



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

Efecto de la radiación UV en el asentamiento larval de los corales escleractinios *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata*.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
(Biología marina)

PRESENTA:
Rosaura Cuevas Villar

TUTORA PRINCIPAL:
Dra. Anastazia Teresa Banaszak
Unidad Académica de Sistemas Arrecifales de Puerto Morelos del Instituto de Ciencia del Mar y Limnología, UNAM

COMITÉ TUTOR:
Dr. Juan Pablo Carricart Gavinet
Unidad Académica de Sistemas Arrecifales de Puerto Morelos del Instituto de Ciencia
Dr. Guillermo Javier Horta Puga
Unidad Académica de Sistemas Arrecifales de Puerto Morelos del Instituto de Ciencia
Dra. Patricia Elena Thome Ortíz
Unidad Académica de Sistemas Arrecifales de Puerto Morelos del Instituto de Ciencia del Mar y Limnología, UNAM

ASESOR EXTERNO:
Dr. Pedro Medina Rosas
Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara



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 del Mar y Limnología.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida.

A mi tutora principal la Dra. Anastazia Teresa Banaszak por su acompañamiento y asesoría.

A los/as integrantes de mi jurado Dr. Juan Pablo Carricart Ganivet, Dr. Pedro Medina Rosas, Dra. Patricia Elena Thomé Ortiz y Dr. Guillermo Javier Horta Puga.

Al Dr. Eric Jordán Dahlgren por sus enseñanzas, tiempo dedicado y por retarme siempre.

A Sandra Mendoza y Sergio Guendolain por su apoyo en la ejecución de los experimentos.

Al laboratorio de Fotobiología.

A la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

A mi alma máter la Universidad Nacional Autónoma de México.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mi mamá, papá y hermanas por amarme incondicionalmente, acompañarme, sostenerme y motivarme siempre.

A mis compañeros de vida de hace trece años que iluminaban mi vida y ahora que no están materialmente lo siguen haciendo cada día.

A mis amigas y amigos que me quieren, apoyan y echan porras en cada aventura que decido emprender.

A las personas brillantes con quienes he coincidido en el camino y que han sido fuentes inagotables de conocimiento e inspiración.

A la vida que me trajo al Caribe.

Al Caribe que me sedujo y atrapó hace catorce años.

Al trabajo que me permite seguir cuidando del Caribe.

Al amor que me ha impulsado a cruzar fronteras, culturas, límites, a no tener miedo y creer en mí, que me nutre y me ha brindado los mejores días de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	8
SUMMARY	9
1. INTRODUCCIÓN	11
2. OBJETIVOS	13
2.1. GENERAL	13
2.2. PARTICULARES	13
3. ANTECEDENTES	14
3.1. ÁREA DE ESTUDIO	14
3.2. ACROPORA PALMATA	14
3.2.1. BIOLOGÍA	15
3.2.2. DISTRIBUCIÓN	15
3.2.3. REGULACIÓN (NORMATIVIDAD, LEGISLACIÓN)	16
3.2.4. REPRODUCCIÓN	16
3.2.4.1. Reproducción asexual vs sexual	17
3.2.5. CICLO DE VIDA	17
3.3. ORBICELLA FAVEOLATA	18
3.3.1. BIOLOGÍA	18
3.3.2. DISTRIBUCIÓN	18
3.3.3. REGULACIÓN	19
3.3.4. REPRODUCCIÓN	19
3.3.5. CICLO DE VIDA	20
3.4. ASENTAMIENTO DE LARVAS Y RECLUTAMIENTO DE INDIVIDUOS SEXUALES	20
3.5. RADIACIÓN ULTRAVIOLETA	21
3.5.1. LA CAPA DE OZONO Y LA INTERACCIÓN DE LA UVR CON EL CAMBIO CLIMÁTICO Y CONTAMINANTES EMERGENTES	22
3.6. EFECTOS DE LA UVR EN EL ASENTAMIENTO DE LARVAS DE CORAL	23
4. MÉTODOS	27
4.1. COLECTA DE GAMETOS	27
4.2. FERTILIZACIÓN EX SITU Y DESARROLLO EMBRIONARIO	28
4.3. CARACTERIZACIÓN DE CAMPO LUMÍNICO DURANTE LOS EXPERIMENTOS	29
4.4. EFECTO DE LA UVR SOBRE EL ASENTAMIENTO DE LARVAS DE CORAL (2010)	31
4.4.1. ACROPORA PALMATA	31
4.4.2. ORBICELLA FAVEOLATA	31
4.5. PREFERENCIA DE SITIO DE ASENTAMIENTO	32
4.6. EFECTO DE LA UVR SOBRE EL ASENTAMIENTO DE LARVAS DE CORAL (2011)	32
4.7. CUANTIFICACIÓN DE ASENTAMIENTO	33
4.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	34

5. RESULTADOS	36
5.1. CARACTERIZACIÓN DEL CAMPO LUMÍNICO Y MONITOREO DE LA TEMPERATURA DURANTE LOS EXPERIMENTOS	36
5.2. EFECTO DE LA UVR SOBRE EL ASENTAMIENTO DE LARVAS DE CORAL (2010)	41
5.2.1. <i>ACROPORA PALMATA</i>	41
5.2.2. <i>ORBICELLA FAVEOLATA</i>	46
5.3. PREFERENCIA DE SITIO DE ASENTAMIENTO	47
5.3.1. <i>ACROPORA PALMATA</i>	47
5.3.2. <i>ORBICELLA FAVEOLATA</i>	48
5.4. EFECTO DE LA UVR SOBRE EL ASENTAMIENTO DE LARVAS DE CORAL (2011)	49
5.4.1. <i>ACROPORA PALMATA</i>	49
5.4.2. <i>ORBICELLA FAVEOLATA</i>	52
6. DISCUSIÓN	58
6.1. EFECTO DE LA UVR SOBRE EL ASENTAMIENTO DE LARVAS DE CORAL	58
6.1.1. <i>ACROPORA PALMATA</i>	58
6.1.2. <i>ORBICELLA FAVEOLATA</i>	61
6.2. PREFERENCIA DE SITIO DE ASENTAMIENTO	61
6.2.1. <i>ACROPORA PALMATA</i>	61
6.2.2. <i>ORBICELLA FAVEOLATA</i>	61
6.3. TIEMPO DE ASENTAMIENTO	62
6.3.1. <i>ACROPORA PALMATA</i>	62
6.3.2. <i>ORBICELLA FAVEOLATA</i>	63
6.4. INDIVIDUOS EN COLUMNA DE AGUA Y MORTALIDAD	64
6.4.1. <i>ACROPORA PALMATA</i>	64
6.4.2. <i>ORBICELLA FAVEOLATA</i>	65
7. CONCLUSIONES	66
8. REFERENCIAS	69

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

TABLA 1. Resumen de los experimentos realizados para determinar el efecto de la radiación ultravioleta (UVR) en larvas de coral. _____	27
TABLA 2. Exposición diaria a la radiación solar en los distintos experimentos. _____	36
TABLA 3. Resumen de los resultados principales obtenidos durante los experimentos realizados para determinar el efecto de la radiación ultravioleta (UVR) en larvas de coral. _____	56
TABLA 4. Datos de asentamiento de las larvas plánulas de <i>Acropora palmata</i> y <i>Orbicella faveolata</i> de los experimentos "Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010) y (2011)". _____	63
FIGURA 1. Colocación de redes de colecta de gametos sobre una colonia de <i>Acropora palmata</i> (A) y una colonia de <i>Orbicella faveolata</i> (B). _____	28
FIGURA 2. Sistemas de cultivo de embriones de <i>Acropora palmata</i> y <i>Orbicella faveolata</i> . _____	28
FIGURA 3. Espectro de radiación solar medida a través de un acrílico que no permite el paso de la mayoría de la UVR para dar el tratamiento UVO (azul) y un acrílico que permite la transmisión de la UVR para dar el tratamiento UVT (rojo). Se muestra el espectro con mayor resolución en la banda de la UVR en la parte superior derecha de la figura principal (A) y comparación del espectro solar (naranja) y el espectro solar que pasa a través de UVT (rojo) (B). _____	30
FIGURA 4. Montaje experimentos en 2010 de <i>Acropora palmata</i> . _____	32
FIGURA 5. Montaje experimental para determinar el efecto de la UVR sobre asentamiento de larvas de <i>Acropora palmata</i> y <i>Orbicella faveolata</i> en 2011. _____	33
FIGURA 6. Secciones en las que se dividieron los contenedores de acrílico y orientación geográfica. _____	34
FIGURA 7. Registros de exposición diaria a la PAR (A) y a la UVR (B) de los experimentos "Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral" y "Preferencia de sitio asentamiento" de <i>A. palmata</i> tomados durante el periodo del 4 al 28 de agosto del 2010. _____	37
FIGURA 8. Registros de exposición diaria a la PAR (A) y a la UVR (B) de los experimentos "Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral" y "Preferencia de sitio asentamiento" de <i>O. faveolata</i> tomados durante el periodo del 1 al 25 de septiembre del 2010. _____	38
FIGURA 9. Registros de exposición diaria a la PAR (A) y a la UVR (B) del experimento "Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral" de <i>A. palmata</i> tomados durante el periodo del 22 de agosto al 2 de septiembre del 2011. _____	39
FIGURA 10. Registros de exposición diaria a la PAR (A) y a la UVR (B) del experimento "Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral" de <i>O. faveolata</i> tomados durante el periodo del 20 de septiembre al 1 de octubre del 2011. _____	40
FIGURA 11. Comparación entre tratamiento UVO y UVT en <i>Acropora palmata</i> . _____	41
FIGURA 12. Distribución de los datos de asentamiento de los contenedores UVO (izquierda) y UVT (derecha) en cada tapón. _____	42
FIGURA 13. Distribución de los datos de asentamiento en cada sección del fondo de los contenedores UVT y orientación geográfica. _____	43
FIGURA 14. Comparación de la intensidad de luz (mol fotón m ⁻²) de 06:00 a 17:30 horas en cada réplica (n=3) de los tratamientos UVO (izquierda) y UVT (derecha). _____	43
FIGURA 15. Distribución de la intensidad de luz (mol fotón m ⁻²) de 06:00 a 17:30 horas en cada réplica (n=3) de los tratamientos UVO (arriba) y UVT (abajo) por tapón. _____	44

