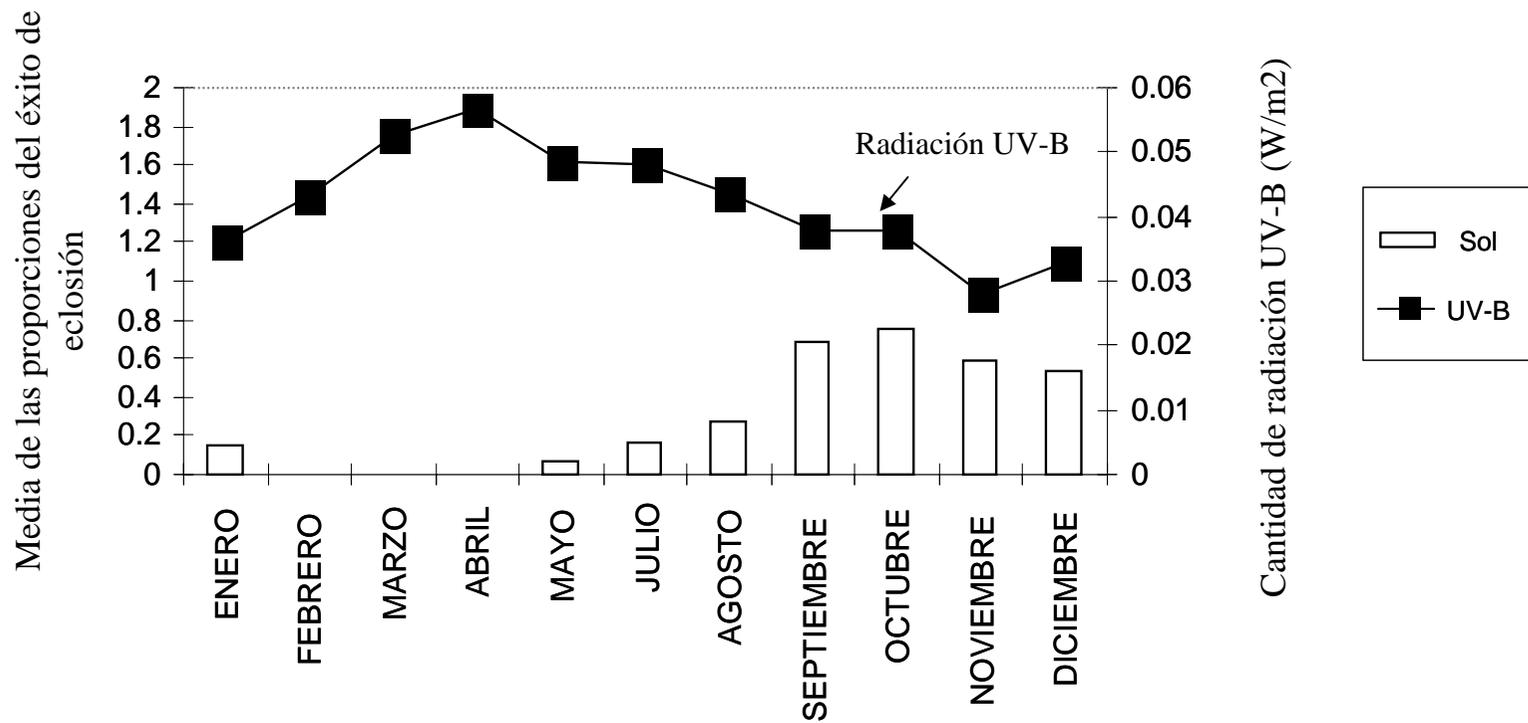


Fig. 21. Relación inversa entre la cantidad de radiación UV-B y el éxito de eclosión en los organismos sometidos directamente a la radiación UV-B (tratamiento sol).

TAMAÑO DE LOS EMBRIONES AL ECLOSIONAR

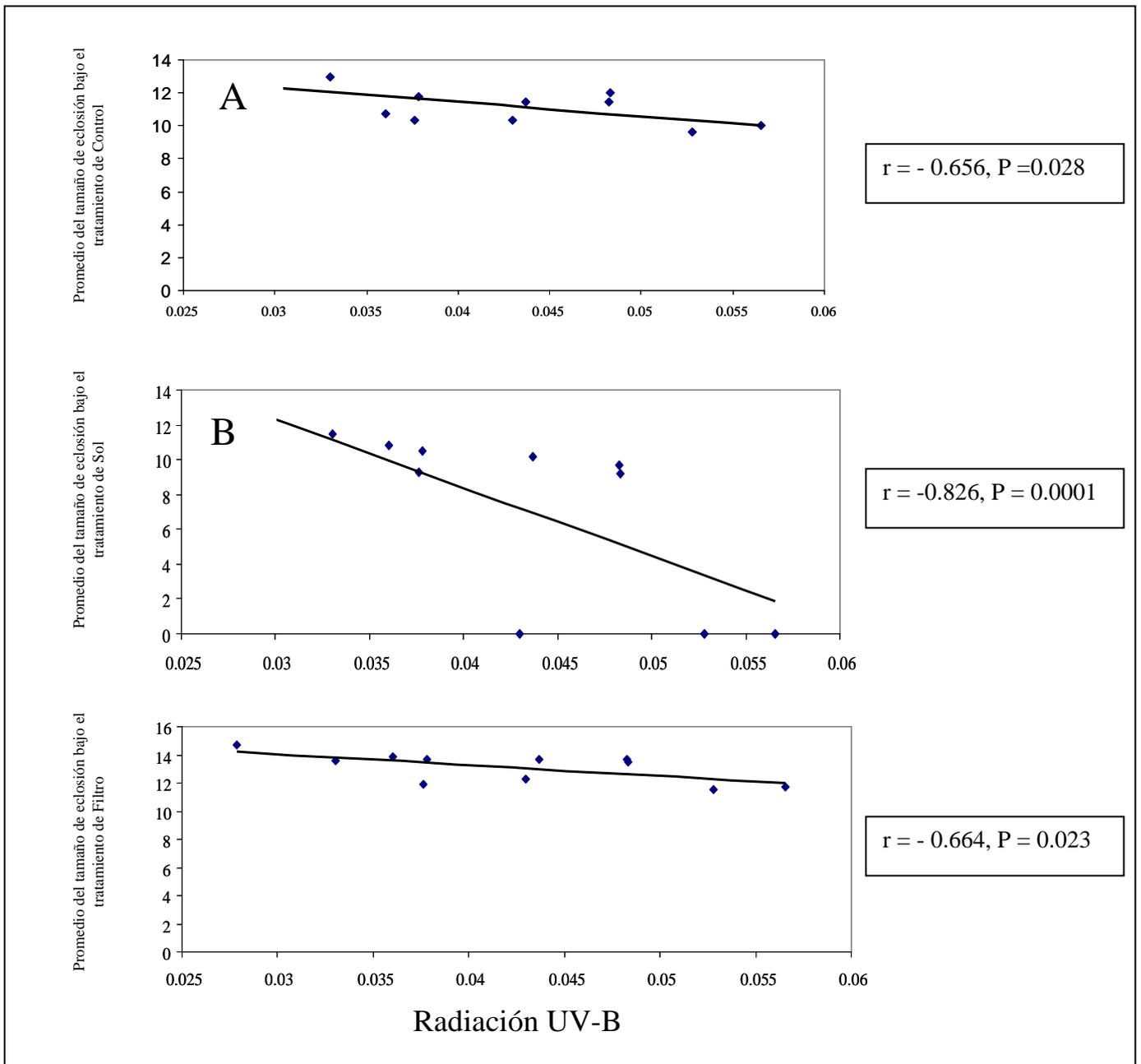


Fig. 22. Correlación entre la cantidad de radiación UV-B (dada en W/m^2) por experimento y el promedio del tamaño de eclosión de los embriones bajo los tratamientos de: (A) control, (B) sol, (C) filtro.

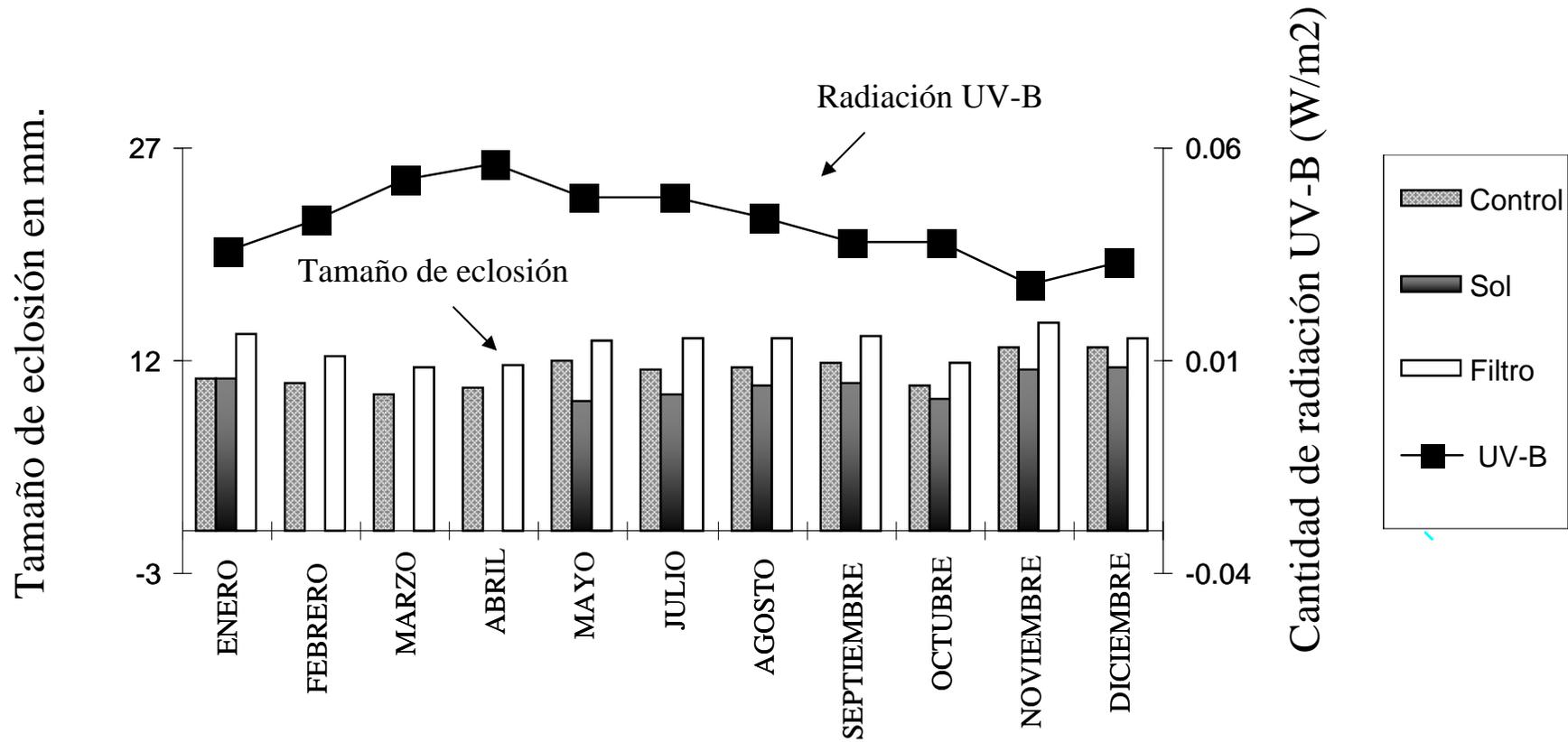


Fig. 23. Relación inversa significativa entre la cantidad de radiación UV-B y el tamaño de los embriones al eclosionar en los organismos sometidos a los tres tratamientos

DÍAS TRANSCURRIDOS HASTA LA ÚLTIMA ECLOSIÓN

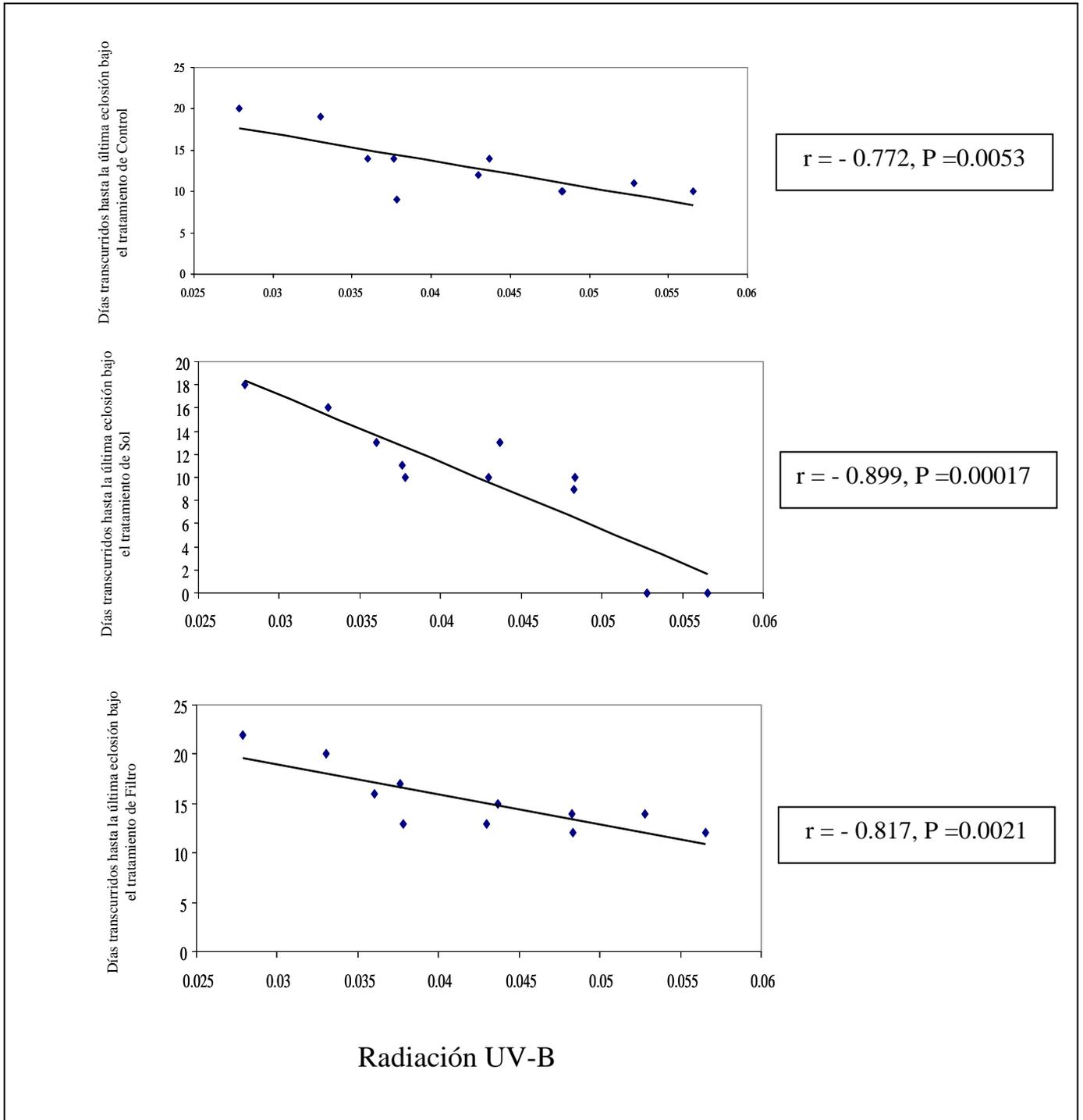


Fig. 24. Correlación entre la cantidad de radiación UV-B (dada en W/m²) por experimento y los días transcurridos hasta que el último embrión eclosionó, bajo los tratamientos de: (A) control, (B) sol, (C) filtro.