FIGURA 16. Regresión lineal entre la intensidad de luz (mol fotón m ⁻²) y el número de individuos asentados por tapón de los tratamientos UVO y UVT.	44
FIGURA 17. Comparación de la intensidad de luz (mol fotón m ⁻²) de 06:00 a 17:30 horas en cada réplica (n=3) de los tratamientos UVO (izquierda) y UVT (derecha) por sección.	45
FIGURA 18. Distribución de la intensidad de luz (mol fotón m ⁻²) de 06:00 a 17:30 horas en cada réplica (n=3) de los tratamientos UVO (arriba) y UVT (abajo) por las secciones de los contenedores.	45
FIGURA 19. Regresión lineal entre la intensidad de luz (mol fotón m ⁻²) y el número de individuos asentados por sección en los tratamientos UVO y UVT.	46
FIGURA 20. Comparación entre condición UVO y UVT en <i>Orbicella faveolata</i> .	47
FIGURA 21. Comparación entre el lado UVO y el lado UVT para <i>Acropora palmata</i> .	48
FIGURA 22. Comparación entre el lado UVO y el lado UVT para <i>Orbicella faveolata</i> .	49
FIGURA 23. Comparación del número de individuos asentados UVO y UVT en <i>Acropora palmata</i> .	50
FIGURA 24. Comparación número de individuos en columna de agua UVO y UVT para <i>Acropora palmata</i> .	51
FIGURA 25. Comparación número de individuos muertos UVO y UVT para <i>Acropora palmata</i> .	52
FIGURA 26. Comparación del número de individuos asentados UVO y UVT para <i>Orbicella faveolata</i> .	53
FIGURA 27. Comparación número de individuos en columna de agua UVO y UVT para <i>Orbicella faveolata</i> .	54
FIGURA 28. Comparación número de individuos muertos UVO y UVT para <i>Orbicella faveolata</i> .	55

RESUMEN

Los corales formadores de arrecifes (escleractinios) son una parte fundamental de los arrecifes coralinos y de la alta diversidad que en ellos habita, ya que determinan la estructura y función de estos importantes ecosistemas. Sin embargo, a nivel mundial están disminuyendo. Por ello, es necesario contar con conocimiento básico de su biología reproductiva para poder diseñar medidas para su restauración y conservación, con miras a poder pronosticar el destino de estos ecosistemas en la crisis climática en la que nos encontramos.

Dos de las especies de corales escleractinios más importantes y distribuidas ampliamente por todo el Mar Caribe son *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata*, cuyas larvas plánulas son determinantes para la dispersión, la incorporación de nuevos reclutas a la población y la variación genética. Irónicamente esta etapa es una de las más vulnerables y en ella actúan diversas presiones de selección que repercuten directamente en la estructura poblacional, como la exposición a la radiación ultravioleta (UVR), ya que su incidencia e intensidad afectan considerablemente a las larvas, como al resto de los organismos con quien cohabitan el arrecife de coral.

El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de la radiación ultravioleta (UVR) en el asentamiento de larvas de los corales *A. palmata* y *O. faveolata*, mediante la cuantificación del número de individuos asentados, el tiempo de asentamiento, las preferencias de selección del sitio de asentamiento y la relación entre la mortalidad/supervivencia de los individuos en el tiempo de experimentación, en presencia o ausencia de UVR.

Los resultados obtenidos apuntan a que la UVR es necesaria para inducir el asentamiento de *A. palmata* (un mayor número de individuos asentados en presencia de UVR), sin embargo, al existir condiciones heterogéneas de la calidad de luz dentro de los contenedores, se observó preferencia de asentamiento en sitios con menor intensidad luminosa (correlación negativa entre el número de individuos asentados y la intensidad de luz). También se observó que los individuos cuyo desarrollo embrionario ocurrió en condiciones de luz natural se asentaban en tiempos más cortos que los individuos cuyo desarrollo embrionario ocurría protegido de la luz natural. Los resultados sobre si las larvas podían detectar y evitar la UVR en presencia de ambas condiciones experimentales (con y sin UVR) no mostraron ninguna diferencia estadísticamente significativa. Por último, la mortalidad parece ser mayor sin UVR al inicio de los experimentos, ya que al no estar el estímulo que induzca el asentamiento, las larvas se pueden deteriorar y morir, sin embargo, esta tendencia se invierte al final de los experimentos, ocurriendo más mortalidad en presencia de UVR, pudiendo ser consecuencia del efecto acumulado a la exposición crónica.

Respecto a los resultados obtenidos con *O. faveolata*, no hubo diferencias estadísticamente significativas en número de individuos asentados en presencia o ausencia de UVR, sin embargo, hay una tendencia que indica que los individuos de

esta especie prefieren asentarse en ausencia de UVR. Al igual que en *A. palmata* se observó que los individuos cuyo desarrollo embrionario ocurrió en condiciones de luz natural se asentaban en tiempos más cortos que los individuos cuyo desarrollo embrionario ocurría protegido de la luz natural. Tampoco en este caso, los resultados de las preferencias de selección del sitio mostraron alguna diferencia estadísticamente significativa estando ambas condiciones experimentales presentes (con y sin UV). Por último, las diferencias encontradas en cuanto a mortalidad/supervivencia son muy pequeñas y pudieran deberse a factores estocásticos. Se concluye que la metodología usada en estos experimentos no es adecuada para conocer el efecto de la UVR en *O. faveolata*, ya que puede ser una especie más sensible a cambios bruscos a las condiciones del medio como temperatura y exposición a UVR.

SUMMARY

Reef-building corals (scleractinians) are a fundamental component of coral reefs and important in maintaining their high diversity as well as the structure and function of these important ecosystems. However, worldwide they are declining. Therefore, it is necessary to have basic knowledge of their reproductive biology that helps in the design of measures for their restoration and conservation, in order to forecast the fate of these ecosystems in the climate crisis we are facing.

Two of the most important scleractinian coral species widely distributed throughout the Caribbean Sea are *Acropora palmata* and *Orbicella faveolata*, whose planulae larvae disperse and recruit as new individuals to the population. Ironically, this stage is one of the most vulnerable and various selection pressures act on it resulting in a direct effects on the population structure. An example is ultraviolet radiation (UVR) since its incidence and intensity can have a severe impact on larvae, as well as in the rest of the organisms with which they cohabit in the coral reef.

The objective of this work was to determine the effect of ultraviolet radiation (UVR) on the settlement of larvae of the corals *A. palmata* and *O. faveolata*, by quantifying the number of settled individuals, the settlement time, settlement site selection preferences and the relationship between mortality/survival of individuals during the experiments, in the presence or absence of UVR.

The results obtained suggest that the UVR is necessary to induce the settlement of *A. palmata* (a greater number of individuals settled in the presence of UVR), however, as there are heterogeneous light quality conditions inside the containers, it was observed that settlement was preferential in sites with lower light intensity (negative correlation between the number of individuals settled and light intensity). It was also shown that individuals whose embryonic development occurred under natural light conditions settled more quickly than individuals whose embryonic development occurred protected from natural light. Larval capacity to detect and avoid UVR in the presence of both experimental conditions at the same container (half with and half without UVR) did not show any statistically significant difference. Finally, mortality seems to be higher without UVR at the beginning of the

experiments, since the lack of the stimulus that induces settlement, the larvae can deteriorate and die, however this trend is reversed at the end of the experiments, with more mortality in the presence of UVR, which may be a consequence of the cumulative effect of chronic exposure.

Regarding the results obtained with *O. faveolata*, there were no statistically significant differences in the number of settled individuals in the presence or absence of UVR, however, there is a trend that indicates that individuals of this species prefer to settle in the absence of UVR. As in *A. palmata*, it was shown that individuals whose embryonic development occurred under natural light conditions settled more quickly than individuals whose embryonic development occurred protected from natural light. Again, in this case, larval capacity to detect and avoid UVR in the presence of both experimental conditions at the same container (half with and half without UVR) did not show any statistically significant difference. Finally, the differences found in terms of the relation mortality/survival are very small and could be due to stochastic factors. It is concluded that the methodology used in these experiments is not adequate to know the effect of UVR in the larval settlement on *O. faveolata*, since it may be a more sensitive species to sudden changes in environmental conditions such as temperature and UVR exposure.

1. INTRODUCCIÓN

Los corales formadores de arrecifes (corales hermatípicos) son una parte fundamental de los arrecifes coralinos y de la alta diversidad que en ellos habita, ya que determinan la estructura (acreción arrecifal, formación de islas, barreras naturales) y función (sustento de hábitats para diferentes especies marinas, protección costera, acoplamiento con otros ambientes de transición, etc.) de estos importantes ecosistemas marinos (Bruckner, 2002).

Sin embargo, a nivel mundial estos ecosistemas están disminuyendo considerablemente por diferentes causas naturales (enfermedades, depredación, competencia, daño por tormentas y huracanes, etc.), antropogénicas (degradación de su hábitat por desarrollo costero, sobrepesca, daño físico ocasionado por embarcaciones y anclajes, la degradación en la calidad del agua y el cambio climático global), así como el efecto sinérgico de ambas. Un ejemplo de ello es el brote de síndrome blanco (Stony Coral Tissue Loss Disease, SCTLD) que se presentó en la porción norte del Caribe Mexicano en el verano del 2018 mermando considerablemente las poblaciones de varias especies de corales hermatípicos (Alvarez-Filip et al., 2019).

Dos de las especies de corales formadoras de arrecife más importantes y distribuidas ampliamente por todo el Mar Caribe son *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata* (UICN, 2010).

Acropora palmata, conocido comúnmente como coral cuerno de alce, ha sufrido una drástica disminución de las poblaciones naturales, así como en su distribución durante los últimos 40 años. Por ello, en México esta especie forma parte de la lista de especies protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2010 y en algunos países como República Dominicana, Puerto Rico, EUA, entre otros, también hay medidas normativas y legales para la protección de dicha especie.

Por otro lado, *O. faveolata* también forma parte de la lista de especies protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2010, así como de la lista roja de especies amenazadas de la UICN, ya que también sus poblaciones naturales han disminuido notablemente en los últimos años, y de continuar esta tendencia, su situación podría empeorar considerablemente. El SCTLD afecta a *O. faveolata*, y es considerada una de las 11 especies más susceptibles a este síndrome en el Caribe Mexicano (FKNMS/DEP, 2018; Alvarez-Filip et al., 2019).

Debido a lo anterior es imprescindible tomar medidas pertinentes en diferentes escalas, desde global hasta a escalas locales para tratar de disminuir los factores que están comprometiendo a especies que son la base de ecosistemas, como lo son los corales hermatípicos y tratar de reducir la presión que recae sobre estos organismos.

A escala regional es necesario que se tomen medidas de mitigación de daños y de intervención para restaurar dichos ambientes. Para poder implementar medidas de restauración ecológica es necesario contar con conocimiento básico de la biología reproductiva tanto de *A. palmata* como de *O. faveolata*.

Una de las etapas del ciclo de vida clave de los corales desovadores (liberación de gametos y fertilización externa) como son *A. palmata* y *O. faveolata* es el de las larvas plánulas, ya que en gran medida, de ellas depende la dispersión, la incorporación de nuevos reclutas sexuales, así como la variación genética de la población, e irónicamente esta etapa es una de las más susceptibles (Bruckner, 2002; Villinsky, 2003; Gleason et al., 2006) y en ella actúan diversas presiones de selección (factores físicos, químicos y biológicos) las cuales impactan directamente en la estructura poblacional.

Un factor determinante en la dinámica larval es la radiación ultravioleta (UVR), ya que su incidencia e intensidad repercuten considerablemente tanto en las larvas (porque en las primeras etapas están en la superficie), como en el resto de los organismos con quien cohabitan el arrecife de coral (Wellington & Fitt, 2003).

Por otro lado, algunos de los cambios que están ocurriendo a escala global, están modificando factores como la cantidad de UVR que llega al planeta impactando negativamente a todos los seres vivos que en él habitamos.

A pesar de lo anterior, se han hecho pocos estudios de la biología y ecología larval de *A. palmata*, siendo fundamental contar con conocimiento básico para que en un futuro se puedan implementar diferentes medidas que contribuyan al manejo y medidas de mitigación de daños (como la restauración) que incrementen las posibilidades de la permanencia de esta especie.

Orbicella faveolata ha sido una especie mucho más estudiada, pero no por ello menos importante, además, al ser una especie de hábitos menos someros que *A. palmata* resulta interesante la forma en que ambas especies regulan un mismo factor externo, como en este caso la UVR, con las herramientas propias y las que les confiere el contexto en el que literalmente se encuentran sumergidas.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Determinar el efecto de la radiación ultravioleta (UVR) en el asentamiento de larvas de los corales escleractínios *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata*.

2.2. Particulares

1. Determinar el número de individuos (larvas) asentados de *A. palmata* y *O. faveolata* en condiciones con o sin UVR.
2. Determinar si hay preferencias en la selección del sitio de asentamiento dentro de los contenedores de larvas de *A. palmata* y *O. faveolata* en condiciones con o sin UVR.
3. Determinar el tiempo requerido para el asentamiento de larvas de *A. palmata* y *O. faveolata* en condiciones con o sin UVR.
4. Determinar si las larvas de *A. palmata* y *O. faveolata* pueden detectar y evitar la UVR en presencia de las condiciones con y sin UVR.
5. Determinar la mortalidad de los individuos (larvas) en condiciones con o sin UVR.
6. Determinar el porcentaje de individuos (larvas) supervivientes en columna de agua de *A. palmata* y *O. faveolata* en condiciones con o sin UVR.

3. ANTECEDENTES

3.1. Área de estudio

Puerto Morelos es una población, localizada en el Noreste de la Península de Yucatán, en el Estado mexicano de Quintana Roo. Puerto Morelos, al igual que todas las costas del estado de Quintana Roo, se caracteriza por tener muy escaso relieve y por la ausencia de ríos superficiales. Esto debido a que es un terreno de carácter kárstico, el cual es de naturaleza calcárea. A lo largo de la costa se encuentran formaciones arrecifales sobre una plataforma continental muy estrecha (<5km) así como bahías, playas, caletas, cayos, islas (sobresaliendo tres: Contoy, Isla Mujeres y Cozumel, localizadas a menos de 20 km del continente), lagunas costeras y lagunas arrecifales (Ardisson et al., 2011). El clima es tropical, con vientos alisios en primavera y verano y nortes en otoño e invierno. Las lluvias son abundantes en verano y por la zona transitan huracanes y depresiones tropicales. El medio marino está dominado por la Corriente de Yucatán que fluye paralela a la costa proveniente del sur. Las aguas costeras tienen carácter oceánico, con bajos niveles de nutrientes (son oligotróficas), tienen gran estabilidad vertical y alta transparencia (Merino & Otero, 1991).

El Arrecife de Puerto Morelos (21°00'00" y 20°48'33" latitud norte y 86°53'14.40" y 86°46'38.94" longitud oeste) forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) (Ardisson et al., 2011) el cual es la barrera arrecifal más grande del hemisferio oeste (TNC, 2022). El arrecife de Puerto Morelos fue decretado el 02 de febrero de 1998 como un Área Natural Protegida (ANP) con el carácter de Parque Nacional, cuenta con una superficie de 9,028.89 Ha (INE/SEMARNAP, 2000; CONANP, 2022). Los hábitats marinos y costeros presentes en el ANP Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos son: 1) aguas marinas someras permanentes, 2) arrecifes de coral, 3) manglares (sitio RAMSAR 1343), 4) playas arenosas, 5) praderas de pastos marinos, y 6) sistemas kársticos y otros sistemas hídricos subterráneos marinos y costeros; todos ellos considerados hábitats críticos para la alimentación, anidación y crianza de un elevado número de especies de flora y fauna de importancia comercial, amenazadas o en peligro de extinción (Ardisson et al., 2011). El arrecife de Puerto Morelos tiene una longitud aproximada de 20 km y además del valor ecológico, también tiene un valor económico, recreativo, comercial, histórico, educativo, estético y para investigación, lo que le confiere al área una importancia singular en el contexto nacional (INE/SEMARNAP, 2000).

El hábitat arrecifal de Puerto Morelos es un arrecife de barrera que para fines prácticos se puede dividir en orilla, laguna arrecifal, arrecife posterior y arrecife frontal. Esta división se basa en los rasgos fisiográficos y bióticos más aparentes (Jordán, 1978; INE/SEMARNAP, 2000). Cuenta con más de 90 especies de corales escleractineos y gorgonáceos (Beltrán-Torres & Carricart-Gavinet, 1999; Fenner, 1999; Jordán-Dahlgren & Rodríguez-Martínez, 2003; Ardisson et al., 2022).

3.2. *Acropora palmata*

3.2.1. Biología

Acropora palmata (Lamarck) es una especie de coral que pertenece a la clase Anthozoa, subclase Hexacorallia, orden Scleractinia y familia Acroporidae. Es conocido como coral cuerno de alce por su forma ramificada, con una estrecha base por la que se fija al sustrato y es una de las principales especies de corales hermatípicos (formadoras de arrecife) en el Caribe debido a su capacidad de secretar CaCO_3 y formar un exoesqueleto. Las especies ramificadas pueden alcanzar grandes tamaños y pueden dominar extensas áreas de arrecife (Szmant, 1986; Padilla, 1996; Bruckner, 2002; Guendulain, 2010).

Acropora palmata es una especie muy longeva, por un lado, es una característica de los organismos modulares y por otro lado, su gran tamaño y la masividad incrementan la resistencia a los disturbios físicos y biológicos, además tiene una elevada tasa de crecimiento (Szmant, 1986). Se han estimado que algunas colonias pueden tener más de 100 años. Las colonias grandes pueden permanecer mucho tiempo en la población debido a que tienen altas tasas de supervivencia y a que pueden regenerar rápidamente tejido dañado por fragmentación o por la muerte de algunos pólipos. Las colonias grandes también son las que más contribuyen en la reproducción asexual (generan una gran cantidad de fragmentos) y tienen una mayor aportación en la reproducción sexual, ya que el tamaño de la colonia determina su capacidad reproductiva (Szmant, 1986; Padilla, 1996).

Esta especie, al igual que muchas especies de corales hermatípicos, vive asociada con un dinoflagelado endosimbionte fotosintético del género *Symbiodinium*, el cual es adquirido después del asentamiento de la larva en el sustrato y de la metamorfosis, ya que el endosimbionte es adquirido después del desarrollo de la boca y el celenterón, necesarios para que el pólipo primario (recién formado) pueda alimentarse y adquirir al dinoflagelado. La simbiosis entre el dinoflagelado y el coral consiste en que el dinoflagelado aprovecha los desechos nitrogenados y el CO_2 del metabolismo coralino, mientras que los corales integran gran parte del carbono fijado en la fotosíntesis en forma de glucosa, glicerol o alanina (van Oppen, 2001; Wellington & Fitt, 2003; Hirose et al., 2008).

3.2.2. Distribución

El género *Acropora* tiene más de 300 especies distribuidas ampliamente en el Indo-Pacífico, mientras que en el Atlántico y el Mar Caribe sólo se han reportado 3 especies: *Acropora palmata*, *A. cervicornis* y su híbrido *A. prolifera* (Padilla, 1996; Bruckner, 2002).