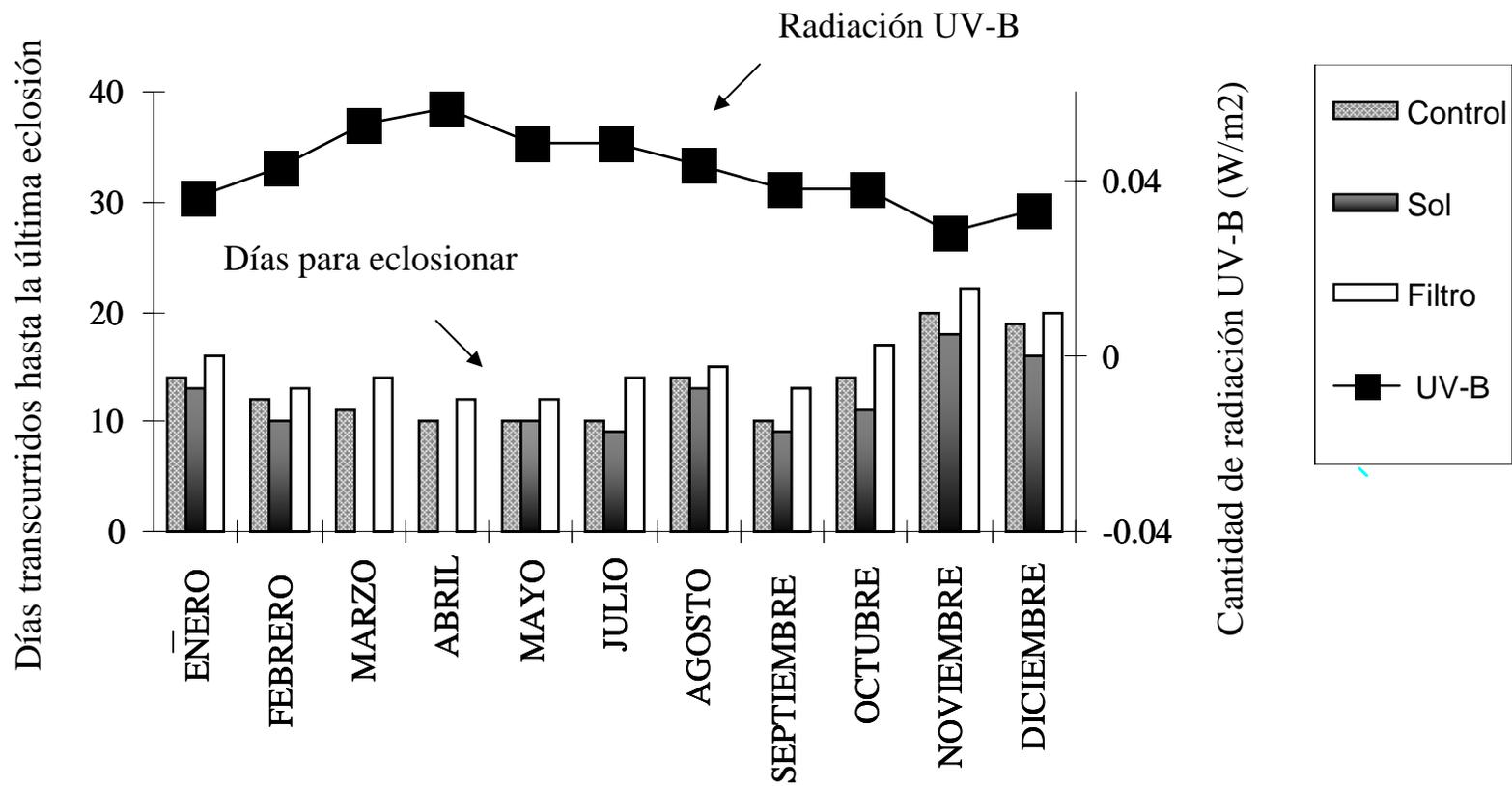


Fig. 25. Relación inversa entre la cantidad de radiación UV-B y los días transcurridos hasta la última eclosión en los organismos sometidos a los tres tratamientos de radiación UV-B

Correlación entre días transcurridos hasta la última eclosión y tamaño de eclosión

Se encontró una correlación positiva entre los días transcurridos hasta la última eclosión y el tamaño de eclosión de los embriones sometidos al tratamiento de Sol ($r = 0.828$, $R^2 = 0.685$, $P < 0.001$; fig. 26, 27).

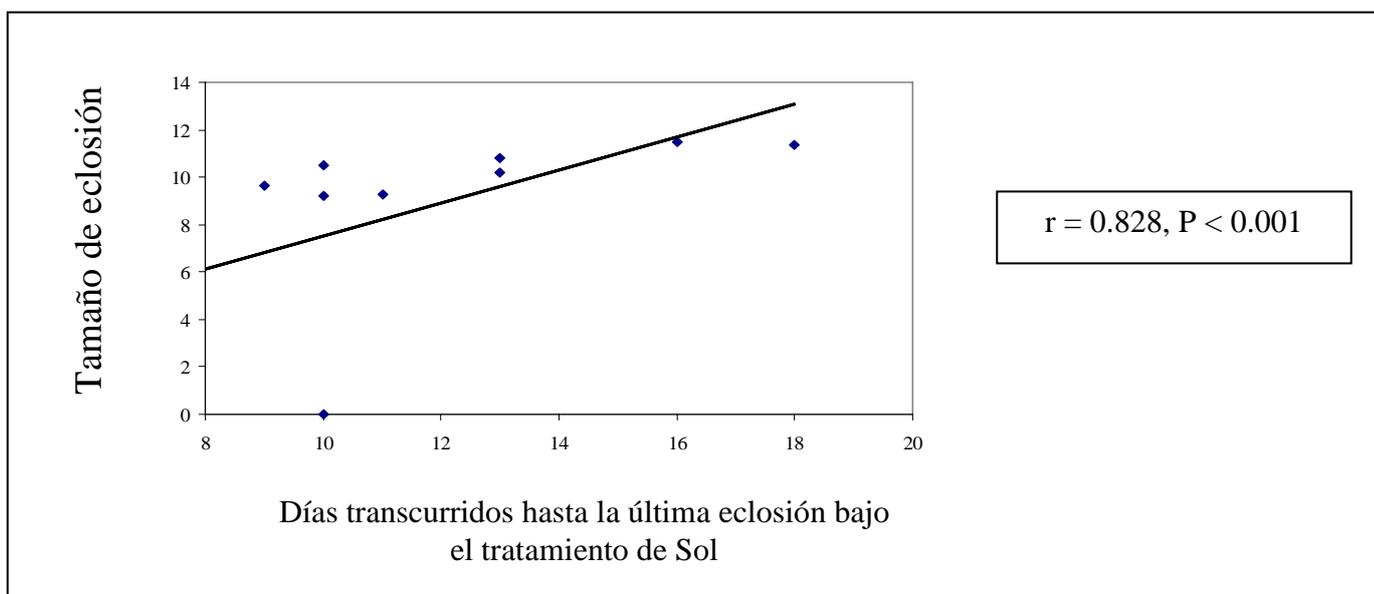


Fig. 26. Correlación entre los días transcurridos hasta la última eclosión y tamaño de eclosión de los embriones expuestos al tratamiento de sol.

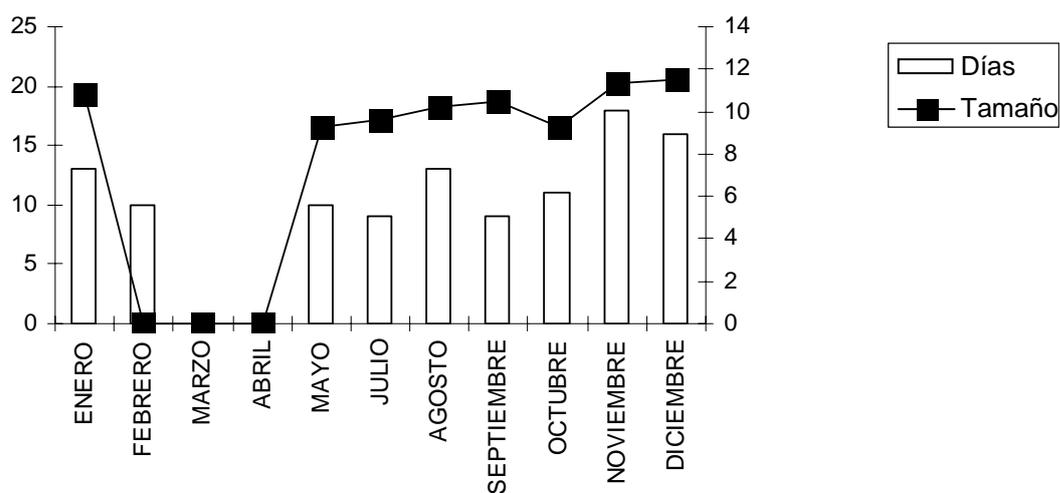


Fig. 27. Relación positiva entre el tamaño de los embriones al eclosionar y los días transcurridos hasta la última eclosión en los organismos sometidos al tratamiento de sol.

Malformaciones

Las malformaciones encontradas en los tres tratamientos durante todos los meses estuvieron presentes en diferentes combinaciones y fueron: múltiples deformaciones corporales (malformaciones presentes al mismo tiempo en muchas estructuras), curvaturas anómalas en la espina, desarrollo incompleto, ampollas, y edemas (Apéndice IV). Las ampollas y edemas fueron las malformaciones con mayor número y frecuencia, aparecieron casi en su totalidad juntas y en todas las partes del cuerpo de los organismos. Con el fin de saber qué malformaciones eran significativamente más numerosas que otras, se dividieron en dos tipos: Tipo I, malformaciones de baja frecuencia <3% que incluyen: múltiples deformaciones corporales, curvaturas anómalas en la espina, desarrollo incompleto; Tipo II malformaciones de alta frecuencia >20% que incluyen: edemas y ampollas.

El número total de huevos viables, el número total de embriones malformados, porcentaje de embriones malformados, número total de embriones con malformaciones del tipo I, porcentaje de embriones malformados del tipo I, número total de embriones con malformaciones tipo II, porcentaje de embriones malformados del tipo II con respecto al número de huevos viables, por cada tratamiento y experimento se pueden observar en la tabla 9.

Las diferencias significativas encontradas entre las malformaciones del tipo I y II se describen en *Diferencias entre tipos de malformaciones por tratamiento*. Las diferencias encontradas entre los embriones con malformaciones del tipo II por mes se describen en *Malformaciones del tipo II por mes*.

Tabla 9. Datos totales por tratamiento y por mes de: número total huevos viables, número total de embriones malformados, número total de embriones con malformaciones del tipo I (múltiples deformaciones corporales, curvaturas anómalas en la espina, desarrollo incompleto), número total de embriones con malformaciones del tipo II (edemas y ampollas), el porcentaje de embriones con malformaciones del tipo II. Porcentaje de embriones con malformación del tipo I y II del número total de huevos viables.

	Número total de huevos viables	Número total de embriones malformados	Porcentaje de embriones malformados del # total de huevos viables (%)	Número total de embriones con malformaciones del tipo I	Porcentaje del número total de huevos viables, con malformaciones de tipo I (%)	Número total de embriones con malformaciones del tipo II	Porcentaje del número total de huevos viables con malformaciones del tipo II (%)	Porcentaje del número total de embriones malformados, con malformaciones de tipo II (%)
ENERO								
Control	296	4	1.35	3	1.01	1	0.33	25
Sol	297	1	0.33	1	0.33	0	---	0
Filtro	298	2	0.67	2	0.6711	0	---	0
FEBRERO								
Control	211	22	10.42	11	5.2	11	5.2	50
Sol	209	99	47.3	8	3.8	91	43.5	91.9
Filtro	198	8	4.04	7	0.196	1	0.5	12.5
MARZO								
Control	158	33	20.88	1	0.63	32	20.2	96.9
Sol	163	97	59.5	2	1.22	95	58.28	97.9
Filtro	170	0	0	0	---	0	---	---
ABRIL								
Control	112	29	25.89	2	1.78	27	24.1	93.1
Sol	110	47	42.72	1	0.90	46	41.8	97.8
Filtro	118	3	2.5	3	2.5	0	---	0

Tabla 9. Continuación.

	Número total de huevos viables	Número total de embriones malformados	Porcentaje de embriones malformados del # total de huevos viables (%)	Número total de embriones con malformaciones del tipo I	Porcentaje del número total de huevos viables, con malformaciones de tipo I (%)	Número total de embriones con malformaciones del tipo II	Porcentaje del número total de huevos viables con malformaciones del tipo II (%)	Porcentaje del número total de embriones malformados, con malformaciones de tipo II (%)
MAYO								
Control	353	7	2.2	1	0.28	5	1.41	71.4
Sol	361	17	4.7	2	0.55	15	4.15	88.23
Filtro	353	9	2.5	7	1.98	2	0.56	22.2
JULIO								
Control	299	10	3.34	10	3.3	0	---	0
Sol	300	14	4.66	10	3.3	4	1.3	40
Filtro	300	5	1.66	5	1.98	0	---	0
AGOSTO								
Control	297	9	3	7	2.3	2	0.67	22.2
Sol	298	14	4.6	1	0.33	13	0.43	92.85
Filtro	297	3	1	2	0.673	1	0.33	33.33
SEPTIEMBRE								
Control	299	7	2.3	1	0.33	6	2.3	75
Sol	300	18	6	1	0.33	17	5.6	100
Filtro	300	1	0.33	0	0	1	0.33	100
OCTUBRE								
Control	201	0	0	0	0	0	---	---
Sol	187	13	6.9	3	1.6	10	5.3	76.9
Filtro	209	0	0	0	0	0	---	---
NOVIEMBRE								
Control	274	19	6.9	2	0.72	17	6.2	89.47
Sol	271	104	38.37	2	0.73	102	37.6	98
Filtro	263	4	1.52	2	0.76	2	0.76	50

Tabla 9. Continuación.

	Número total de huevos viables	Número total de embriones malformados	Porcentaje de embriones malformados del # total de huevos viables (%)	Número total de embriones con malformaciones del tipo I	Porcentaje del número total de huevos viables, con malformaciones de tipo I (%)	Número total de embriones con malformaciones del tipo II	Porcentaje del número total de huevos viables con malformaciones del tipo II (%)	Porcentaje del número total de embriones malformados, con malformaciones de tipo II (%)
DICIEMBRE								
Control	118	10	8.4	5	4.2	5	4.2	50
Sol	112	42	37.5	0	---	42	37.2	100
Filtro	115	17	8.6	7	6.08	10	8.7	58.8
% TOTAL								
Control					1.79		5.7	
Sol					1.19		21.23	
Filtro					1.31		1	

Diferencias entre el tipo de malformaciones por tratamiento

Al analizar el porcentaje de las malformaciones de tipo I y del tipo II mediante un ANOVA de tres vías (factor I = tratamientos, factor II = meses, factor III = tipo de malformación) se encontraron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos (control, sol, filtro. Tratamiento: $F_{1, 270} = 127.382$, $P < 0.0001$). Todos los tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre sí. El tratamiento donde se presentaron mayor número de malformaciones fue sol, seguido por control y al último filtro (Fig. 28) de acuerdo con la prueba post-hoc HSD para muestras desiguales ($P < 0.0001$ en las comparaciones pareadas correspondientes). A partir de este mismo ANOVA de tres vías también se encontraron diferencias significativas entre los meses. Los meses de febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre fueron los que presentaron mayor porcentaje de malformaciones en comparación con los meses restantes ($F_{10, 270} = 29.808$, $P < 0.0001$; Fig. 29). También se detectó una diferencia significativa entre el tipo de malformación I (múltiples malformaciones corporales, curvaturas anómalas en la espina, desarrollo incompleto) y el tipo II (ampollas y edemas). Las malformaciones de tipo II fueron más numerosas que las de tipo I ($F_{1, 270} = 195.451$, $P < 0.0001$; Fig. 30). Se detectó un efecto significativo en la interacción entre tratamientos y meses ($F_{20, 270} = 12.437$, $P < 0.0001$). Los meses de febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre bajo el tratamiento de sol generaron porcentajes significativamente mayores de malformaciones en comparación con los demás meses y tratamientos (Fig. 31). También se detectó un efecto significativo en la interacción entre tratamientos y tipo de malformación ($F_{2, 270} = 140.047$, $P < 0.0001$). La malformación de tipo II bajo el tratamiento de sol fue la más numerosa a comparación con el tipo I y los demás tratamientos (Fig. 32). Asimismo se detectó un efecto significativo en la interacción de meses y tipo de malformación ($F_{10, 270} = 25.752$, $P < 0.0001$). Los meses de febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre

presentaron mayor número de malformaciones de tipo II en comparación con las de tipo I y los otros meses (Fig. 33). También se detectó un efecto significativo en la interacción de tratamiento, meses y tipo de malformación ($F_{20, 270} = 14.199$, $P < 0.0001$; tabla 10). Los meses de febrero marzo abril noviembre y diciembre presentaron mayor número de malformaciones de tipo II bajo el tratamiento de sol. Las malformaciones de tipo I no tuvieron diferencias significativas entre los diferentes meses y tratamientos (Fig. 34).

Tabla 10. Resultados estadísticos totales de la interacción entre cada uno de los factores (I) Tratamiento, (II) Meses, (III) Tipo de malformación (I y II). Grados de libertad (GL), Suma de cuadrados (SC), Cuadrado medio (CM).