En el Caribe su distribución geográfica es muy amplia y abarca desde el sur de las costas de Florida, las Bahamas, las Antillas Mayores, las Antillas Menores, Venezuela, Colombia, Panamá, Costa Rica, Nicaragua, Honduras Belice y México (Bruckner, 2002; Jaap, 2002; NMFS, 2010).

En México, la distribución de *A. palmata* abarca el suroeste del Golfo de México (Sistema arrecifal Veracruz-Antón Lizardo), el Banco de Campeche (al noroeste de la Península de Yucatán) y el Mar Caribe (al noreste de la Península de Yucatán) (Jordán, 2002).

Al noreste de la Península de Yucatán, en las costas del estado de Quintana Roo, se encuentra el arrecife de Puerto Morelos en el cual la distribución de *A. palmata* está restringida a la zona del arrecife posterior (hacia la laguna arrecifal) y frontal (hacia mar adentro) de la cresta arrecifal, es decir en la zona de rompiente y hasta 6 m de profundidad, al igual que a lo largo de todas las demás regiones del Caribe (Jordán, 1978; Wellington & Fitt, 2003).

3.2.3. Regulación (normatividad, legislación)

En México *A. palmata* está clasificada como especie sujeta a protección especial (Pr) según la NOM-059-SEMARNAT-2010 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicada en diciembre del 2010 (SEMARNAT, 2010).

En EUA en mayo del 2006 el Servicio Nacional de Pesquerías Marinas (National Marine Fisheries Service, NMFS) dependiente de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) añadió a *A. palmata* a la lista de especies en peligro de extinción (Endangered Species Act) como especie amenazada (Threatened=T) (NMFS, 2022).

En República Dominicana esta especie está protegida por la Ley Ambiental 64/00 y por varios decretos presidenciales (Bruckner, 2002) y en Puerto Rico, también se encuentra en la lista de especies en peligro de extinción (Endangered Species Act) como especie amenazada (70CFR24359) (Torres et al., 2007).

Según la Lista roja de especies amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (Internacional Union for Conservation of Nature, IUCN) *A. palmata* se encuentra en peligro crítico de extinción (Critically endangered=CE), esto quiere decir que enfrenta un riesgo extremadamente alto (mayor al 50%) de extinguirse en su ambiente natural (IUCN, 2022).

3.2.4. Reproducción

Acropora palmata presenta dos diferentes estrategias reproductivas: la primera (asexual) consiste en la fragmentación de una rama de la colonia madre por un daño físico y el posterior asentamiento en el sustrato de dicho fragmento (Bruckner, 2002) o por fisión que es la división de una colonia en dos o más por mortalidad parcial de tejido intermedio (Padilla, 1996).

La segunda estrategia (sexual) consiste en una serie de eventos que incluye la gametogénesis (formación de 6-8 huevos por gónada, y 4-5 gónadas por pólipo), la liberación de los gametos del tejido parental (la cual ocurre de 3-5 días después de

la luna llena en los meses de julio y agosto), la fertilización, la embriogénesis y el reclutamiento de las larvas a la población (Szmant, 1986; Bruckner, 2002; Wellington & Fitt, 2003; Banaszak, et al., 2018). *A. palmata* es una especie desovadora (libera sus gametos y la fecundación y el desarrollo embrionario son externos) y hermafrodita, es decir, un pólipo tiene gónadas femeninas (oocytos) y masculinas (testas) por lo que puede producir ambos gametos, tiene un ciclo reproductivo (gametogénesis) anual intraespecífico sincronizado (Szmant, 1986; Padilla, 1996).

3.2.4.1. Reproducción asexual vs sexual

La propagación de *A. palmata* ocurre principalmente por mecanismos asexuales, incluso la supervivencia de reclutas sexuales es poco frecuente (Padilla, 1996; Bruckner, 2002). Las especies de coral grandes y con altas tasas de crecimiento, suelen invertir más recursos en crecimiento que en reproducción y el tamaño de la colonia es lo que determina la capacidad reproductiva (Szmant, 1986).

Los mecanismos de reproducción asexual, como la fragmentación y la fisión son generados por condiciones ambientales como acción de las corrientes, energía del oleaje, tormentas y huracanes para el primer caso, así como interacción con otros organismos o daño físico en el caso de la fisión, es decir, no están determinados por aspectos fisiológicos de los organismos (Padilla, 1996; Bruckner, 2002).

Por otro lado, la tasa de reclutamiento sexual parece ser suficiente para mantener la variabilidad genética requerida para que ocurran los mecanismos de adaptación por selección natural y mantener la diversidad genética de las poblaciones futuras de coral (Padilla, 1996; Ritson-Williams et al., 2010).

3.2.5. Ciclo de vida

En Puerto Morelos la reproducción sexual o desove de las colonias de *A. palmata* coinciden con las fechas de desove de colonias en otros sitios del Caribe en general, sin embargo, tienden a ser diferentes las horas en que se presenta este evento.

Después del desove, los paquetes de gametos liberados de los pólipos flotan hacia la superficie del mar (por el alto contenido de lípidos que tienen) en donde ocurre el proceso de fertilización. El embrión (que mide 200 μm aprox.) después de 48 horas se desarrolla a larva plánula que no tiene boca y no contiene a su dinoflagelado simbiote. La larva plánula es capaz de asentarse (fijarse en el sustrato) y convertirse en un pólipo primario (metamorfosis) en un sustrato adecuado después de 5-7 días (Padilla, 1996; Banaszak, obs. pers.), sin embargo, Hirose et al. (2008) encontraron que las larvas de diferentes especies del género *Acropora* estimuladas con el neuropéptido de los cnidarios Hym-248 tienen la capacidad de asentarse y hacer metamorfosis justo después de comenzar a nadar. Después de la metamorfosis, la boca y los tentáculos del pólipo han sido formados y el pólipo primario es capaz de adquirir a sus dinoflagelados simbiontes. El pólipo primario ya establecido comienza a multiplicarse asexualmente por gemación o por bipartición,

formando, de esta manera, los módulos que a su vez conformarán la unidad orgánica y funcional que es la colonia (Padilla, 1996; Wellington & Fitt, 2003; Hirose et al., 2008).

3.3. *Orbicella faveolata*

3.3.1. Biología

Orbicella faveolata (antes *Montastraea faveolata* [Ellis & Solander]) es una especie de coral que pertenece a la clase Anthozoa, subclase Hexacorallia, orden Scleractinia y familia Merulinidae (Verrill, 1865; Clado XVII) (Budd et al., 2012). Es conocido como coral estrella y sus colonias son grandes (masivas) redondas o alargadas cuya superficie tiene montículos y protuberancias (proyecciones orientadas hacia arriba) que normalmente se encuentran dispuestas en filas, son de color café pálido (aunque puede ser verde brillante sobre café oscuro). También es una de las principales especies de corales hermatípicos (formadoras de arrecife) en el Caribe debido a su capacidad de secretar CaCO_3 y formar un exoesqueleto (Weil & Knowlton, 1994; Villinski, 2003; Sheppard, 2010).

En *O. faveolata*, al igual que en otras especies de corales, a pesar de que la heterotrofia juega un papel importante en la alimentación, la principal entrada de carbono es por medio de procesos autótrofos por vía de su relación con su dinoflagelado endosimbionte (Lesser, 2000).

Al igual que *A. palmata* es una especie modular, longeva, masiva, alcanza grandes tamaños, es resistente a disturbios físicos y biológicos, tiene baja tasa de crecimiento, altas tasas de supervivencia y pueden regenerar tejido dañado por fragmentación o por la muerte de algunos pólipos. Las colonias grandes también son las que más contribuyen en la reproducción asexual (generando fragmentos) y tienen una mayor aportación en la reproducción sexual (el tamaño de la colonia determina su capacidad reproductiva) (Szmant, 1986; Wellington & Fitt, 2003; Severance & Karl, 2006).

3.3.2. Distribución

El género *Orbicella* tiene 3 especies distribuidas en el Atlántico y el Mar Caribe las cuales son *O. faveolata*, *O. franksi* y *O. annularis*, todas antes pertenecientes al género *Montastraea* (Budd et al., 2012). Hasta el año 1994, *O. faveolata* y *O. franksi* eran consideradas dentro de la especie *O. annularis*, Por lo tanto, todos los estudios anteriores a ese año no distinguen entre las 3 especies y la información de las poblaciones de cada taxa es difícil de separar (Weil & Knowlton, 1994; Aronson et al., 2008; IUCN, 2022).

En el Caribe su distribución geográfica es muy amplia y abarca desde las costas de Florida (incluyendo las costas del Atlántico occidental), las Bahamas, las Antillas Mayores, las Antillas Menores, Venezuela, Colombia, Panamá, Costa Rica,

Nicaragua, Honduras Belice y México (Weil & Knowlton, 1994; Aronson et al., 2008; IUCN, 2022).

En México, la distribución de *O. faveolata* abarca el Golfo de México (Sistema arrecifal Veracruz-Antón Lizardo y el Banco de Campeche) y el Mar Caribe (al noreste de la Península de Yucatán).

Al igual que *A. palmata*, en el arrecife de Puerto Morelos la distribución de *O. faveolata* está restringida a la zona del arrecife posterior (hacia la laguna arrecifal) y frontal (hacia mar adentro) de la cresta arrecifal y vive en profundidades de 3 a 30 m, con un pico de abundancia de 10 a 20 m de profundidad en la parte del frontal del arrecife, al igual que a lo largo de todas las demás regiones del Caribe (Jordán, 1978; Villinski, 2003; Wellington & Fitt, 2003; Aronson et al., 2008; IUCN, 2022).

3.3.3. Regulación

En México *O. faveolata* está clasificada, de acuerdo a la Modificación del Anexo Normativo III de la NOM-059-SEMARNAT-2010 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicada en noviembre del 2019 como especie amenazada (A) (DOF, 2019; SEMARNAT, 2023).

Según la Lista roja de especies amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (Internacional Union for Conservation of Nature, IUCN) *O. faveolata* se encuentra en peligro de extinción (Endangered=EN), esto quiere decir que enfrenta un riesgo alto de extinguirse en su ambiente natural. En los últimos 40 años sus poblaciones han disminuido más del 50% por enfermedades, blanqueamiento, entre otros factores. Las tasas de mortalidad han excedido a las tasas de crecimiento y reclutamiento. Las amenazas a esta especie han aumentado y se han esparcido a nuevas áreas. Debido a su gran longevidad, bajas tasas de reclutamiento y largos tiempos de regeneración, el alcance de recuperación de las poblaciones es limitado. Si esta tendencia continúa, esta especie podría ser colocada en una categoría de riesgo mayor (Aronson, et al., 2008; IUCN, 2022).

3.3.4. Reproducción

Al igual que *A. palmata*, *O. faveolata* presenta reproducción asexual y sexual y su propagación ocurre principalmente por mecanismos asexuales. Como se mencionó en el caso de *A. palmata*, las especies de coral grandes, suelen invertir más recursos en crecimiento que en reproducción y el tamaño de la colonia es lo que determina la capacidad reproductiva (Szmant, 1986).

Respecto a la reproducción sexual, *O. faveolata* es un coral hermafrodita simultáneo, la reproducción sexual incluye diferentes eventos en serie que son: la gametogénesis (formación de 5-14 huevos por gónada, y 12-24 gónadas por pólipos), la liberación de los gametos del tejido parental en un desove masivo (el cual ocurre de 5-7 días después de la luna llena en los meses de agosto y septiembre), la

fertilización, la embriogénesis y el reclutamiento de las larvas a la población (Szmant, 1986; Wellington & Fitt, 2003; Severance & Karl, 2006; Banaszak, obs. pers.). En Puerto Morelos el desove de las colonias de *O. faveolata* coinciden con las fechas de desove de colonias en otros sitios del Caribe en general, sin embargo, tienden a ser diferentes las horas en que se presenta este evento.

Durante el desove, el cual dura poco menos de una hora, los paquetes de gametos son expulsados por el pólipo, y al ser liberados flotan hasta la superficie del agua, en donde se rompen (con el movimiento del oleaje) y liberan su contenido (huevos y espermias) y ocurre el proceso de fertilización (Szmant, 1986; Villinski, 2003).

3.3.5. Ciclo de vida

Después del desove, los paquetes de gametos liberados de los pólipos flotan hacia la superficie del mar (por el alto contenido de lípidos que tienen) en donde ocurre el proceso de fertilización. El embrión (que mide 100 μm aprox.), después de 24 horas, se desarrolla a larva plánula que no tiene boca y no contiene a su dinoflagelado simbiote. La larva plánula permanece en la superficie antes de asentarse y convertirse en un pólipo primario (metamorfosis) en un sustrato adecuado después de 2-5 días. Posterior a la metamorfosis, la boca y los tentáculos del pólipo han sido formados y el pólipo primario es capaz de adquirir a sus dinoflagelados simbiotes. El pólipo primario ya establecido comienza a multiplicarse asexualmente por gemación o por bipartición, formando, de esta manera, los módulos que a su vez conformarán la unidad orgánica y funcional que es la colonia (Wellington & Fitt, 2003; Severance & Karl, 2006; Banaszak, obs. pers.).

3.4. Asentamiento de larvas y reclutamiento de individuos sexuales

Un paso crítico en el ciclo de vida de los corales es el reclutamiento de los individuos sexuales a la población. El reclutamiento es el resultado de diferentes procesos (de 3 estadios secuenciales del ciclo de vida) que son: disponibilidad de larvas, elección del sustrato adecuado para establecerse, asentamiento al sustrato, metamorfosis (pólipo primario), crecimiento y supervivencia posterior al asentamiento (colonia). Las diferentes estrategias de los corales en los primeros estadios del ciclo de vida (desovadores vs planuladores) sugieren que los requerimientos de hábitat para un reclutamiento exitoso son especie específicos (Szmant, 1986; Ritson-Williams et al., 2010).

El reclutamiento de las larvas pelágicas de organismos sésiles a hábitats bentónicos depende de procesos que funcionan en múltiples escalas espaciales, por ejemplo, a gran escala, actúan las fuerzas hidrodinámicas dispersando las larvas a lugares lejanos de las colonias parentales, y la estructura tridimensional de un lugar (islas, barreras arrecifales, etc.) actúa como barreras ocasionando que ocurra un reclutamiento local. Por otro lado, a menor escala, el reclutamiento es resultado de la respuesta de las larvas a estímulos físicos (cambios de presión, rugosidad del sustrato, intensidad de luz, tasas de sedimentación, temperatura, salinidad, velocidad de corriente, etc.), químicos (inductores químicos que actúan como

señales para el asentamiento, nutrientes, etc.) y biológicos (facilitación / inhibición del asentamiento, competencia, depredación, cercanía de conoespecíficos para aumentar el éxito reproductivo, etc.) (Gleason et al., 2006; Hirose et al., 2008; Nozawa & Harrison, 2008; Ritson-Williams et al., 2010).

Ritson-Williams et al. (2010) estudiaron el efecto negativo (inhibición del asentamiento) y positivo (facilitación del asentamiento) de la presencia de diferentes especies de algas coralinas crustosas en el asentamiento de larvas de *A. palmata* y *A. cervicornis* y encontraron que algunas especies como *Titanoderma prototypum* e *Hydrolithon boergesenii* facilitan el asentamiento, e incluso en *A. palmata* contribuyen a la supervivencia posterior del pólipo, por lo que proponen que la conducta de selección del hábitat durante el asentamiento, es una adaptación que coadyuva a la adecuación de la especie.

Por otro lado, Hirose et al. (2008) encontraron que el neuropéptido de cnidarios Hym-248 actúa como una señal inductora del asentamiento de las larvas y además estimula los cambios fisiológicos que implican la metamorfosis de las larvas a pólipo primario como la formación del celenterón, mesenterios, boca y tentáculos de diferentes especies del género *Acropora*.

La tasa de reclutamiento de individuos sexuales tanto de *A. palmata* como de *O. faveolata* es baja en comparación con otras especies de corales del Caribe como *Favia fragum*, *Porites astreoides* y *Siderastrea radians*, esto se debe a que estos últimos son especies planuladoras (la fecundación y el desarrollo embrionario son internos y liberan a la larva plánula que contiene a su dinoflagelado endosimbionte) y por lo tanto evitan la alta mortalidad larval asociada al desarrollo planctónico e incrementan la oportunidad de encontrar un sustrato adecuado para asentarse. Por otro lado, debido a que las larvas tienen la capacidad de asentarse unas horas después de ser liberadas, pueden asentarse en el mismo hábitat donde las colonias parentales son exitosas (Szmant, 1986; Hirose et al., 2008).

3.5. Radiación Ultravioleta

La Radiación Ultravioleta (UVR) es la parte del espectro electromagnético que se encuentra entre 200 y 400 nm de longitud de onda, esto es por debajo de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) o luz visible. La fuente primaria y natural de la UVR es el Sol. La UVR se divide a su vez en UVC (200-280 nm), UVB (280-320 nm) y UVA (320-400 nm) (Gleason & Wellington, 1995; Kuffner, 2001; Wellington & Fitt, 2003; Gleason et al., 2006; Banaszak & Lesser, 2009).

UVC nunca llega a la biósfera porque la mayoría es absorbida en la atmósfera. UVB se encuentra en pequeñas cantidades en la biósfera, ya que la mayoría es bloqueada por el ozono en la atmósfera y es la forma más destructiva de la UVR ya que tiene suficiente energía para causar daño fotoquímico a la estructura del DNA de las células causando efectos negativos en la salud humana (daño genético, cáncer de piel, posible daño ocular) y en los ecosistemas marinos de los que se hablará posteriormente. UVA es la UVR más común en la biósfera ya que el ozono

atmosférico absorbe una mínima cantidad de esa parte del espectro (Torres et al., 2007; Banaszak & Lesser, 2009; NAS, 2010; Zeman, 2010).

3.5.1. La capa de ozono y la interacción de la UVR con el cambio climático y contaminantes emergentes

La capa de ozono estratosférica (stratospheric ozone layer, SOL) protege a todas las formas de vida del planeta del exceso de la UVR. El ozono es muy dinámico en la atmósfera terrestre (se produce, se destruye y circula) influenciado por una amplia variedad de parámetros (latitud, altitud, temperatura, química atmosférica y el cambio climático, entre otros) (Weatherhead & Andersen, 2006; EEAP, 2019).

A mediados de los años 80, la comunidad científica alertó sobre el agotamiento de la capa de ozono como consecuencia del uso indiscriminado de sustancias agotadoras de ozono (ozone depleting substances, ODS), entre ellos los clorofluorocarbonos (CFCs) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFCs). Entre 1980 y 1995, la SOL se erosionó en una tasa muy elevada (Weatherhead & Andersen, 2006; EEAP, 2019). Esto llevó a que en septiembre de 1987 se firmara por los estados miembros de las Naciones Unidas el protocolo de Montreal, cuyo principal objetivo es la protección de la capa de ozono por medio de la implementación de medidas para controlar la producción mundial y el consumo de ODS, con la finalidad de eliminarlas (UN, 2022). Con ello se esperaba una recuperación de la SOL a los niveles previos a 1980 y por lo tanto una disminución de la radiación UVB durante el siglo XXI, sin embargo, esto no ha ocurrido.

Las razones por la lenta recuperación de la SOL no son bien entendidas aún, pero se cree que algunas de ellas son cambios paralelos en la temperatura y la química atmosférica, la liberación de otras ODS (como el N₂O que es un gas de efecto invernadero), la alta estabilidad de los CFCs y su efecto persistente por décadas, así como la interacción con el cambio climático (Weatherhead & Andersen, 2006; EEAP, 2019).