Fuente de Variación	GL	SC	CM	F	P
Tratamiento	2	0.613	0.306	127.382	< 0.0001
Mes	10	0.717	0.072	29.808	< 0.0001
Tipo de malformación	1	0.470	0.470	195.450	< 0.0001
Trat. x Mes	20	0.598	0.030	12.437	< 0.0001
Trat. x Tipo	2	0.673	0.337	140.047	< 0.0001
Mes x Tipo	10	0.619	0.062	25.752	< 0.0001
Trat. x Mes x Tipo	20	0.683	0.034	14.199	< 0.0001
Residual	270	0.649	0.002		
Total	336	5.965	2.256		

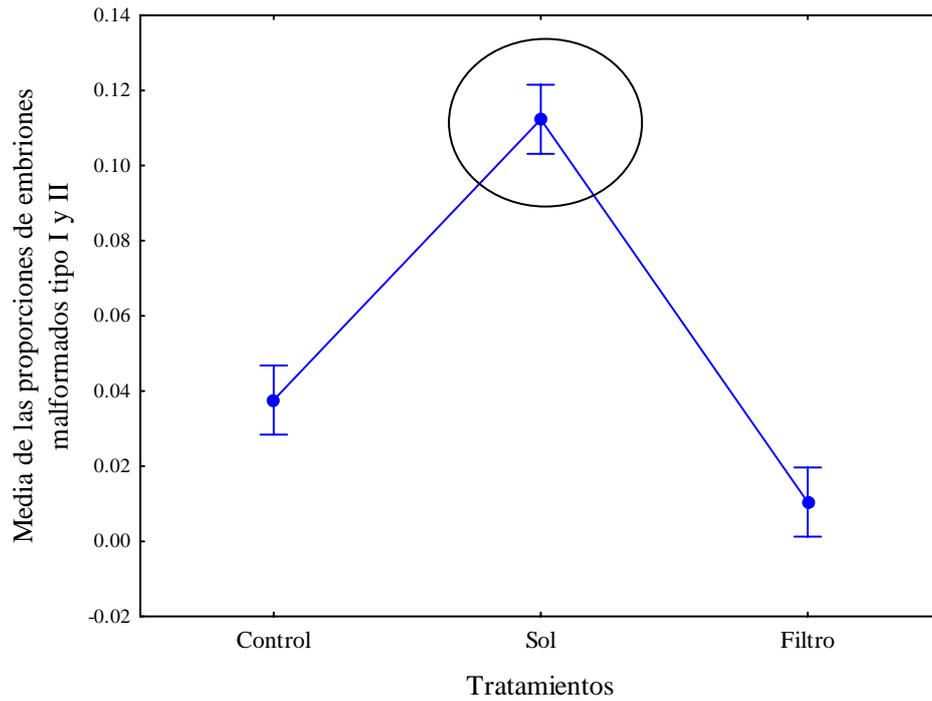


Fig. 28. Media de las proporciones de embriones malformados de tipo I y II bajo los tratamientos

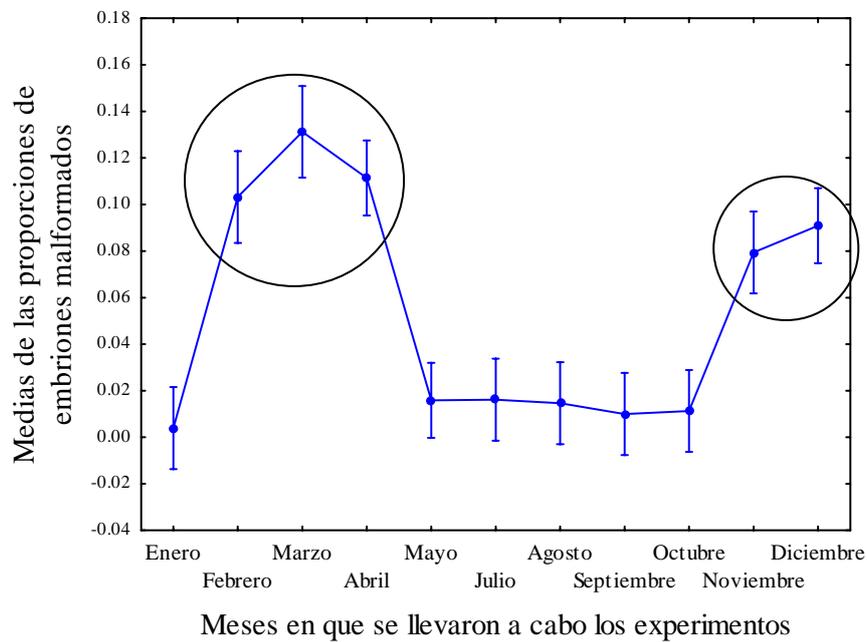


Fig. 29. Media de las proporciones de embriones malformados de tipo I y II durante todos los meses en que se llevaron a cabo los experimentos.

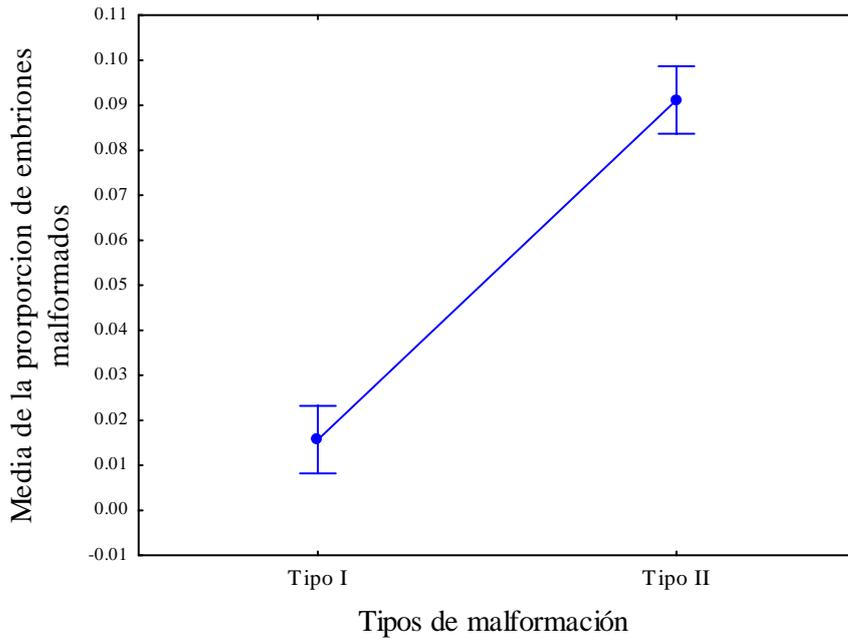


Fig. 30. Media de las proporciones de embriones malformados de tipo I y II en todos los experimentos realizados.

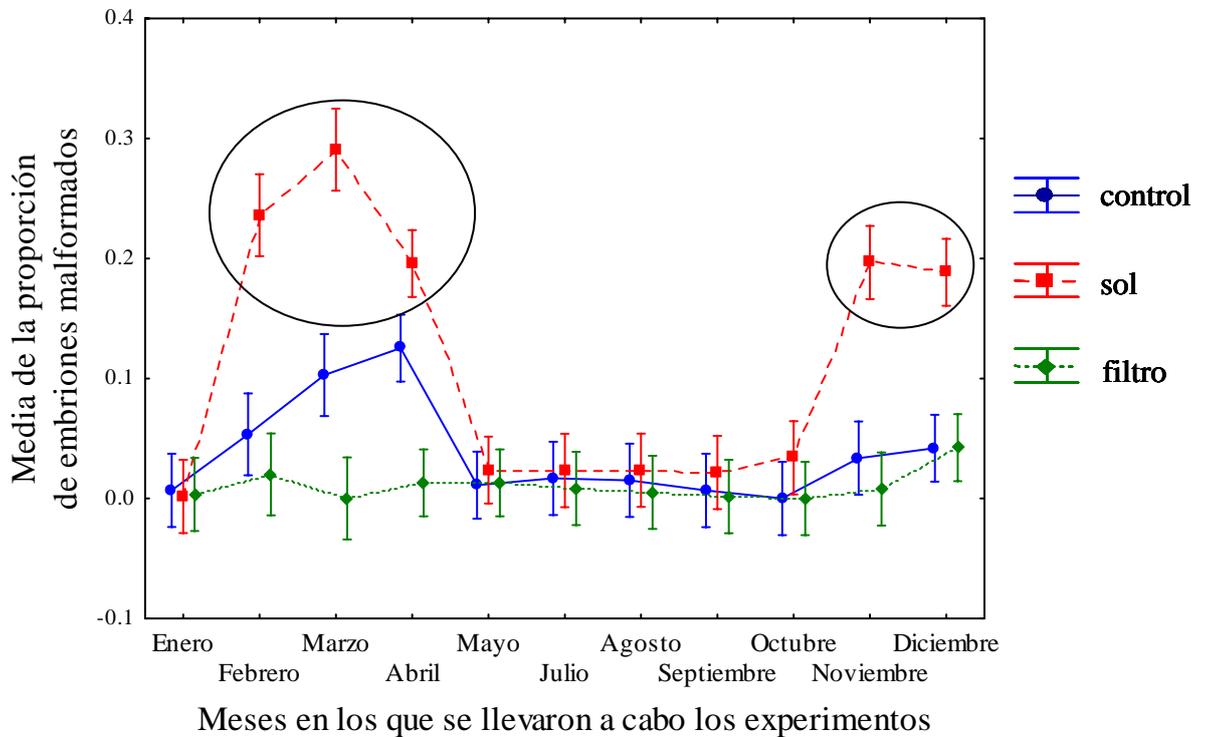


Fig. 31. Media de las proporciones de embriones malformados de tipo I y II en todos los meses en que se realizaron los experimentos.

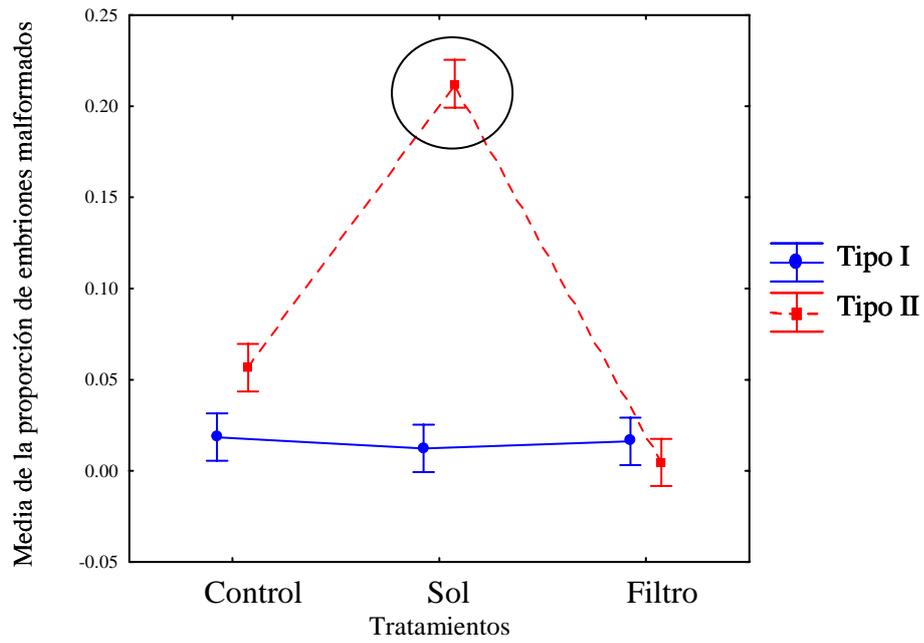


Fig. 32. Media de las proporciones de embriones malformados de tipo I y II por tratamiento.

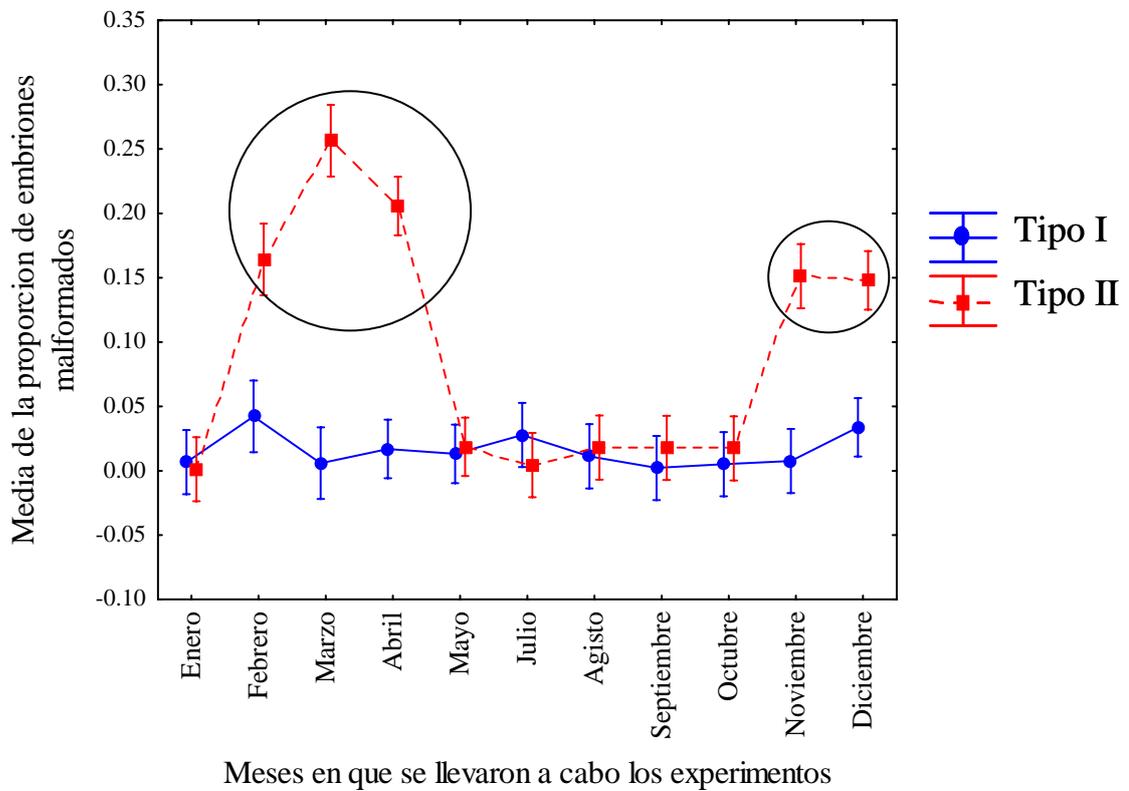


Fig. 33. Media de las proporciones de embriones malformados de tipo I y II en todos los meses en que se llevaron a cabo los experimentos.

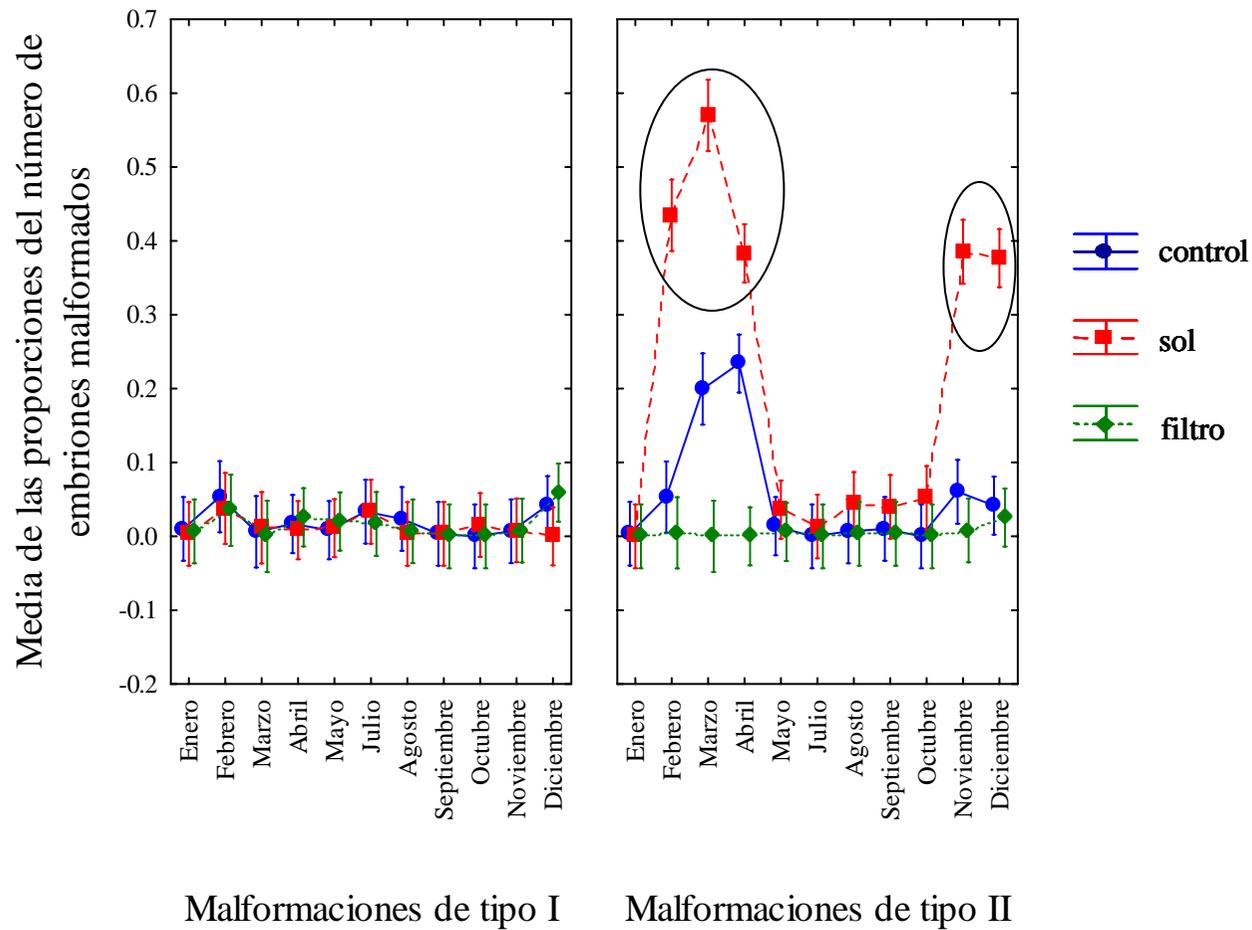


Fig. 34. Media de las proporciones de embriones malformados de tipo I y II en todos los meses en que se llevaron a cabo los experimentos y bajo todos los tratamientos.

Malformaciones de tipo II por mes

Al analizar el porcentaje de malformaciones de tipo II (edemas y ampollas) mediante un ANOVA de dos vías (Factor I = tratamientos, Factor II = meses) se encontraron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos (control, sol y filtro: $F_{2, 135} = 147.495$, $P < 0.001$). Todos los tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre sí. El tratamiento donde hubo mayor número de malformaciones de tipo II fue sol, seguido de control y por último filtro (Medias ajustadas: control = 0.0566, sol = 0.212, filtro = 0.00463; Prueba post-hoc, Student-Newman-Keuls control vs. sol: $P < 0.001$; control vs. filtro: $P < 0.001$; filtro vs. control: $P < 0.001$). A partir de este mismo ANOVA de dos vías también se encontraron diferencias significativas entre los meses. Los meses de febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre fueron los que presentaron mayor porcentaje de malformaciones en comparación con los meses restantes. ($F_{10, 135} = 30.101$, $P < 0.001$; fig. 35). También se encontró un efecto significativo entre la interacción entre tratamiento y mes ($F_{20, 135} = 14.528$, $P < 0.001$ tabla 11). En febrero, marzo y abril bajo el tratamiento de sol se generaron porcentajes mayores de malformaciones tipo II en comparación con los demás meses y tratamientos (Fig. 36). Todos los meses bajo el tratamiento de filtro presentaron escasas malformaciones de tipo II a comparación de los otros dos tratamientos (control y sol; fig. 36).

Tabla 11. Resultados estadísticos totales de la variación de porcentaje de malformaciones de tipo II (edemas y ampollas) para los dos factores (I) Tratamiento, (II) Mes y la interacción entre cada uno. Grados de libertad (GL), Suma de cuadrados (SC), Cuadrado medio (CM).

Fuente de Variación	GL	SC	CM	F	P
Tratamiento	2	1.285	0.643	147.495	<0.001
Mes	10	1.311	0.131	30.101	<0.001
Trat.x Mes	20	1.266	0.0633	14.528	<0.001
Residual	135	0.588	0.00436		
Total	167	4.371	0.0262		

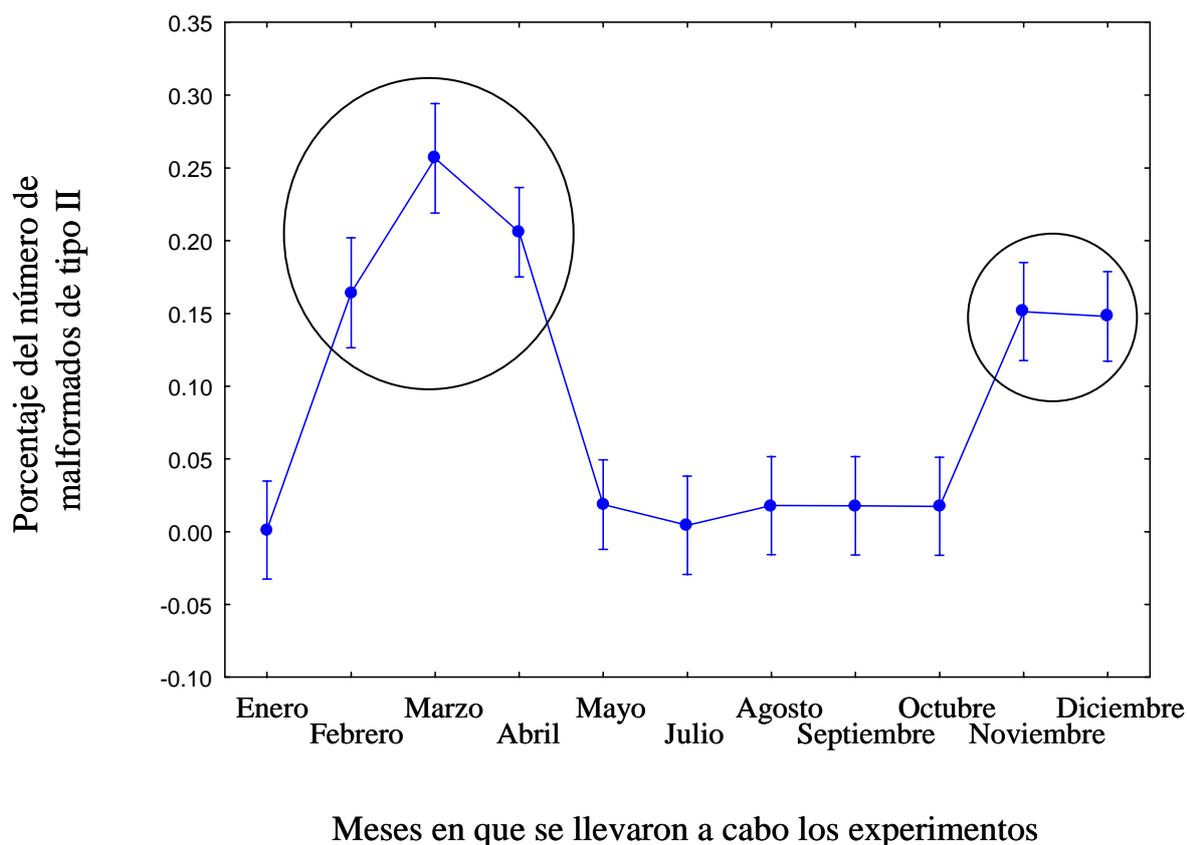


Fig. 35. Media de las proporciones de embriones malformados de tipo II durante todos los meses en que se llevaron a cabo los experimentos.

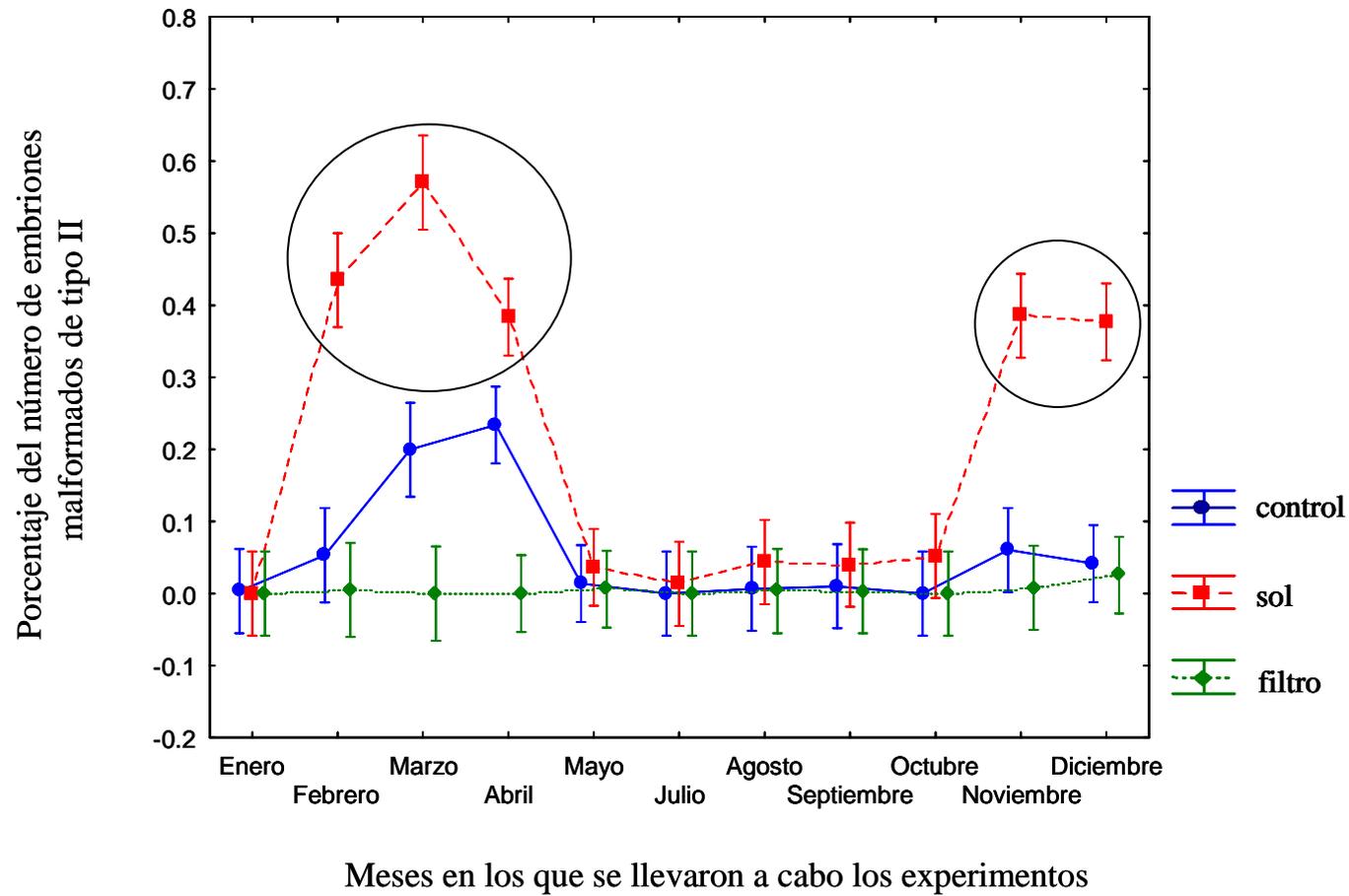


Fig. 36. Porcentaje del número de embriones que presentaron malformaciones de tipo II por tratamiento: control, sol, filtro. En círculos se destacan las combinaciones entre mes y tratamiento cuyas medias son estadísticamente distintas y de interés particular (ver texto).

DISCUSION Y CONCLUSIONES

El interés en el estudio de los anfibios se debe a su valor como indicadores del estrés ambiental (Blaustein, et al. 1994; Blaustein y Wake, 1995) ya que tienen una relación directa con el agua y la tierra, experimentando un contacto continuo con los agentes dañinos de ambos sistemas (Blaustein, et al. 2003). Debido a que los anfibios tienen un rol importante en el flujo de energía y en los ciclos nutrimentales de muchos ecosistemas (Stebbins y Cohen, 1997), los efectos negativos de la radiación UV-B podrían contribuir a posibles transformaciones en la biota y en los patrones alimenticios de los ecosistemas (Stebbins y Cohen, 1997; Blaustein, et al. 2001).

Los resultados obtenidos muestran que la radiación UV-B ambiental de la Ciudad de México afecta adversamente el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum*. Nuestros resultados concuerdan con conclusiones previas referentes al efecto de la radiación UV-B en huevos de urodelos (Blaustein, et al. 1995; Blaustein, et al. 1997; Lesser, et al. 2001). Los embriones de *Ambystoma mexicanum* expuestos al 100% de la radiación UV-B ambiental presentaron: bajo éxito de eclosión, mayor incidencia de malformaciones, menor tamaño y tiempo de eclosión, en comparación con los embriones que fueron protegidos contra la radiación solar en un 99%.

Ambystoma mexicanum se encontraba ampliamente distribuida en el Valle de México y era considerada una especie común (Zambrano, et al. 2007). Hoy en día se considera en peligro crítico y su abundancia ha disminuido dramáticamente (UICN, 2006). En Xochimilco, durante los últimos cinco años la abundancia de la especie se ha reducido en un 60% (Zambrano, et al. 2007). Los factores como la sobreexplotación, deterioro ambiental e introducción de especie exóticas han sido propuestas como las causas próximas a la alarmante reducción de la población (Griffiths y Bride, 2005; amphibia

web, 2007). Sin embargo la radiación UV-B no ha sido considerada como un posible factor de daño a la especie en el hábitat natural.

El deterioro ambiental podría conducir a la especie a colocar puestas en lugares de exposición continua a la radiación UV-B provocando bajos niveles en el éxito de eclosión. Las larvas expuestas a radiación UV-B en su medio natural pueden verse afectadas, al eclosionar a un tamaño y tiempo menor, su supervivencia podría mermarse al no estar lo suficientemente desarrollados y ser capaces de buscar y cazar alimento (el deterioro ambiental observado ocasionan disminución en la disponibilidad y calidad de recursos alimenticios) y ser lo suficientemente rápidos para escapar de depredadores (introducción de especies exóticas). Las malformaciones causadas por la radiación UV-B pueden contribuir directamente a la mortalidad de los embriones o podría afectarlos después de la eclosión (movilidad, alimentación, respuesta inmune).

La radiación UV-B puede actuar sola o en conjunto con otros agentes como los contaminantes para inducir efectos negativos en el desarrollo (Blaustein, et al. 2001). Xochimilco es una localidad altamente contaminada tanto por agentes bióticos como abióticos y en algunas partes del lago los contaminantes químicos son extremadamente altos (CITES, 2005). Posiblemente en el ambiente natural la conjunción de estos factores (radiación UV-B y contaminantes) podría causar o ya estar causando efectos negativos en el desarrollo embrionario incrementando la mortalidad.

Éxito de eclosión

Los huevos de *Ambystoma mexicanum* con una exposición directa y continua de radiación UV-B superior a la cantidad de 0.05 W/m^2 tuvieron el 100% de mortalidad, con 0.042 a 0.048 W/m^2 presentaron el 87% de mortalidad y de 0.027 a 0.037 W/m^2 se observó el 35% de mortalidad (Tabla 3 y 7. Fig. 21). El promedio de todos los experimentos bajo el tratamiento de control (permite el paso del 82% de la radiación UV-B ambiental) los embriones presentaron un 25% de mortalidad y bajo el tratamiento de Filtro (permite el paso del 1% de la radiación UV-B ambiental) se observó un 2% de mortalidad (Tabla 7).

El bajo éxito de eclosión que presentaron los embriones de *Ambystoma mexicanum* al ser expuestos directamente al sol, coincide con los resultados obtenidos en los trabajos realizados con embriones de otras especies de anfibios. Los huevos de salamandras del mismo género como *Ambystoma gracile*, *A. macrodactylum*, *A. maculatum* presentaron altas tasas de mortalidad al ser expuestos a la radiación UV-B (Blaustein, et al. 1995; Blaustein, et al. 1997; Lesser, et al. 2001). Los embriones de anuros de *Bufo boreas*, *Rana arvalis*, *Bufo bufo*, *Crinia signifera*, *Hyla cadaverina*, *Vitoria verreauxii alpina*, *Rana arvalis*, que fueron expuestos a radiación UV-B presentaron también bajo éxito de eclosión (Blaustein, et al. 1994; Häkkinen, et al. 2001; Lizana y Pedraza, 1998; Broomhall, et al. 2000; Anzalone, et al. 1998).

Tiempo y tamaño que alcanzan los embriones al eclosionar

En todos los experimentos donde lograron sobrevivir los embriones sometidos bajo el tratamiento de sol (exposición directa a un 100% de radiación UV-B ambiental) existió una diferencia significativa en el tamaño de eclosión de los embriones en comparación

con los otros tratamientos (Tabla 8; Apéndice III). Este efecto de la radiación UV-B en un tamaño de eclosión más pequeño, también ha sido observado en *Ambystoma maculatum* (Lesser, et al. 2001).

En los meses de febrero marzo y abril bajo el tratamiento de sol los embriones no lograron eclosionar, en este mismo tratamiento durante el mes de mayo los embriones lograron sobrevivir alcanzando el tamaño mínimo de eclosión (9.24 mm), tamaño que se asemeja al mínimo alcanzado en control (9.59 mm) en el mes con mayor radiación UV-B (abril). El tamaño máximo alcanzado en los embriones bajo sol (11.47 mm) fue en los meses con menos radiación UV-B (noviembre y diciembre) y es similar al tamaño mínimo alcanzado en filtro (11.54 mm) en el mes con mayor cantidad de radiación UV-B (abril).

Se tienen evidencias de que algunos embriones de anfibios responden activamente a una amenaza (Gomez-Mestre, et al. 2006). La plasticidad en el tamaño de eclosión constituye un mecanismo de defensa en anfibios (Sih y Moore, 1993; Warkentin, 2000) y puede estar presente si las condiciones del ambiente imponen variables de riesgo en la fase de embrión o en la fase de larva o en ambas (Gomez-Mestre, et al. 2006). Al eclosionar los animales empiezan a moverse, y podrían cambiar de hábitat, de depredadores y ganar suministro de comida (Warkentin, 1995). La temprana eclosión observada en los embriones sometidos al tratamiento de sol, nos sugiere que la radiación UV-B es probablemente un factor de riesgo, los embriones que logran eclosionar lo realizan a menor tamaño y tiempo.