Además del ozono, hay otros factores (algunos de ellos influenciados por los efectos del cambio climático) que interactúan con la cantidad de UVR que llega a la biósfera, como la cobertura de nubes, los aerosoles en la atmósfera, la cobertura de hielo y nieve en la superficie terrestre, la materia orgánica disuelta (dissolved organic matter, DOM) y la profundidad de la capa superficial mezclada de los cuerpos de agua. La UVR también es determinada por el ciclo solar (de 11 años) y los cambios a largo plazo de la actividad solar (EEAP, 2019). Estas interacciones son complejas y pueden generar incrementos o decrementos en la exposición de los organismos a la UVR, pueden ocurrir en periodos de tiempo cortos o largos y manifestarse en efectos ecosistémicos puntuales o crónicos. Los efectos en los organismos pueden ser directos provocando respuestas conductuales (p. ej. evitar la UVR) o fisiológicas (p. ej. producción de compuestos fotoprotectores o mecanismos de reparación) o indirectos provocando respuestas ecológicas (p. ej. modificación de las relaciones de depredación, competencia o parasitismo, así como el acceso a alimento y a un hábitat óptimo).

Se estima que la mayoría de la UVR que llega a biósfera, entra en los océanos, ya que estos cubren dos terceras partes de la superficie terrestre (Llabrés et al., 2013).

Por último, la UVR también interactúa con los contaminantes biológicos y sintéticos, pudiendo potenciar (foto-activación) o debilitar (foto-degradación o foto-inactivación) sus efectos. Dos contaminantes emergentes de preocupación global que interactúan con la UVR son los compuestos de protectores solares y los microplásticos (partículas de plástico <5 mm de diámetro). Los primeros se utilizan ampliamente en los productos de cuidado personal y son sustancias químicas que absorben o reflejan la UVR y se clasifican comúnmente como orgánicos (p. ej., oxibenzona) e inorgánicos (p. ej. TiO₂ o ZnO) y pueden ser tóxicos para los organismos acuáticos. En cuanto a los microplásticos, son resultado de la exposición y sucesiva fotooxidación de piezas de plástico más grandes. Estudios han revelado que los microplásticos se han integrado en las redes tróficas de los ecosistemas marinos y costeros, convirtiéndose en una amenaza potencial para su salud (EEAP, 2019).

Por todo lo anterior, se deduce que es complejo estimar las proyecciones futuras en la cantidad de UVR que llegará a la biósfera. Sin embargo, algunos estudios estiman que aumentará. MacKenzie et al. (2011) encontraron que en latitudes bajas, el flujo de UVB puede aumentar en un 2-3%, mientras que Bais et al. (2011) mencionaron que algunas simulaciones de modelos han estimado para finales del siglo XXI un incremento en la UVR del 4% en regiones tropicales donde la UVR es más elevada debido al adelgazamiento de la SOL y al ángulo de incidencia solar. Dado a que estos modelos se estiman considerando las proyecciones de escenarios de cambio climático (cambios en la cobertura de nubes y en la emisión de gases de efecto invernadero), deben ser interpretados con cautela (Weatherhead & Andersen, 2006; Llabrés et al., 2013; IPPC, 2021).

3.6. Efectos de la UVR en el asentamiento de larvas de coral

La intensidad de luz es el principal factor determinante en la elección del microhábitat durante el asentamiento de larvas pelágicas de muchos invertebrados sésiles y tiene una naturaleza ambivalente, ya que, por un lado, los corales hermatípicos para aumentar su adecuación requieren luz para realizar el intercambio de productos fotosintéticos con sus dinoflagelados endosimbiontes y para estimular la calcificación y crecimiento del esqueleto, sin embargo el acceso a sustratos bien iluminados también puede ser nocivo, ya que representa una fuerte presión de selección porque implica competencia por espacio con macroalgas, ser enterrado por sedimentos, estar expuesto al pastoreo de peces e invertebrados, así como la sobre exposición a la luz y los daños que algunas longitudes de onda de ella provocan (Babcock & Mundy, 1996; Kuffner, 2001; Bruckner, 2002; Villinsky, 2003; Gleason et al., 2006; Banaszak & Lesser, 2009).

Desde hace algunas décadas es conocido que la UVR tiene un efecto negativo en los organismos que habitan en los arrecifes coralinos, ya que a pesar de que su

irradiancia es baja, menos del 5% del espectro electromagnético (UVR, PAR e IR), los protones de alta energía de estas longitudes de onda corta pueden provocar graves efectos biológicos como contribuir al blanqueamiento que afecta a los corales desde inicios de los años 80, causar daño en la estructura del DNA y proteínas, puede inhibir el crecimiento del esqueleto del coral por el decremento en la fijación de carbono, inhibir la fecundidad en corales y tener un detrimento en el desempeño fotosintético del dinoflagelado simbiote de los corales, debido a que en especies fotoautótrofas la UVR puede foto-oxidar la clorofila ya que induce la formación de especies de oxígeno reactivas (reactive oxygen species, ROS), interrumpir algunos procesos fotosintéticos (como el transporte de electrones del centro de reacción del fotosistema II), afectar la estabilidad de los pigmentos en algas marinas, disminuir tasas de crecimiento algal y reducir la concentración de pigmentos fotosintéticos (Lesser, 2000; Torres et al., 2007; Banaszak & Lesser, 2009; Zhou et al., 2016; Zhou et al. 2017; Baird et al., 2021).

En las regiones tropicales la cantidad de UVR es mayor que en altas latitudes debido a que el ángulo del cenit del sol es menor y al adelgazamiento natural y antropogénico de la capa de ozono. Las variaciones en la irradiancia de la UVR en latitudes bajas no son muy significativas en términos de estacionalidad, sin embargo, sí son afectadas por cambios en la cobertura de nubes, aerosoles (CFC) y contaminación atmosférica (Banaszak & Lesser, 2009).

La transparencia de la columna de agua ocasionada por la baja concentración de material suspendido y disuelto (plancton, sedimentos y detritos) es característica de las aguas circundantes de los arrecifes coralinos. Por lo que la cantidad de UVR que penetra en el agua es muy alta y alcanza profundidades de hasta más de 20 m, pudiendo ocasionar daño en los organismos marinos como los corales, (Gleason & Wellington, 1995; Lesser, 2000; Kuffner, 2001; Wellington & Fitt, 2003; Gleason et al. 2006; Torres et al., 2007; Banaszak & Lesser, 2009, Llabrés et al., 2013; Zhou et al., 2016).

A pesar de lo anterior, los corales y otros cnidarios que establecen relaciones endosimbióticas con dinoflagelados fotosintéticos, han habitado en aguas cristalinas y de latitudes tropicales desde hace millones de años, por lo que su éxito en estos ambientes se puede deber a la capacidad que tienen de tolerar la UVR (Torres et al., 2007).

Debido al alto contenido de lípidos (lo que les confiere flotación positiva), los huevos y larvas de corales pasan los primeros días de vida en la superficie del agua lo que aumenta significativamente el riesgo de sufrir daño debido a la exposición excesiva a la UVR (Wellington & Fitt, 2003).

Wellington & Fitt (2003) han reportado que una de las posibles causas de la reducida tasa de reclutamiento de varias especies de corales escleractínios del Caribe es el elevado nivel de UVR por las condiciones de calmas ecuatoriales, las cuales son comunes durante la temporada de desove y formación de la larva plánula.

Los mismo autores antes mencionados, estudiaron la relación entre el origen (profundidad en la que habita la colonia parental) y la supervivencia de las larvas de corales desovadores de 3 especies de corales del Caribe (*Montastraea annularis*, *M. franksi* y *A. palmata*). Lo que encontraron fue que hay una relación entre la profundidad en que habita la colonia parental y la sensibilidad de la larva a la exposición de UVR, la cual está determinada por la cantidad de compuestos que tienen la capacidad de absorber UVR conocidos como Aminoácidos parecidos a Micosporinas (Mycosporine-like Aminoacids, MAAs) de los que se hablará más adelante. Además de lo anterior, observaron que las larvas no expuestas a la UVB presentaban mayor supervivencia, así como una mayor actividad de nado, en comparación con aquellas expuestas a todo el espectro de longitud de onda de la luz natural (UVB+UVA+PAR), demostrando que UVB tiene un efecto nocivo tanto en la supervivencia como en el comportamiento de nado de las larvas.

Por otro lado, Gleason et al. (2006) encontraron que las larvas del coral hermatípico del Caribe *Porites astreoides* tiene la capacidad de detectar y evitar hábitats cuyos niveles de UVR pueden ocasionar daño biológico, lo cual está relacionado directamente con el reclutamiento exitoso de dichas larvas.

Los corales y otros cnidarios simbióticos tienen la capacidad de minimizar los efectos negativos de la UVR mediante compuestos bloqueadores de UVR llamados Aminoácidos parecidos a Micosporinas (Mycosporine-like aminoacids, MAAs) los cuales actúan como un filtro que brinda protección de longitudes de onda de alta energía como la región UV del espectro electromagnético. Los MAAs absorben radiación con un intervalo de longitud de onda de 289-380 nm con un pico de absorción de 309-360 nm. Además, algunos MAAs actúan como antioxidantes para contrarrestar los efectos del estrés foto-oxidativo de algunas especies de oxígeno reactivas. Actualmente se conocen 20 diferentes MAAs de organismos marinos (Gleason & Wellington, 1995; Kuffner, 2001; Banaszak et al., 2006; Gleason et al., 2006; Torres et al., 2007; Banaszak & Lesser, 2009).

Los MAAs son producidos por las células de los dinoflagelados endosimbiontes a través de una serie de reacciones químicas conocidas como ruta Shikimate y posteriormente son transportados y conservados en los tejidos del coral adulto. Sin embargo, en el estudio realizado por Wellington & Fitt (2003) se afirma que los MAAs contenidos en los huevos y las larvas son adquiridos directamente de los padres, ya que los dinoflagelados endosimbiontes son adquiridos posteriormente al asentamiento y metamorfosis (Wellington & Fitt, 2003; Gleason et al., 2006; Torres et al., 2007).