Duellman y Trueb, (1994) explican que en anfibios existen dos mecanismos básicos asociados con la eclosión, el primero es un mecanismo físico de corte, solo conocido para el genero *Eleutherodactylus* y el segundo y más común es un mecanismo químico, el cual consiste en la producción de enzimas capaces de digerir la gelatina en la que se encuentran los embriones. Probablemente existan varios tipos de enzimas y el tiempo de su producción posiblemente va a estar determinado por la especie (Duellman y Trueb, 1994). Posiblemente la radiación UV-B actuó en la fisiología de los embriones lo que podría ocasionar cambios en el mecanismo de eclosión y producir una respuesta temprana a la eclosión.

La exposición continua de los embriones a cantidades altas de radiación UV-B (0.05 W/m^2) provocó la muerte en los embriones antes de que estos fueran capaces de eclosionar, aquellos embriones que fueron sometidos a dosis no letales ($0.048 - 0.027 \text{ W/m}^2$) eclosionaron a un menor tiempo y talla, posiblemente ocasionando la capacidad temprana de movimiento, para la búsqueda de un nuevo hábitat. En nuestro estudio los embriones no fueron capaces de encontrar refugio de la radiación UV-B debido al diseño experimental.

La plasticidad en la eclosión ha sido colocada en un contexto de defensa anti-depredador, pero probablemente también sucede como respuesta a la heterogeneidad ambiental de otros factores (Gomez-Mestre, et al. 2006). Por ejemplo se ha observado la inducción a una eclosión temprana en *Ambystoma maculatum*, *Rana sylvatica* y *Bufo americanus*, por mohos acuáticos patógenos (Saprolegniaceae), el efecto de la radiación UV-B en un tamaño de eclosión más pequeño, también ha sido observado en

Ambystoma maculatum (Lesser, et al. 2001), nuestros resultados indican que un factor que induce a una temprana eclosión podría ser la radiación UV-B.

En los embriones sometidos al tratamiento de control y filtro existe una correlación negativa significativa entre la cantidad de radiación UV-B y el tamaño del embrión al eclosionar así como con el tiempo de eclosión. Una mínima o casi escasa cantidad de radiación UV-B (18 % acetato de celulosa, 1% filtro), en los embriones de *Ambystoma mexicanum* posiblemente afecte el tamaño y tiempo de eclosión.

Malformaciones

En todos los experimentos y tratamientos, se encontraron varios tipos de malformaciones presentes en diferentes combinaciones en los huevos viables de *Ambystoma mexicanum*. Los embriones que presentaron las malformaciones observadas en una frecuencia <3% (múltiples deformaciones corporales, curvaturas anómalas en la espina y cola, desarrollo incompleto) lograron eclosionar, y su tiempo de vida fue muy breve, mientras que los embriones que presentaron las malformaciones observadas en una frecuencia >21% (ampollas y edemas) no lograron completar su desarrollo embrionario, tuvieron una eclosión temprana y posteriormente murieron, ó murieron dentro del huevo.

Los embriones sometidos al tratamiento de sol presentaron mayor número de organismos malformados con edemas y ampollas y fue significativamente mayor el número de organismos que presentaron este tipo de malformación a diferencia de los de filtro (Tabla 9). No existió una correlación significativa entre la cantidad de radiación UV-B y el número de embriones malformados, este resultado probablemente esté

relacionado a que dosis altas de radiación UV-B matan rápidamente a los embriones (Tabla 3, 7) y no dejan alternativa a una inducción de malformaciones.

Las frecuencias de malformaciones esperadas en las poblaciones naturales de anfibios es del 0 al 3% (Gillillan, et al. 2001), frecuencia encontrada en las malformaciones de tipo I en los tres tratamientos. Posiblemente las malformaciones múltiples corporales, curvaturas anómalas en la espina y cola, y desarrollo incompleto, sean las malformaciones comúnmente encontradas durante el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum*, debido a que no observamos diferencias significativas entre este tipo de malformaciones y los tratamientos, mientras que las malformaciones que estén relacionadas con la radiación UV-B sean: edemas y ampollas, debido a que encontramos una diferencia significativa entre los tratamientos y tipo de malformaciones (Fig. 34).

Los resultados obtenidos concuerdan con los datos observados en otras investigaciones: en *Ambystoma macrodactylum* se encontró que los niveles ambientales de radiación UV-B afectan el desarrollo embrionario e inducen deformaciones tales como: flexión lateral de la cola, ampollas y edemas (Blaustein, et al. 1997). En los embriones de *Hyla chrysoscelis* y *Pseudacris triseriata* los niveles ambientales de radiación UV-B produjeron edemas, ampollas, curvatura en cola y espina (Starnes, et al. 2000). En *Pleuroderma bufoninum* los niveles ambientales de radiación UV-B ocasionaron curvaturas en la cola, nado errático, especialmente edemas y un aumento en la concentración de melanina (Perotti, y Diéguez. 2006).

Si observamos los resultados de este estudio, en todos los tratamientos, la curvatura de cola y espina se encuentra dentro del 1% de las malformaciones encontradas en los embriones de *Ambystoma mexicanum* y difiere significativamente en número con las malformaciones de tipo edemas y ampollas. Los trabajos realizados no muestran frecuencias en los tipos de malformaciones encontradas, no podemos asegurar que este tipo de malformación no sea inducida por la radiación UV-B, probablemente si lo haga, pero a frecuencias muy pequeñas, pero tampoco podemos asegurar que probablemente no sea una malformación que se presente de forma habitual en todos los embriones de los organismos estudiados.

Comparación entre meses

Los meses de febrero, marzo y abril fueron los más perjudiciales para el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum*, meses que se encuentran dentro de la temporada reproductiva propuesta para el ajolote (Fox, 1984). Esto indica que la temporada natural de oviposición de la especie es la época más perjudicial para la exposición de los huevos a la radiación UV-B. Los datos obtenidos indican que posiblemente no solo la cantidad de radiación UV-B directa afecte el éxito de eclosión, sino también la época en la que fueron expuestos a ésta.

El servicio meteorológico nacional (SMN, 2008) emite información sobre las condiciones atmosféricas del país y muestra la precipitación media mensual y la temperatura media máxima mensual del 2006 para el Distrito Federal, enero (2.2 mm, 21.8° C), febrero (1.2 mm, 24.1° C), marzo (11.8 mm, 26.2° C), abril (27.6 mm, 27.5° C), mayo (75.7 mm, 25.4°C), julio (168 mm, 23.8° C), agosto (215 mm, 23.6°C), septiembre (153.6 mm, 24° C), octubre (77.4 mm, 23.5° C), noviembre (38.7 mm, 21.1°

C) diciembre (4.3mm, 21°C). Los meses que presentaron mayores efectos negativos en el desarrollo embrionario de *Ambystoma mexicanum* son meses secos y calidos (febrero, marzo, abril) que van de una precipitación de 1.2 mm a 38.7 mm y que van de una temperatura de 24° C a 27.5° C. Posiblemente existan múltiples interacciones que puedan producir los efectos negativos en los embriones de *Ambystoma mexicanum* como la intensidad de la radiación, temperatura ambiental y precipitación.

Ciudad de México y Republica Mexicana

Los resultados mostraron que los embriones de *Ambystoma mexicanum*, presentaron efectos adversos a la radiación UV-B ambiental de la ciudad de México. Posiblemente otras especies de anfibios que habiten la ciudad de México podrían ser afectados en su estadio embrionario y/o en posteriores estadios. Frías- Álvarez (2005) encontró en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel localizada en la Ciudad de México, metamórficos de *Rana montezumae* con malformaciones consistentes en extremidades supernumerarias y anomalías en los ojos, esta última relacionada con la exposición a la radiación UV-B (Ankley et al. 2000).

Medidas de la cantidad de radiación UV-B, realizadas simultáneamente en la Ciudad de México y suburbios demostraron que gracias a la contaminación atmosférica existente en la ciudad se presenta una atenuación significativa en la intensidad relativa de radiación UV-B a comparación de la radiación recibida en los suburbios (Acosta y Evans, 2000). La atmósfera urbana de la Ciudad de México, podría ser considerada como un escudo protector contra la exposición extrema de la radiación solar (Acosta y Evans, 2000). Posiblemente los embriones de anfibios expuestos a una atmósfera poco contaminada (suburbios de las ciudades y áreas naturales) podrían presentar efectos

negativos similares o mayores a la radiación UV-B que los observados en los embriones de *Ambystoma mexicanum*.

Campo y laboratorio

Las complicaciones de realizar experimentos en campo con nuestra especie, se deben, al comportamiento altamente oscilatorio de *Ambystoma mexicanum* en su hábitat natural. En un año los organismos presentan eventos masivos de reproducción y al siguiente no son capaces de reproducirse (Zambrano, et al. 2007), lo que resulta en una difícil localización de los huevos en el hábitat natural.

La comparación entre las dosis de radiación UV-B que reciben los animales en campo y laboratorio es problemático (Ankley, et al. 2000). Los ajolotes en su hábitat natural necesitan plantas o estructuras para depositar los huevos, probablemente para protección y disponibilidad de alimento (Marin-Martinez, 2007). Las condiciones de nuestro diseño experimental no tenían los soportes naturales de oviposición y no permitían escapar a los embriones de la exposición continua del sol, asimismo no se tenía las características físico-químicas ambientales del agua al que están expuestos los organismos en su hábitat natural.

Recomendamos realizar investigaciones donde se manipule el comportamiento de la especie y las variaciones del hábitat, en laboratorio. Por ejemplo, colocar parejas de ajolotes en edad reproductiva en contenedores de dimensiones más grandes y cubiertos por vegetación y estructuras preferenciales para la oviposición, cubrir algunos contenedores con filtros y dejar otros en exposición directa a la radiación solar.

Defensas de anfibios contra la radiación

La enzima fotoliasa puede remover fotoproductos inducidos por la luz ultravioleta, que tienen efectos citotóxicos y mutagénicos (Blaustein, et al. 1994; Blaustein, et al. 1995; Blaustein, et al. 2001). Se ha sugerido que poseer una gran cantidad de enzima fotoliasa, hace a algunas especies de anfibios más resistentes a la radiación solar que otras (Blaustein, et al. 2001). La cantidad de fotoliasa en los huevos de anfibios está positivamente correlacionada con la supervivencia de los huevos en campo (Blaustein, et al. 2001). Por ejemplo, los huevos de especies de anfibios que son más resistentes a la radiación UV-B tienen mayor actividad de la fotoliasa (p. e. *Hyla regilla*, 7.5-fotoliasa 10^{11} ; *Rana aurora* 6.1-fotoliasa 10^{11}) que aquellas especies más susceptibles (p. e. *Ambystoma gracile*, 1.0-fotoliasa 10^{11} ; *A. macrodactylum*, 0.8-fotoliasa 10^{11} ; Blaustein, et al. 2001).

La cobertura gelatinosa y la pigmentación de los huevos son mecanismos que contrarrestan los efectos dañinos de la radiación UV-B (Blaustein, et al. 2001). Los huevos de los anfibios están rodeados por una o más capsulas gelatinosas frecuentemente transparentes (Stebbins y Cohen, 1995). La envoltura gelatinosa provee soporte a los huevos contra daños, y en ambientes rodeados de luz puede ayudar contra la radiación UV-B (Stebbins y Cohen, 1997). Se ha observado que la envoltura gelatinosa de muchas especies de anfibios parece absorber longitudes de onda en el rango de UV-B (280 a 320 nm; Blaustein, et al. 2001; Licht, et al. 2003).

Se ha mostrado que la envoltura gelatinosa de los huevos de *Ambystoma gracile* y *A. maculatum*, presentan una absorbancia del 99% (Licht, 2003). No se han realizado estudios sobre la acción de la cubierta gelatinosa de los huevos de *Ambystoma*

mexicanum contra la radiación UV-B. Licht, (2003) menciona un ejemplo de investigación aplicable a nuestra especie; primero agrupar las características de tamaño y forma de la masa de los huevos y de la cubierta gelatinosa, observar el tipo de sitio y profundidad en la que se depositaron los huevos y tiempo que tardan en eclosionar los embriones en condiciones naturales, posteriormente realizar medidas espectrales de la cubierta gelatinosa y por ultimo bajo condiciones de laboratorio exponer embriones sin cubierta gelatinosa a radiación UV-B.

Los huevos de los anfibios tienen un rango de color que va del crema a negro (Licht, 2003), el color oscuro en los huevos está suministrado por un pigmento llamado melanina (Duellman y Trueb, 1994; Licht, 2003). Se sugiere que la exposición a la luz del sol desencadena una fotoprotección en el cual la melanina puede funcionar como defensa a la radiación UV-B (Duellman y Trueb, 1994; Perotti y Diéguez, 2006). Se ha observado que niveles altos y continuos de irradiación pudieron haber favorecido la pigmentación de *Pleurodema bufoninum* y *Bufo spinulosus*. En *Pleurodema bufoninum* se observó mayor cantidad de melanina en sus embriones expuestos continuamente a la radiación solar que en las larvas capaces de escapar de la radiación (Perotti y Diéguez, 2006).

Radiación UV-B y enfermedades infecciosas.

Las enfermedades infecciosas como saprolegniosis y quitridiomycosis pueden impactar negativamente las poblaciones de anfibios (Daszak, et al. 2003; Berguer, et al. 1998). Las posibles interacciones entre la radiación UV-B y agentes infecciosos podrían ocasionar efectos adversos contra los anfibios. Experimentos en campo han demostrado un efecto sinérgico entre la radiación UV-B y el oomicete patógeno *Saprolegnia ferax*

(causante de saprolegniosis), la conjunción de estos factores incrementa la mortalidad de embriones de anfibios, en comparación al efecto que ocasiona cada uno por separado (Kiesecker y Blaustein, 1995; Kiesecker, et al. 2001). *Saprolegnia ferax* no es el único patógeno que se ha visto implicado en la disminución poblacional de anfibios, el hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* (B.d.) causante de la enfermedad conocida como quitridiomicosis está implicado en el declive global de anfibios en áreas protegidas y perturbadas en todo el mundo (Berger, et al. 1998; Daszak, et al. 1999). García, et al. (2006) no observaron una relación sinérgica entre B.d. y la radiación UV-B en tres anfibios (*Bufo boreas*, *Hyla regilla*, *Rana cascadae*), sin embargo mencionan que se deben realizar experimentos más duraderos para poder observar una interacción sinérgica significativa entre el patógeno y la radiación UV-B, ya que la diferencia en la vulnerabilidad ante el patógeno y la radiación UV-B depende de la especie y del estadio de vida. Asimismo es necesario realizar estudios de cuantificación conjunta de B.d. y radiación UV-B.

Frías-Álvarez, et al. (en prensa) mencionan que la búsqueda de B.d. en dos organismos silvestres de *Ambystoma mexicanum* fue infructuosa, sin embargo encontraron que una colonia en cautiverio presentó el 85% de sus individuos infectados por B.d. Es de suma importancia no realizar una posible reintroducción de los individuos de estas colonias a su hábitat original. No sabemos la respuesta de la especie ante los dos factores perjudiciales, sin embargo el efecto dañino de la radiación UV-B a *Ambystoma mexicanum* podría hacerla más vulnerable a adquirir enfermedades infecciosas.

Ambystoma mexicanum como modelo de estudio

En su hábitat natural los estadios tempranos de huevos y larvas en *Ambystoma mexicanum* son los más vulnerables (Zambrano, et al. 2007). Los resultados obtenidos, indican que la radiación UV-B ambiental afecta negativamente a los embriones y podría afectar estadios posteriores, siendo posiblemente un factor que afecte a la especie en su medio. En organismos silvestres de *Ambystoma mexicanum* se han registrado malformaciones en los miembros de tipo ectrodactilia (Parra- Olea, et al. datos no publicados), malformación relacionada con la radiación UV-B (Ankley, et al. 2000).

El efecto de la radiación UV-B posiblemente afecte a la especie a lo largo de su ciclo de vida y actúe de forma sinérgica con otros factores como patógenos y contaminantes químicos, que podrían estar causando daños letales y / o sub-letales en la especie. Los datos obtenidos en este trabajo, muestran el efecto de la radiación UV-B en una especie mexicana. *Ambystoma mexicanum* puede ser considerada como una especie modelo para seguir realizando investigaciones sobre el tema y poder hacer inferencias para otras especies mexicanas.

Plan de manejo.

Ambystoma mexicanum es una especie altamente estudiada en laboratorio lo que ha dado como resultado colonias en cautiverio exitosas (Armstrong y Malacinski, 1989). En los últimos años en su hábitat natural la población ha disminuido en un 60%; los estadios de huevo y larvas son los más vulnerables, a causa de la depredación de huevos por especies exóticas (carpas y tilapias) y por la carencia de alimento disponible como zooplancton para las larvas (Zambrano, et al. 2007). Asimismo estos estadios se ven seriamente afectados por la radiación UV-B. Para realizar un plan de manejo in situ se

propone aislar zonas en los canales para realizar crianza del ajolote, estas zonas deben estar libres de especies exóticas y presentar niveles bajos de contaminantes. Los huevos podrían ser colocados en contenedores de plástico con flujo constante de agua del medio y a su vez estos deben ser cubiertos por filtros especiales contra la radiación UV-B (por ejemplo Filtro LLUMAR). Al evitar los agentes dañinos como la radiación UV-B, especies exóticas (tilapia y carpa) y contaminantes en los estadios de desarrollo más vulnerables, se podría ayudar al aumento de la densidad del ajolote.

Es urgente implementar acciones de conservación y manejo de *Ambystoma mexicanum* in situ ya que se ha propuesto que una pequeña disminución en los rangos de supervivencia en huevos y larvas incrementaría la posibilidad de extinción de la especie en un 100% en 20 años (Zambrano, et al. 2007). Si *Ambystoma mexicanum* continúa bajo las condiciones ambientales a las que actualmente se está enfrentando posiblemente en algunos años esta especie sea encontrada y conocida solo bajo condiciones de cautiverio.

BIBLIOGRAFIA

Acosta, L.R., y W.F.J. Evans (2000) Design of the Mexico City UV monitoring network: UV-B measurements at ground level in the urban environment. 105: 5017-5026.

AmphibiaWeb: Information on amphibian biology and conservation. [Base de datos en línea]. (2007) Berkeley, California: AmphibiaWeb: <http://amphibiaweb.org/>. [acceso: 22 enero, 2007].

Ankley, G.T., J.E. Tietge, G.W. Holcombe, D.L. DeFoe, S.A. Diamond, K.M. Jensen, y S.J. Degitz (2000) Effects of laboratory ultraviolet radiation and natural sunlight on survival and development of *Rana pipiens*. Can. J. Zool. 78: 1092-1100.

Anzalone, C.R., L.B. Kats, y M.S. Gordon (1998) Effects of Solar UV-B radiation on embryonic development in *Hyla cadaverina*, *Hyla regilla* and *Taricha torosa*. Conservation Biology. 12: 646-653.

Armstrong, J.B., y G. M. Malacinski (1989) Developmental biology of the axolotl. New York: Oxford University. pp 320.

Belden, L.K., y A.R. Blaustein (2002) Exposure of red-legged frog embryos to ambient UV-B radiation in the field negatively affects larval growth and development. Oecologia. 130: 551-554.

Belden, L.K., E.L. Wildy, y A. R. Blaustein (2000) Growth, survival, and behavior of larval long-toed salamanders (*Ambystoma macrodactylum*) exposed to ambient levels of UV-B radiation. Journal of Zoology London. 251: 473-479.

Berger, L., R. Speare, P. Daszak, D.E. Green, A.A. Cunningham, L. Goggin, R. R. Slocombe, M.A. Ragan, A.D. Hyatt, K.R. McDonald, H.B. Hines, K.R. Lips, G. Marantelli, y H. Parkes (1998) Chytridiomycosis causes amphibian mortality associated with population declines in the rain forests of Australia and Central America. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 95, 9031-9036.

Blaustein, A.R. y D. B. Wake (1995) The puzzle of declining amphibian populations. Scientific american. 272: 52-57.

Blaustein, A.R. y J.M. Kiesecker (2002) Complexity in conservation: lessons from the global decline of amphibian populations. Ecology Letters. 5: 597-608.

Blaustein, A.R., B. Edmond, y J.M. Kiesecker (1995) Ambient ultraviolet radiation causes mortality in salamander eggs. Ecological Applications. 5: 740-743.

Blaustein, A.R., J.M. Romansic, y J.M. Kiesecker (2003) Ultraviolet radiation, toxic chemicals and amphibian population declines. Diversity and Distributions. 9: 123-140.

Blaustein, A.R., J. M. Kiesecker, D.P. Chivers, y R.G. Anthony (1997) Ambient UV-B radiation causes deformities in amphibian embryos. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 94: 13735-13737.

Blaustein, A.R., P.D. Hoffman, D.G. Hokit, J.M. Kiesecker, S.C. Walls, y J.B. Hays (1994) UV repair and resistance to Solar UV-B in amphibian eggs: a link to population declines?. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 91: 1791-1795.

Blaustein, A. R., J.M. Kiesecker, D.P. Chivers, D.G. Hokit, A. Marco, L.K. Belden y A. Hatch (1998) Effects of ultraviolet radiation on amphibians: field experiments. *American Zoologist.* 38: 799-812.

Blaustein, A. R., L.K. Belden, A.C. Hatch, L.B. Kats, P.D. Hoffman, J.B. Hays, A. Marco, P. Douglas, y J. M. Kiesecker (2001) Ultraviolet radiation and amphibians. *en* Spriger (eds.). *Ecosystems, evolution, and ultraviolet radiation*, pp. 73-79. Cockell C.S. y A. R. Blaustein, editores.

Broomhall, S.D., W.S. Osborne, y R.B. Cunningham (2000) Comparative effects of ambient ultraviolet-B radiation on two sympatric species of Australian frogs. *Conservation Biology.* 14: 420-427.

Bryant, E. (1997) *Climatic process and change.* Cambridge University Press. 209. pp.

Collins, J. P., y A. Storfer (2003) Global amphibian declines: sorting the hypotheses. *Diversity and Distributions.* 9: 89-98.

Corn, P.S. (1998). Effects of ultraviolet radiation on boreal toads in Colorado. *Ecological Applications.* 8: 18-26.

Daszak, P., A.A. Cunningham, y A.D. Hyatt. (2003) Infectious disease and amphibian population declines. *Diversity and Distributions,* 9,141-150.

Daszak, P., L. Berger, A.A. Cunningham, A.D. Hyatt, D.E. Green, y R. Speare (1999) Emerging infectious diseases and amphibian population declines. *Emerging Infectious Diseases,* 5, 735-748.

Duellman, W.E. y L. Trueb (1994) *Biology of Amphibians.* The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London. 670 pp.

Duhon, S.T. (1997) The Axolotl and its native habitat-Yesterday and Today. *Axolotl Newsletter, Indiana University. Indiana.* 26: 14.17.

Fite, K.V., A.R. Blaustein, L. Bengstone, y H.E. Hewitt (1998) Evidence of retinal light damage in *Rana cascadae*: a declining amphibian species. *Copeia.* 4 :906-914.

Flores-Villela, O., y P. Gerez (1994) Biodiversidad y conservación en México, vertebrados, vegetación y uso del suelo. Comisión Nacional para el conocimiento de la biodiversidad & Universidad Nacional Autónoma de México. 439 pp.

Flores-Villela, O., y L. Canseco-Márquez (2004) Nuevas especies y cambios taxonómicos para la herpetofauna de México. *Acta Zoológica Mexicana.* 20: 115-144.

Fox, W.F. (1984) Factors influencing Axolotl spawnings at developmental biology center, University of California, Irvine, CA. *Axolotl Newsletter.* 13:26-27.

Frías-Álvarez, P. (2005) *Rana montezumae* en el Jardín Botánico de la UNAM. Estudios fenológicos y detección de enfermedades y malformaciones. Tesis de licenciatura. Facultad de ciencias, UNAM. 70 pp.

Frías-Alvarez, P., V. T. Vredenburg, M. Familiar-López, J. E. Longcore, E. González-Bernal, G. Santos-Barrera, L. Zambrano, G. Parra-Olea (2008) Chytridiomycosis survey in wild and captive Mexican amphibians. *Ecohealth* en prensa.

Frost, D.R. (2007) Amphibian Species of the world: an online reference. Version 5.0 (1/febrero/2007). Base electrónica de datos, accesibles en: <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.php>. American Museum of Natural History, New York, USA.

Gaceta Oficial del Distrito Federal (GODF) (2006) Acuerdo por el que se aprueba el programa de manejo del área natural protegida con carácter de zona de conservación ecológica “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”. [datos disponibles en línea] <http://ajolote.ibiologia.unam.mx/plan.pdf> [acceso enero 2007].

García, T.S., J. M. Romansic, y A. R. Blaustein (2006) Survival of three species of anuran metamorphs exposed to UV-B radiation and the pathogenic fungus *Batrachochytrium dendrobatidis*. *Diseases of Aquatic Organisms*. 72: 163–169

Geofísica, Instituto de Geofísica, UNAM (Geofísica) (2007) [datos disponible en línea] <http://www.geofisica.unam.mx/>. [acceso 2007]

Gilliland, C. D., C. L. Summer, M. G. Gilliland, K. Kannan, D. L. Villeneuve, K. K. Coady, P. Muzzall, C. Mehne, y J. P. Giesy (2001) Organochlorine insecticides, polychlorinated biphenyls, and metals in water, sediment and green frogs from southwestern Michigan. *Chemosphere*. 44: 327-339.

Gomez-Mestre, I., J.C. Touchon, y K.M. Warkentin (2006) Amphibian embryo and parental defenses and larval predator reduce egg mortality from water mold. *Ecology*. 87:2570-2581.

Griffiths, R.A., y I. G. Bride (2005) Action for the axolotl at Lake Xochimilco, Mexico. *Froglog*. 67: 1-2.

Häkkinen, J., S. Pasanen, y J.V.K. Kukkonen (2001). The effects of Solar UV-B radiation on embryonic mortality and development in three boreal anurans (*Rana temporaria*, *Rana arvalis* y *Bufo bufo*). *Chemosphere*. 44: 441-443.

Houlahan, J. E., C. S. Findlay, B. R. Schmidt, A. H. Meyer, y S. L. Kuzmin (2000) Quantitative evidence for global amphibian population declines. *Nature*. 404: 752-755.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática (INEGI) (2007). [datos disponibles en línea] http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/df/agr_veget.cfm?c=456&e=09&CFID=1385144&CFTOKEN=48197981 [acceso enero 2007].

Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática (INEGI) (2007b). [datos disponibles en línea] <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/df/regcuencas2.cfm?c=455&e=09&CFID=1385144&CFTOKEN=48197981> [acceso enero 2007].

Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática (INEGI) (2007c). [datos disponibles en línea] <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/df/fisio.cfm> [acceso enero, 2007].

Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática (INEGI) (2007d). [datos disponibles en línea] <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/df/rh.cfm?c=444&e=30> [acceso julio, 2007].

IUCN, International C, Nature Serve. (2006) Global Amphibian Assessment [base de datos disponibles en línea] <http://www.globalamphibians.org> [acceso 20 junio, 2006].

Kiesecker J.M. y A.R. Blaustein. (1995) Synergism between UV-B radiation and a pathogen magnifies amphibian embryo mortality in nature. *Proceedings of the National Academy of Science USA*. 92, 11049-11052.

Kiesecker J.M., A.R. Blaustein, y L.K. Belden (2001) Complex causes of amphibian population declines. *Nature*, 410, 681-683.

Langhelle, A., M.J. Lindell, y P. Nyström (1999) Effects of ultraviolet Radiation on Amphibian Embryonic and larval development. *Journal of Herpetology*. 33: 449-456.

Laurance, W.F. (1996) Catastrophic declines of Australian rainforest frogs is unusual weather responsible? *Biological Conservation*. 77: 203-212.

Lesser, M. P., S. L. Turtle, J.H. Farrell, C. W. Walker (2001) Exposure to ultraviolet radiation (290-400nm) causes oxidative stress, DNA damage, and expression of p53/p73 in laboratory experiments on embryos of the spotted salamander, *Ambystoma maculatum*. *Physiological and Biochemical Zoology*. 74: 733-741.

Lewis, R. K. (1952) Ultraviolet Radiation. New York John Wiley & Sons, inc. Chapman E Hall, ltd, London.

Licht, L. E. (2003) Shedding light on ultraviolet radiation and amphibian embryos. *BioScience*. 53:551-561.

Lips, K.R. (1999) Mass mortality and population declines of anurans at an upland sites in western Panama. *Conservation Biology*, 13, 117-125.

Lips, K.R., P.A. Burrowes, J. R. Mendelson III, y G. Parra-Olea (2005) Amphibian Declines in Latin America: Widespread population declines, Extinctions, and impacts. *Biotropica*. 37: 163-165.

Lips, K.R., J.R. Mendelson III, A. Muñoz-Alonso, L Canseco-Márquez, y D.G. Mulcahy (2004) Amphibian population declines in montane southern Mexico: resurveys of historical localities. *Biological Conservation*. 119: 555-564.

Lips, K.R., P.A. Burrowes, J. R. Mendelson III, y G. Parra-Olea (2005b) Amphibian population declines in Latin America: A Synthesis. *Biotropica* . 37: 222-226.

Lizana, M., y E.M. Pedraza. (1998) The effects of UV-B radiation on toad mortality in mountainous areas of central Spain. *Conservation Biology*. 12: 703-707.

Madronich, S., y S. Flocke (1997) Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the earth's surface. *en* Springer (eds). *Solar ultraviolet radiation modeling, measurement and effects*, pp 1-12. Zerefos, C.S. y A. F. Bais, editores.

Marin-Martinez, A. I. (2007) Preferencia de plantas para la oviposición del ajolote *Ambystoma mexicanum* en condiciones de laboratorio. Tesis de licenciatura. Facultad de ciencias, UNAM.

Matías-Ferrer N. (2006) Diferenciación genética y sistemática de las especies de *Ambystoma altamiranoi*, *A. leorae*, *A. rivulare* y *A. zempoalense*. Tesis de maestría. Instituto de Biología, UNAM.

Muhlía-Velazquez (2001) La radiación ultravioleta B y el índice UV. *Geofisicosas*. 12: 1-4.

OMS (2003) Índice UV Solar mundial, guía práctica. Recomendación conjunta de: Organización Mundial de la Salud (OMS), Organización Meteorológica Mundial (OMM), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante. [base de datos disponible en línea] <http://www.who.int/uv/publications/en/uvispa.pdf>.

Ortega-Cambrais, A. J. (2000) El ajolote. *Ciencia y Cultura* elementos. La Hemeroteca Científica en Línea en ciencias sociales [datos disponibles en línea] <http://www.redaly.org> [Acceso enero 2007].

Parra-Olea, G., M. García-París, y D.B. Wake (1999) Status of some population of Mexican salamanders (Amphibia: Plethodontidae). *Rev. Biol. Trop.*, 47: 217-223.

Perotti, M. G., y M. C. Diéguez (2006) Effect of UV-B exposure on eggs and embryos of patagonian anurans and evidence of photoprotection. *Chemosphere*. 65: 2063-2070.

Shaffer, H. B. y M. L. McKnight (1996). The polytypic species revisited: Genetic differentiation and molecular phylogenetics of the tiger salamander *Ambystoma tigrinum* (Amphibia: Caudata). *Evolution*. 50: 417-433.

Shaw, G. (1789) *The naturalist's miscellany*. London. 24 vols., ill (color) *Ann. Mag. Nat. Hist.* (6)15: 375.

Sih, A. y R. D. Moore (1993) Delayed hatching of salamander eggs in response to enhanced larval predation risk. *American Naturalist*. 142: 947-960.

Simon, P.C (1997) Extraterrestrial Solar irradiance in the near and medium UV Ranges. *en* Springer (eds). *Solar ultraviolet radiation modeling, measurement and effects*, pp 1-12. Zerefos, C.S. y A. F. Bais, editors.

SMA. DF (2007) Sistema de monitoreo atmosférico de la ciudad de México [base de datos disponibles en línea]. <http://www.sma.df.gob.mx/simat/> [acceso 2007].

SMN (2008) Sistema meteorológico nacional [base de datos disponibles en línea]. <http://smn.cna.gob.mx/> [acceso marzo 2008].

Smith, H. M. y R. B. Smith (1971) Synopsis of the herpetofauna of Mexico. Analisis of the literature on the Mexican axolotl . Volumen 1. John Johnson Natural History Books. 245 pp.

Smith, H. M. (1989) The Axolotl in its native habitat. Axolotl Newsletter. 18: 12-16.

Smith, G.R., M.A. Waters, y J.E. Rettig (2000) Consequences of embryonic UV-B exposure for embryos and tadpoles of plains leopard frog. Conservation Biology. 14: 1903-1907.

Sokal, R.R y F.J. Rohlf (1995) Biometry. The principles and practice of statistics in biological research. New York Freeman and company. 887pp

Starnes, S.M., C.A. Kennedy, y J.W. Petranka (2000) Sensitivity of embryos of southern Appalachian amphibians to ambient Solar UV-B radiation. Conservation Biology. 14: 277-282.

Stebbins, R. C., y N. W. Cohen (1997) A natural History of amphibians. Princeton University Press. 316 pp.

Stuart, S. N., J. S. Chanson, N.A. Cox, B. E. Young, A.S.L. Rodriguez, D. L. Fischman, y R.W. Waller (2004) Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. Science. 306: 1783-1786.