Estudios como los de Wellington & Fitt (2003) y Torres et al. (2007) han reportado que al disminuir la UVR que incide sobre diferentes especies de corales, la concentración de MAAs disminuye significativamente y viceversa. Además, Torres et al. (2007) encontraron que las tasas de crecimiento lineal y la densidad del esqueleto están correlacionadas negativamente con el incremento de la UVR en *A. cervicornis*, así como la concentración de pigmentos fotosintéticos, ya que encontraron que colonias de *A. cervicornis* originarias de 20 m de profundidad,

perdían pigmentos fotosintéticos y sufrían eventos de blanqueamiento al ser transplantadas a 1 m de profundidad, sin embargo, según los resultados de su estudio, la pérdida de pigmento no está relacionada con la expulsión de las células de *Symbiodinium*.

Wellington & Fitt (2003) encontraron que la cantidad de MAAs está directamente relacionada con la supervivencia de las larvas de algunas especies de corales escleractínios del Caribe y que los reclutas exitosos, provienen de larvas generadas por colonias de aguas someras, cuya concentración de MAAs es mayor en relación a las colonias provenientes de aguas profundas, es decir, los niveles de MAAs son heredados de la colonia parental.

4. MÉTODOS

Se llevaron a cabo una serie de experimentos en las temporadas de reproducción en 2010 y 2011 con larvas de *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata* para determinar el efecto de la radiación ultravioleta en el asentamiento de las larvas y de la preferencia de sitio de asentamiento de ambas especies (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de los experimentos realizados para determinar el efecto de la radiación ultravioleta (UVR) en larvas de coral.

Año	Fechas de experimentación	Especie	Fecha del desove	Hora del desove	Experimento
2010	4 al 28 de ago.	<i>Acropora palmata</i>	30 de jul.	21:40*	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral Preferencia de sitio de asentamiento
2010	1 al 25 de sep.	<i>Orbicella faveolata</i>	30 de ago.	22:45*	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral Preferencia de sitio de asentamiento
2011	22 de ago. al 2 de sep.	<i>A. palmata</i>	18 de ago.	21:30*	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral
2011	20 de sep. al 1 de oct.	<i>O. faveolata</i>	18 de sep.	22:30*	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral

*GMT-5h

4.1. Colecta de gametos

Se determinaron las fechas de los desoves basándose en la literatura sobre la biología reproductiva de *A. palmata* y *O. faveolata* en otras áreas del Caribe, así como, en la experiencia obtenida en los años 2007 al 2009 en “La Bocana Chica” ubicada en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. Las colonias de *A. palmata* de las que provenían los gametos se encontraban entre 1-3 m de profundidad y las colonias de *O. faveolata* a ~5 m de profundidad.

Se colectaron huevos y espermias con redes diseñadas para atrapar los paquetes de gametos ya que flotan una vez que han sido expulsados (Figura 1A y B).



A



B

Figura 1. Colocación de redes de colecta de gametos sobre una colonia de *Acropora palmata* (A) y una colonia de *Orbicella faveolata* (B). Foto A tomada por Donald Martínez Vázquez, Foto B tomada por Edgar Escalante Mancera.

4.2. Fertilización *ex situ* y desarrollo embrionario

Los paquetes de gametos colectados fueron llevados a la embarcación en donde se llevó a cabo el proceso de fertilización *ex situ*. Esto se obtuvo mezclando con movimientos suaves los paquetes de gametos, con el objetivo de romperlos para poder liberar los gametos y lograr el proceso de fertilización.

En 2010, los gametos de cada colonia se colocaron en una hielera con agua de mar filtrada (AMF) hasta 1 μm y se mezclaron cuidadosamente para iniciar el proceso de fertilización por 1 hora. Al terminar la hora se hicieron varios cambios de AMF completos para eliminar los espermias excedentes, depredadores y otros contaminantes. La muestra se fraccionó en 12 sistemas de cultivo diseñados para asegurar la máxima supervivencia de larvas (Figura 2), para ello los sistemas de cultivo fueron mantenidos a 28 °C.

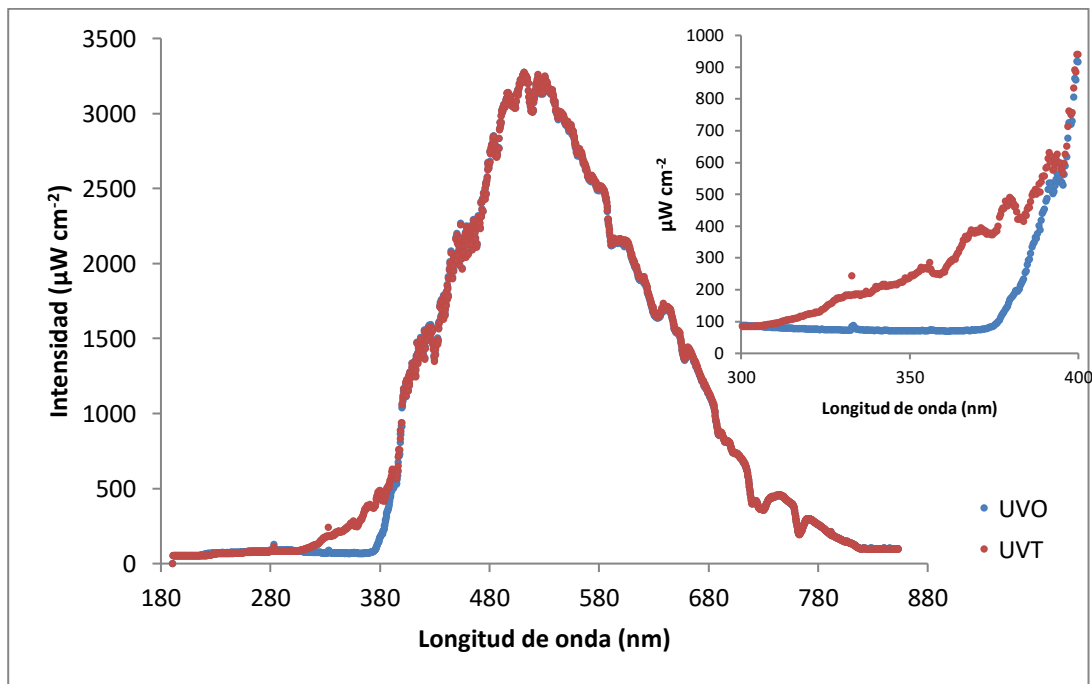


Figura 2. Sistemas de cultivo de embriones de *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata*. Foto tomada por Anastazia T. Banaszak.

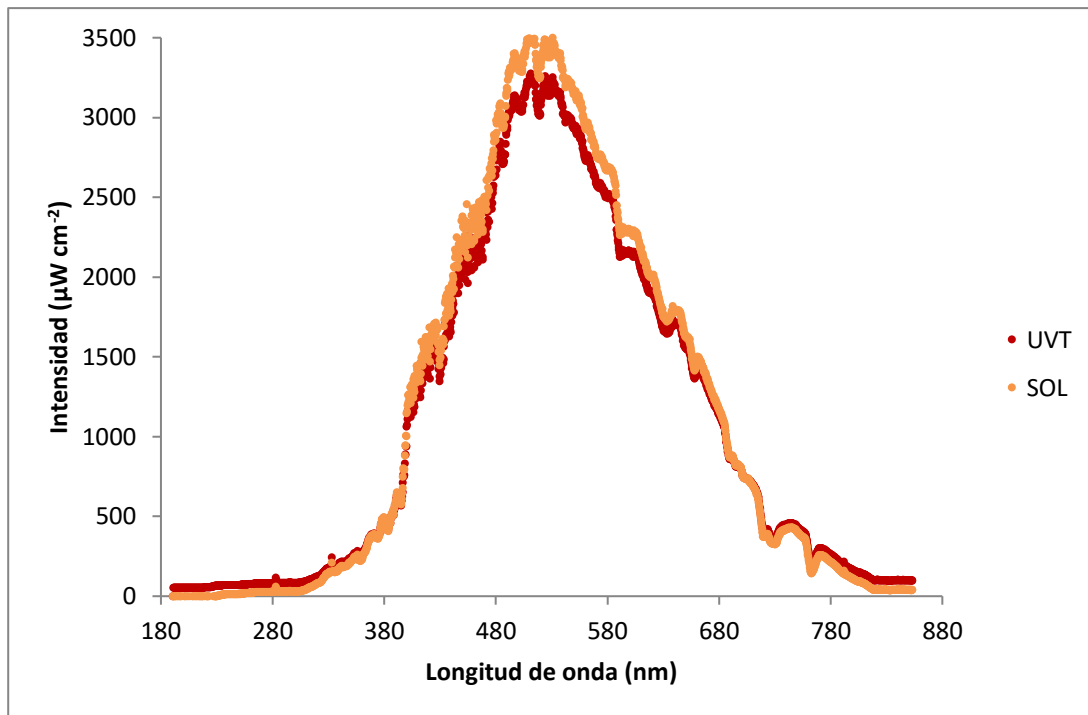
En el 2011 se usaron las mismas técnicas para la colecta de los gametos, la fertilización *ex situ* y el desarrollo embrionario, con la diferencia que el AMF fue esterilizada (AMFE) con una lámpara de luz UV y que los embriones fueron colocados en tanques en el exterior y expuestos a radiación solar atenuada con malla sombra, con el fin de aclimatar a los individuos a esas condiciones.

4.3. Caracterización de campo lumínico durante los experimentos

Los experimentos fueron realizados en contenedores de acrílico cuyas superficies superiores eran de 2 diferentes tipos de acrílico. El primer tipo de acrílico opaco a la UVR (Plexiglas G UF-3, corte nominal (50%) a 390 nm) de 4 mm de grosor bloquea al UVB y la mayoría del UVA para establecer el tratamiento UVO, mientras que el segundo tipo de acrílico es transparente a la UVR (Plexiglas G UVT, corte nominal (50%) a 282 nm) de 6 mm de grosor para establecer el tratamiento UVT. El espectro solar representativo al que estaban expuestas las larvas de coral bajo los dos tipos de acrílicos se muestra en la Figura 3A. En la Figura 3B se muestra la comparación entre el espectro solar y el espectro que pasa a través del acrílico UVT, esto con la intención de saber si los acrílicos UVT dejan pasar el espectro solar en su totalidad. Como se observa en esta última figura, el espectro UVT es menor a ~500 nm, permitiendo el paso del 96 % de la irradiancia, es decir, se pierde 4 % de la irradiancia solar al pasar a través de UVT.