Taylor, E.H. (1939) New salamanders from Mexico, with a discussion of certain known forms. Univ. Kansas Sci. Bull. 26: 407-439.

UNEP-WCMC (2007) UNEP-WCMC Species Database: CITES-Listed Species [base de datos disponible en línea]. <http://www.unep-wcmc.org> [acceso enero 2007].

Valiente, E. L. (2006) Efecto de las especies introducidas en Xochimilco para la rehabilitación del hábitat del ajolote (*Ambystoma mexicanum*). Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.

Wake, D B, y Morowitz H J. (1991) Declining amphibian populations- a global phenomenon? Alytes 9: 33-42.

Warkentin, K. M. (1995) Adaptive plasticity in hatching age: a response to predation risk and trade offs. Proceedings of the National Academy of Sciences (USA). 92: 3507-3510.

Warkentin, K. M. (2000) Wasp predation and wasp-induced hatching of red-eyed treefrog eggs. Animal Behaviour. 60:503-510.

Xenopoulos, M.A., y D. W. Schindler (2001) Physical factors determining ultraviolet radiation flux into ecosystems. *En: Spriger (eds.). Ecosystems, evolution, and ultraviolet radiation*, pp. 36-62. Cockell C.S. y A. R. Blaustein, editores.

Zambrano L., E. Vega, L.G. Herrera, E. Prado, y V.H. Reynoso (2007) A population matrix model and population viability analysis to predict the fate of endangered species in highly managed water systems. *Animal Conservation* 10: 297-303.

Zar J.H. (1999) *Biostatistical analysis*. Upper Saddley River. New Jersey. Prentice Hall. 123 pp.

APENDICE I

Radiación UV-B

La radiación solar es energía que cruza el espectro electromagnético (Bryant, 1997), desde ondas largas (de menor frecuencia) como las de radio, hasta longitudes de onda cortas (de mayor frecuencia) como rayos X y los rayos gamma (Bryant, 1997). La radiación electromagnética solar es la fuente fundamental de energía para el ambiente terrestre (Simon, 1997). La fracción más larga de la energía asociada con el espectro solar está situada en el visible (Simon, 1997), la radiación ultravioleta representa solo una pequeña fracción (8.3%) del flujo de incidencia total (Simon, 1997) y es definida como la radiación electromagnética de longitudes de onda de 100-400nm (Madronich y Flocke, 1997). Esta porción es dividida en tres segmentos: UV-A (315 a 400 nm), UV-B (280 a 315nm), y UV-C (100 a 280 nm; Bryant, 1997). Fig. 37.

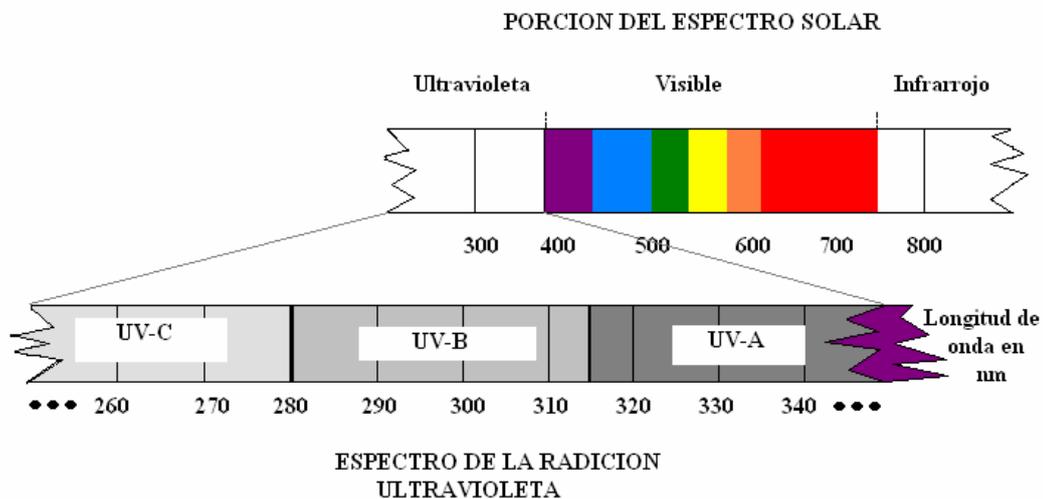


Fig. 37. Dibujo donde se muestra una porción del espectro electromagnético y se presenta la fracción del espectro de la radiación UV. Sobresale la radiación UV-B el cual es un fragmento de importancia biológica.

La acción del espectro (también llamada dependencia espectral) para varios procesos de interés general es presentada en la Fig. 38. La cantidad de radiación puede ser expresada en unidades físicas o biológicas (Lewis, 1952). Las unidades físicas se relacionan con el trabajo o la energía, mientras que las biológicas están relacionadas con los efectos biológicos en humanos, así tenemos que el enrojecimiento de la piel a causa de la exposición de radiación UV-B es llamada eritema (mejor conocida como quemadura por sol; Lewis, 1952). La intensidad del eritema depende de la exposición, y del tipo de piel; un eritema apenas perceptible es llamado eritema mínimo perceptible EMP (Lewis, 1952). La unidad de energía radiante UV-B ponderada que produce un EMP en una piel clara es llamada MED (Minimum Erythema Dose), y es equivalente a 210 Joules por metro cuadrado (J/m^2 ; SMA. DF, 2007). 1 **MED/hora** se define como la irradiancia o la razón con la que incide la radiación UV-B sobre alguna superficie (SMA. DF, 2007). Esto es que si durante una hora una persona se exhibe a la radiación UV-B estará expuesta a una irradiación efectiva de 1 MED y su reacción dependerá del tipo de piel que tenga (Mulhía, 2001).

El índice UV (**IUV**) es una medida de la intensidad de radiación UV (OMS, 2003), diseñada para humanos como orientación para una exposición saludable del Sol (SMA. DF, 2007). El **IUV** en México está conformado por 15 valores que se dividen en cuatro categorías de exposición (SMA. DF, 2007). Tabla 12.

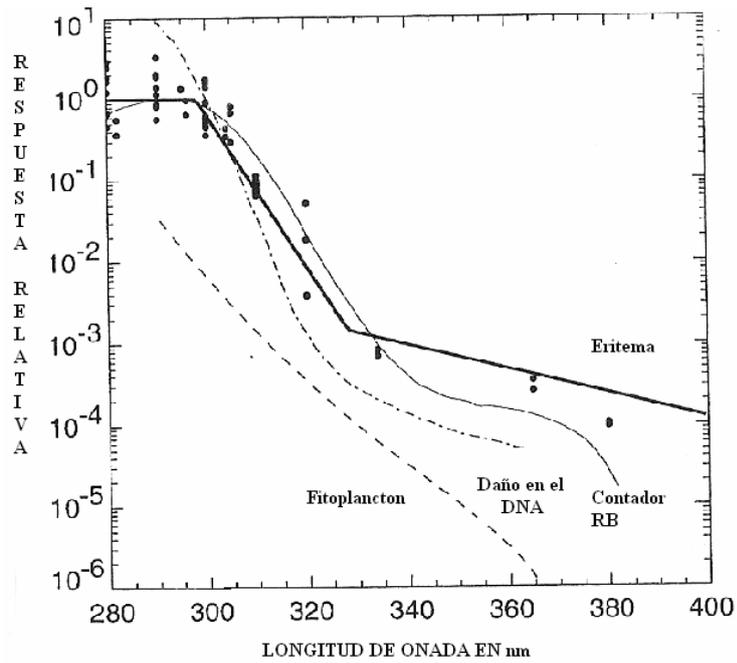


Fig. 38. Diferentes acciones de espectro biológico: Inducción de eritema (línea sólida negra), daño de DNA in Vitro, inhibición de la productividad de fitoplancton. Tomada de Madronich y Flocke, (1997).

Tabla 12. Categorías de exposición a la radiación UV y los intervalos de valores de **IUV** usados en México.

Categoría de exposición	Intervalos de valores de IUV
Bajo	0 a 4
Medio	5 a 7
Alto	8 a 9
Extremo	10 a 15

Muhlía-Velázquez (comentario personal) menciona que el índice de UV (**IUV**) se estima multiplicando el valor de la irradiancia efectiva en W/m^2 por 40, así resulta que si el IUV es 1, este tiene una equivalencia de $1/40$ de W/m^2 es decir:

$$1/40 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ IUV}$$

$$0.025 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ IUV}$$

Para encontrar la equivalencia entre **MED/hora** y los **IUV** se sabe que:

$$1 \text{ MED/hora} = 0.0583 \text{ W/m}^2$$

Entonces

$$0.0583 \times 40.0 = 2.331 \text{ IUVs}$$

En otras palabras: Si la razón a la que llega la radiación UV-B es **R**, y esta dada en **MED/hora**, el IUV se calcula de la siguiente forma:

$$\text{IUV} = \mathbf{R} \times 2.332$$

y si por ejemplo si **R= 3 MED/hora**, entonces el índice UV (**IUV**) será:

$$\text{IUV} = 3 \times 2.332 = 6.996$$

Y si lo redondeamos al entero más próximo, este índice es

$$\mathbf{IUV} = 7$$

Ahora para saber como se calcula el **MED/hora** en base de **IUV**, sabemos que si la razón a la que llega la radiación UV-B es **R**, y está dada en **MED/hora**, entonces 1

MED/hora es 2.332, tenemos:

$$\mathbf{IUV} = (\mathbf{R}) (2.331) = 1$$

$$\mathbf{R} = 0.4288$$

$$R = 0.43 \text{ redondeando}$$

El equivalente para los 15 valores de **IUV** y el equivalente en **MED** se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Se muestran los 15 valores del índice de radiación ultravioleta (**IUV**) y el equivalente en la dosis para un eritema mínimo por hora (**MED/hora**) en México

IUV	MED/hora
1	0.43
2	0.86
3	1.29
4	1.7
5	2.14
6	2.6
7	3.0
8	3.4
9	3.9
10	4.3
11	4.7
12	5.1
13	5.6
14	6.0
15	6.4

El Observatorio de Radiación Solar (ORS) del Instituto de Geofísica (IG) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) es un centro Regional de Radiación AR- IV (Asociación Regional IV [América del Norte y Central]), de la Organización Mundial de Meteorología (OMM; Geofísica, 2007). El ORS en sus instalaciones de Ciudad Universitaria mide los parámetros de radiación ultravioleta que ponen a disposición en unidades de MED/DIA en su página en Internet y proporciona por petición especial lecturas de radiación UV-B realizadas cada minuto durante todo el año, en unidades W/m^2 útiles para la realización de investigación referente al tema (Geofísica, 2007).

APENDICE II

ESPECIE

Ambystoma mexicanum

TAXONOMÍA

Reino:	Animalia
Subreino:	Metazoa
Phylum:	Chordata
Subphylum:	Vertebrata
Superclase:	Tetrapoda
Clase:	Amphibia
Subclase:	Lissamphibia
Orden:	Caudata
Familia:	Ambystomatidae
Género:	<i>Ambystoma</i>
Especie:	<i>mexicanum</i>

NOMBRE VÁLIDO

Ambystoma mexicanum (Shaw, 1789)

Frecuentemente Nodder es citado como coautor (Smith y Smith, 1971).

SINONIMIA

Ambystoma edule , *Ambystoma weismanni* , *Axolotes guttata* , *Axolotl pisciformis* ,
Axolotus pisciformis , *Gyrinus mexicanus* , *Hemitriton mexicanum* , *Hypochton*

pisciformis , *Philhydrus pisciformis* , *Siredon axolotl* , *Siredon edule* , *Siredon humboldtii* , *Siredon mexicanus* , *Siren pisciformis* , *Sirenodon pisciformis* , *Stegoporus mexicanus* , *Stegoporus pisciformis* , *Triton mexicanus* (UNEP-WCMC, 2007).

NOMBRE COMUN

Axolotl, Ajolote de México

MORFOLOGÍA

La siguiente descripción está basada en Taylor, (1939) quien describe larvas capturadas en Xochimilco (Fig. 39).

LARVAS

Anatomía del cráneo

Los dientes maxilares y premaxilares varían en cada uno de los lados de la mandíbula de 42-51, los dientes se extienden significativamente por detrás del nivel posterior de las coanas; dientes mandibulares en cada lado de 48-52, los dientes posteriores un tanto extendidos, la serie de dientes vomerianos constan de 24 a 32 dientes en cada lado (Taylor, 1939; Fig. 40).

Cuerpo

La aleta dorsal se inserta anteriormente, en un punto que se encuentra a más de un centímetro por detrás de la inserción posterior de las branquias; anteriormente la aleta es más pequeña que un escaso pliegue, pero en la cola aumenta en el ancho por varios milímetros. Los machos tienen una glándula cloacal grande, la cual está reducida en las hembras; la piel tiene una apariencia ligeramente granulada. La cola esta punteada drásticamente en el final (Taylor, 1939).

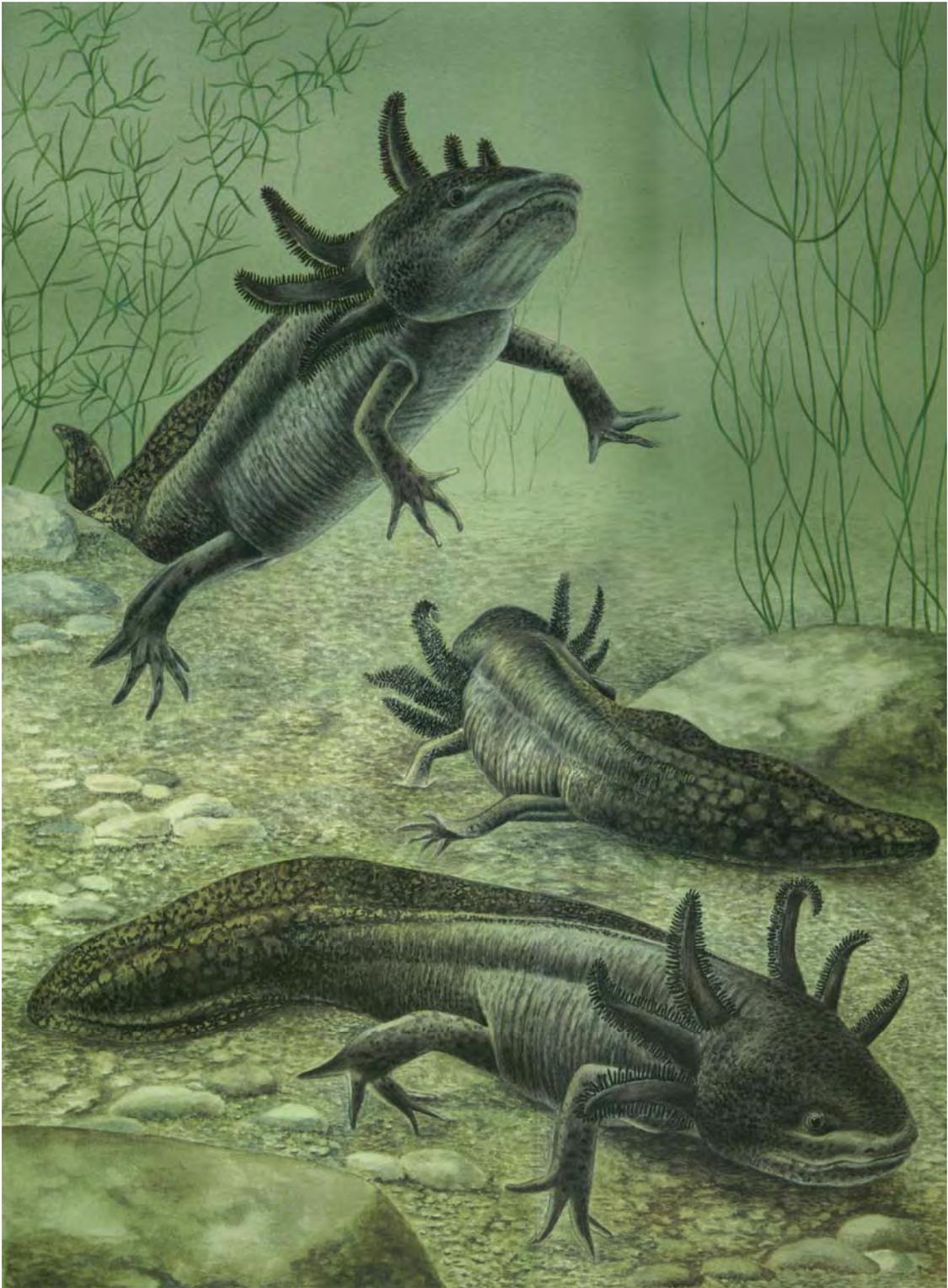


Fig. 39. Dibujo de *Ambystoma mexicanum* en estadio larvario. Elaborado por Elvia Esparza.

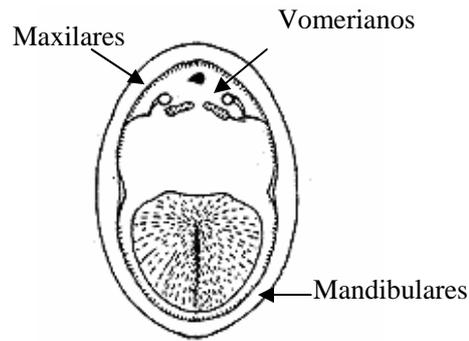


Fig. 40. Dibujo que muestra la forma de la boca de *Ambystoma spp.* Tomado de <http://www.livingunderworld.org/biology/caudata/> (2007).

Coloración

La piel con motas, marcas por todo el cuerpo, la cabeza ocasionalmente con pocos y pequeños poros con marcas (Taylor, 1939).

Medidas

La longitud de hocico cloaca es de 128.5 mm, cola de 90 mm, hocico al brazo 44 mm, brazo 37 mm, pierna 39 mm. (Taylor, 1939).

ADULTOS

Descripción basada en Taylor, (1939) quien describe un adulto que se cree fue transformado artificialmente en laboratorio (Fig. 41).

Anatomía del cráneo

Dientes maxilares y premaxilares 126, dientes vomerianos de 11-13 (Taylor, 1939).

Cuerpo

Cuerpo corto y regordete, cabeza muy corta y ancha. La cola es mucho más corta que la cabeza y el cuerpo, nostrilos estrechos y alargados, la distancia entre ellos mucho mayor que la distancia entre los ojos. Dígitos cortos, en el siguiente orden de tamaño: dedos: 1, 4, 2, 3; pies: 1, 5, 2, 4, 3. Presenta 11 pliegues costales. Cola fuertemente comprimida sin vestigios de membrana en la aleta. La piel es de aspecto granular en los lados de la cabeza y en la cola (Taylor, 1939).

Coloración

Café oscuro en la superficie dorsal de la cabeza y en el dorso, en la mitad de la región lateral del cuerpo y la cola de color amarillo; en el mentón y en sus lados de color amarillo turbio al igual que en el abdomen. El cuerpo por encima y por debajo con dispersas motas negras de tamaño grande, punta de los dígitos blancos, con poros discernibles (Taylor, 1939).

Medidas

La longitud de hocico a cloaca es de 87.5mm, cola 67.2mm, ancho de la cabeza de 27mm, hocico a brazo 37mm, piernas, 39mm. (Taylor, 1939).

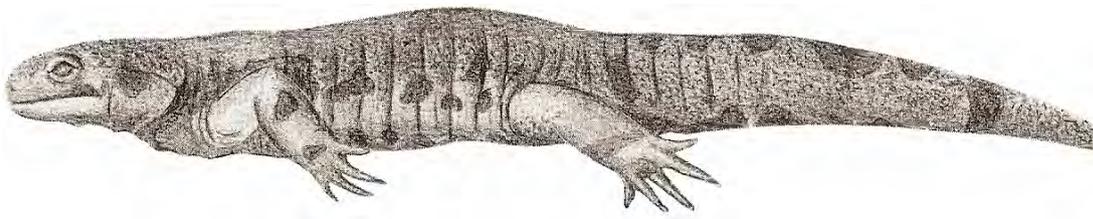


Fig. 41. Dibujo que muestra a un adulto de *Ambystoma mexicanum*, que se cree fue transformado en laboratorio.

DISTRIBUCIÓN

México

Distrito Federal.

Xochimilco

El Distrito Federal abarca una superficie de 1479 km² (Flores- Villela y Gerez, 1996), posee bosque de oyamel, pino-ocote, encino, eucalipto y fresno, pastizal, y campos de agricultura (INEGI, 2007). Cuenta con las regiones hidrológicas de: Panuco, Balsas y Lema-Santiago, siendo la más destacada la del Panuco con una ocupación del 94.9% del territorio urbano. Esta región hidrológica incluye solo la Cuenca del Río Moctezuma, la cual tiene ríos tales como: Los Remedios, Tacubaya, Mixcoac, Churubusco, etc., así como los Canales de Chalco, Apatlaco, Cuemanco entre otros, y posee cinco cuerpos de agua : Presa Anzaldo, Canutillo, Lago San Juan Aragón (artificial), Lagos de Chapultepec (artificial) y el Lago de Xochimilco (INEGI, 2007b; 2007d).

El Distrito Federal cuenta con 12 especies de anfibios (Flores-Villela y Gerez, 1994), todos endémicos de México (Flores-Villela y Gerez, 1994). *Ambystoma mexicanum* se encuentra actualmente restringida a pequeños canales y remanentes del lago de Xochimilco (Smith, 1989) y Chalco. (Fig. 42). Sin embargo se cree que originalmente se distribuía en seis lagos que ocupaban la cuenca de México: Chalco, México, Texcoco, Xaltócan, Xochimilco y Zumpango (Duhon, 1997). Excavaciones arqueológicas a orillas de la cuenca Xochimilco-Chalco muestran huesos de *Ambystoma* que datan de al menos 6000 A.C (Duhon, 1997).



Fig. 42. Localización de Xochimilco, D.F. y Chalco, Estado de México; México.

Registros adicionales.- Chalco, (Armstrong y Malacinski, 1989), Lago de Chapultepec, (Parra-Olea, datos no publicados).

ESTADO ACTUAL DE CONSERVACION

IUCN (Red list status)

Vu Vulnerable

CITES

Apéndice II, (comercio internacional controlado),

Se están realizando esfuerzos para subirlo a la categoría de apéndice I (especies amenazadas con extinción y comercio internacional solo permitido en circunstancias excepcionales)

NOM-059-ECOL-2001

Pr sujeta a protección especial

HABITAT

“Ejidos de Xochilco y San Gregorio Atlapulco”, es una área Natural Protegida (ANP) ubicada al sur del Distrito Federal en la porción centro y norte de la delegación política de Xochimilco, cuenta con una superficie de 2,657-08-47 ha, las coordenadas geográficas extremas son: 19° 15' 11" y 19° 19' 15" de latitud Norte; 99° 00' 58" y 99° 07' 08" de longitud Oeste (GODF, 2006). El ANP se ubica en la provincia fisiográfica del Eje Volcánico Transversal, en la Subprovincia de lagos y volcanes del Anáhuac, en el extremo sur de la Cuenca de México (INEGI, 2007c). El clima de la zona, es templado subhúmedo, con lluvias en verano (GODF, 2006).

DEPREDADORES

En el sistema lacustre de Xochimilco mediante un Programa Nacional de Acuicultura se optó por la introducción de la carpa (*Cyprinus carpio*), y tilapia (*Oreochromis niloticus*) por ser considerados productos de alto rendimiento económico (Valiente, 2006). Se ha registrado la presencia de residuos de *Ambystoma mexicanum* en el contenido estomacal ambas especies (Valiente, 2006). Así mismo se ha observado que la alta densidad poblacional de éstas dos especies de peces provoca efectos negativos en la alimentación del ajolote ya que compiten por organismos que pertenecen a la dieta de *Ambystoma mexicanum* (Valiente, 2006).

ESPECIES CRIPTICAS

Es posible la confusión de *Ambystoma mexicanum* con *Ambystoma lermaense*, los caracteres que posiblemente los distinguen son: origen del pliegue dorsal, forma del cuerpo y su distribución (Tabla 14).

Tabla 14. Caracteres útiles para distinguir *Ambystoma mexicanum* y *Ambystoma lermaense*

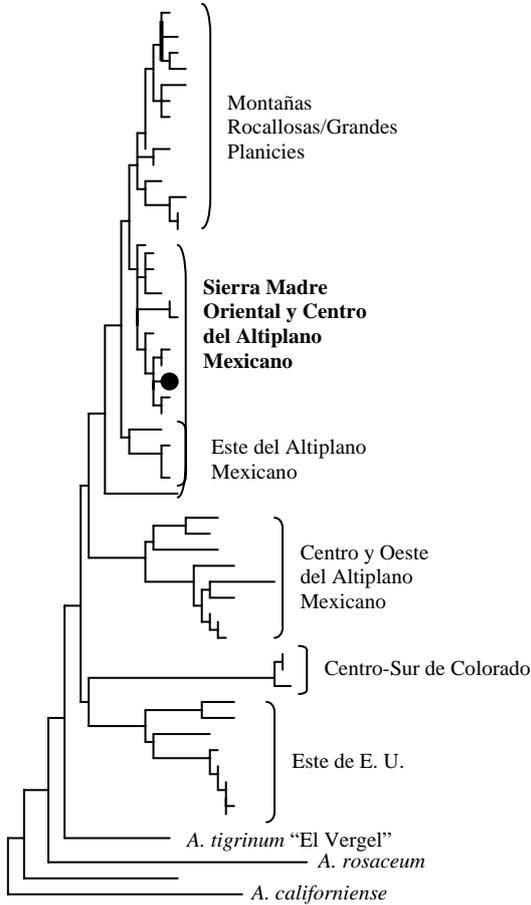
Caracter	<i>A. mexicanum</i>	<i>A. lermaense</i>
Pliegue dorsal	Se origina antes del ángulo de inserción de los miembros anteriores (Taylor, 1939).	Se origina en la parte anterior a la inserción de miembros anteriores (Taylor, 1939).
Forma del cuerpo	Muy robusta, el cuerpo y la cola están lateralmente comprimidos (Taylor, 1939).	Poco robusto, el dorsocaudal poco alto (Taylor, 1939).
Distribución	Cuenca del Valle de México (Taylor, 1939).	Cuenca del Lerma (Taylor, 1939).

IMPORTANCIA

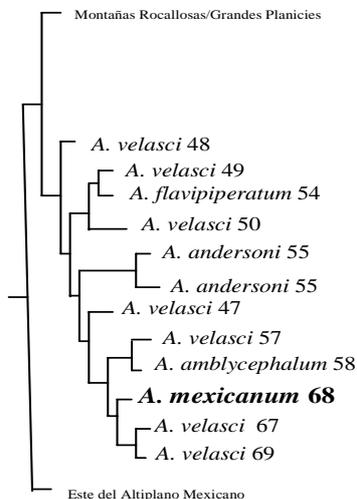
El ajolote es un anfibio presente en la mitología Nahuatl, su nombre proviene del náhuatl AXOLOTL; *atl*, agua y *xolotl*, monstruo: *monstruo acuático* (Ortega-Cambrais, 2000). El ajolote es el nombre acuático del dios Xolotl, quien era monstruoso a causa de su nacimiento gemelar con Quetzalcoátl (Ortega-Cambrais, 2000). El ajolote también es conocido como esclavo, servidor, duende, monstruo, gemelo, o perro de agua (Armstrong y Malacinski, 1989). Xolotl fue considerado un Dios de: la resurrección, vigilante de la muerte, de los juegos, de lo monstruoso y de las aberraciones (Armstrong y Malacinski, 1989). Antiguamente conocido como un importante recurso de comida (Armstrong y Malacinski, 1989). Actualmente se utiliza como mascota, objeto de estudio, componente de medicina tradicional (contra la tos y reumatismo; UNEP-WCMC, 2007), y alimento (Griffiths y Bride, 2005).

FILOGENIA

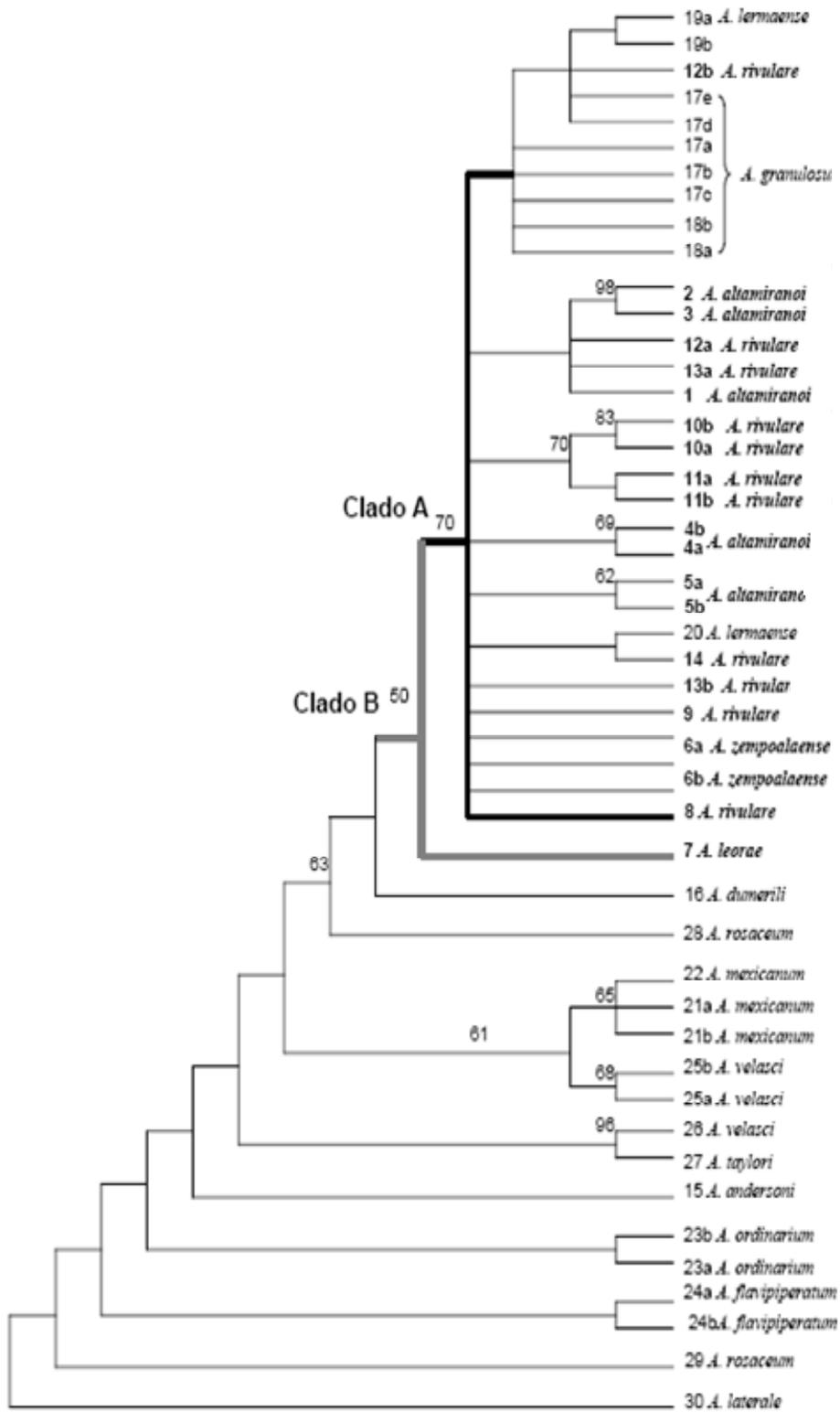
Cladograma tomado de Shaffer y Mcknight (1996). *Ambystoma mexicanum* se encuentra en el clado de la Sierra Madre Oriental y centro del Altiplano Mexicano.



Acercamiento del clado de la Sierra Madre Oriental y centro del Altiplano Mexicano, donde se puede observar a *Ambystoma mexicanum* # 68. (Shaffer y Mcknight, 1996).



Mátias-Ferrer (2006) realizó el estudio de la diferenciación genética y sistemática de los especies de *Ambystoma Altamirano*, *A. leorae*, *A rivulare* y *A. zempoalense* en el que incluye a *A. mexicanum*.



APENDICE III

Tamaños de eclosión por tratamientos

Imágenes de los distintos tipos de tamaño de eclosión de los embriones de *Ambystoma mexicanum* sometidos a los tres tratamientos. Larva izquierda perteneciente al tratamiento de control, larva central perteneciente al tratamiento de sol, larva derecha perteneciente al tratamiento de filtro.



CONTROL

SOL

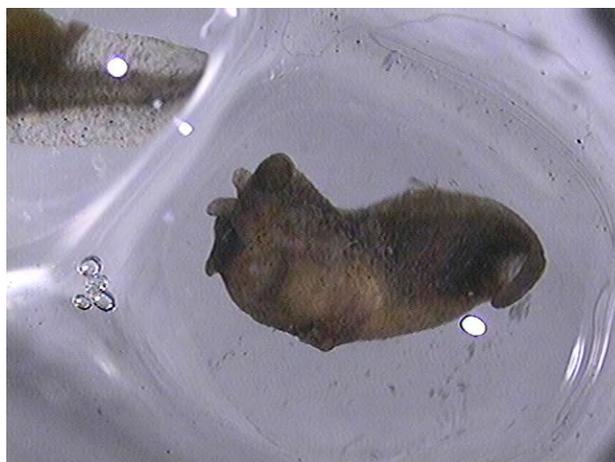
FILTRO

APENDICE IV

Imágenes de los diferentes tipos de malformaciones encontradas en los tres tratamientos:

Tipo I.

Múltiples malformaciones corporales



Desarrollo incompleto



Curvatura de espina y cola



Tipo II
Ampollas



Edemas



Varias malformaciones en un individuo



Edemas con desarrollo incompleto



Polimórficas con ampollas



Edemas y ampollas