A



B

Figura 3. Espectro de radiación solar medida a través de un acrílico que no permite el paso de la mayoría de la UVR para dar el tratamiento UVO (azul) y un acrílico que permite la transmisión de la UVR para dar el tratamiento UVT (rojo). Se muestra el espectro con mayor resolución en la banda de la UVR en la parte superior derecha de la figura principal (A) y comparación del espectro solar (naranja) y el espectro solar que pasa a través de UVT (rojo) (B).

Se calculó la atenuación de la radiación fotosintéticamente disponible (PAR, 400 a 700 nm) debido a la presencia de los dos diferentes tipos de acrílico utilizados (UVO y UVT respectivamente), en estos experimentos. Estas mediciones se realizaron con un espectroradiómetro tipo Ocean Optics USB2000.

Para todos los experimentos se cuantificó la cantidad de PAR. En los experimentos “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)” y “Preferencia de sitio de asentamiento” se usó un sensor plano corregido por coseno (LI 190) conectado a un data logger (LiCor LI-1400). Se midió y promedió la PAR ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$) cada 5 min de 05:00 a 20:00 h. Con estos datos se obtuvo la dosis diaria de PAR ($\text{mol fotones m}^{-2} \text{día}^{-1}$). Para poder calcular las proporciones de PAR:UVA:UVB diarias se utilizó el Software Zenith A (Solar Radiation Model Spreadsheet by J. Cullen & M. Lewis) y con base en ello y los datos atmosféricos de la cantidad de ozono (Total Ozone Mapping Spectrometer) (McPeters, 2011) y la presión (WUI, 2011), se obtuvieron los valores teóricos de la UVA y UVB.

Para el experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)” se usaron los datos del piranómetro de la Estación Meteorológica de la UASA, UNAM (LI 200) conectado a un data logger (LiCor LI-1400) para medir y

promediar la radiación solar (cada 15 min de 00:00 a 23:45 h diariamente) y del espectroradiómetro (Ocean Optics USB2000) con el cual también se midió y promedió la PAR ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) cada 5 min de 05:00 a 20:00 h. Con estos datos se obtuvo la dosis diaria de PAR ($\text{mol fotones m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y se calcularon las proporciones de PAR:UVA:UVB de la misma forma descrita anteriormente.

4.4. Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)

En 2010, se colocaron 500 larvas de coral en contenedores de acrílico de 30 x 30 x 10 cm capaces de contener un volumen de agua de 9 l. En este experimento se usaron en total 6 contenedores de acrílico: 3 contenedores fueron cubiertos con acrílicos UVO para determinar el efecto en el asentamiento en ausencia de UVR y 3 contenedores se cubrieron con acrílicos UVT para determinar el efecto en el asentamiento en presencia de UVR.

Los contenedores de acrílico fueron colocados en pares (UVO y UVT) en 3 tanques con agua de mar con flujo continuo para mantener la temperatura relativamente constante entre 26 y 27.5 °C. La temperatura fue registrada durante todos los experimentos, cada 15 min, con dispositivos HOBO. Con el baño de agua con flujo continuo se logró que la temperatura de los contenedores de acrílico fuera de ~27.5 a 29 °C.

4.4.1. *Acropora palmata*

Para el caso de *A. palmata*, cada contenedor de acrílico UVO y UVT contenía 25 tapones de concreto diseñados para el asentamiento de larvas, acondicionados biológicamente durante 15 días en un tanque con agua de mar con flujo continuo (Figura 4).

Se determinó la irradiancia a la que estaba expuesto cada uno de los tapones usando el sensor plano para medir PAR del Diving PAM (Heinz Walz, Effeltrich, Alemania) cada 90 min de 06:30 a 17:00 h CTD en un día soleado.

4.4.2. *Orbicella faveolata*

En el caso de *O. faveolata* cada contenedor de acrílico contenía 16 azulejos de 5 x 5 cm, acondicionados biológicamente durante un mes en la laguna arrecifal de Puerto Morelos y se colocó malla sombra para filtrar la irradiancia hasta 50%.

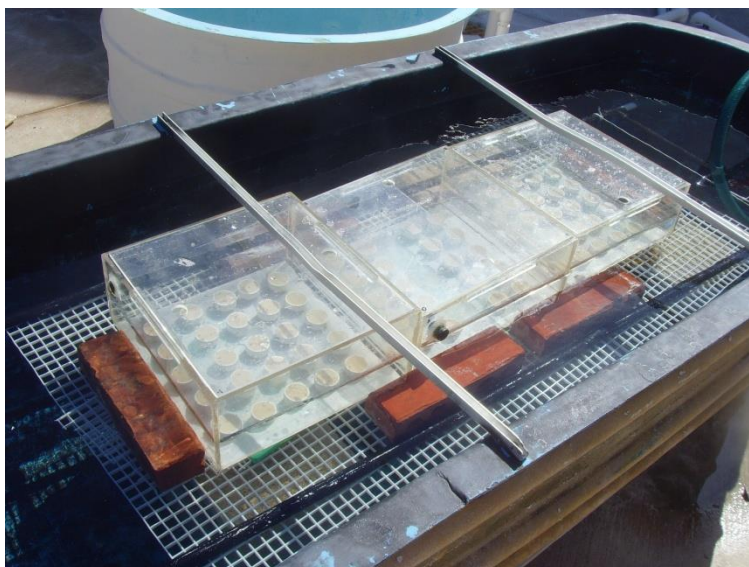


Figura 4. Montaje experimentos en 2010 de *Acropora palmata*.

4.5. Preferencia de sitio de asentamiento

Para determinar la preferencia del sitio de asentamiento se usaron en total 3 contenedores de acrílico (con las mismas dimensiones descritas en la sección 4.4) en donde se cubrió la mitad de los contenedores con acrílico UVO y la otra mitad con UVT. Se colocaron 500 larvas en cada uno de los 3 contenedores con AMF. Cada contenedor de acrílico fue colocado en uno de los 3 tanques con agua de mar con flujo continuo antes descrito al mismo tiempo que el experimento descrito en la sección 4.4. En el caso de *A. palmata* cada contenedor contenía 20 tapones de concreto también acondicionados biológicamente durante 15 días en agua de mar con flujo continuo. En el caso de *O. faveolata* cada contenedor de acrílico contenía 16 azulejos de 5 x 5 cm, acondicionados biológicamente durante un mes en la laguna arrecifal de Puerto Morelos y se colocó malla sombra con luz de malla del 50%.

4.6. Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)

En este experimento se buscó disminuir la variabilidad encontrada en los datos de los experimentos del 2010. Para ello se cambió el diseño experimental para aumentar el número de réplicas, las cuales tenían menor número de individuos para un mejor manejo de las mismas. Los embriones fueron colocados en un tanque en el exterior expuesto a la radiación solar atenuada con malla sombra para filtrar la irradiación hasta 50%, con la finalidad de aclimatar a los individuos y evitar la alta mortalidad ocurrida en los experimentos del 2010.

Se utilizaron recipientes redondos de plástico de 265 ml a los que se les colocó 50 ml de mezcla de cemento blanco con arena (proporción 1:1) en agua de mar. Al endurecerse el cemento los recipientes de plástico fueron acondicionados biológicamente durante 3 semanas en un tanque con agua de mar con flujo

continuo. Se utilizaron en total 24 recipientes de plásticos, a los cuales se les colocaron 150 larvas en cada uno en AMFE. 12 contenedores fueron cubiertos con acrílico UVO y 12 cubiertos con acrílico UVT. Los recipientes de plástico fueron colocados en pares (UVO y UVT) en 12 cajas de plástico con un volumen de 10 l con agua de mar con flujo continuo (2.5 l por minuto) que a su vez se colocaron en un tanque con agua de mar con flujo continuo (Figura 5) para tener un sistema de doble amortiguamiento para mantener la temperatura relativamente constante. La temperatura fue registrada durante todo el experimento cada 5 min con dispositivos HOBO, con este doble baño de agua con flujo continuo se logró que la temperatura de los recipientes, en donde se encontraban las larvas, se mantuviera entre ~27 a 28.5 °C.

Para el montaje del experimento con *O. faveolata* ya no se utilizó malla sombra, esto para tener la cantidad y calidad de luz natural que llega a la superficie, y que la respuesta se centrara en el factor de interés que es la presencia o ausencia de UVR.



Figura 5. Montaje experimental para determinar el efecto de la UVR sobre asentamiento de larvas de *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata* en 2011.

4.7. Cuantificación de asentamiento

Diariamente se cuantificó el número de individuos asentados (conteos nocturnos) y cada 2 días el número de individuos en superficie, para determinar el número de individuos asentados y el tiempo de asentamiento de las larvas en los experimentos “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)” y “Preferencia de sitio de asentamiento”. Para el experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)” se cuantificaron cada 12 h. (a las 08:00 y a

las 20:00 h CDT) el número de individuos asentados, el número de individuos en la columna de agua y el número de individuos en la superficie. La diferencia entre el número inicial de individuos, y el número de individuos asentados, en columna de agua y en superficie, se consideró como mortalidad, ya que las larvas de coral generalmente se lisan después de haber muerto (Baird et al. 2021).

Los conteos nocturnos se realizaron con ayuda de una lámpara de luz azul (Nightsea Blueblock, USA) y lentes con filtro amarillo para facilitar la visualización de las larvas, ya que bajo estas condiciones es posible observar la fluorescencia de estas.

4.8. Análisis Estadísticos

Las comparaciones estadísticas entre el asentamiento de las larvas de coral y los tratamientos de luz fueron realizadas por medio de una prueba U de Mann-Whitney usando el programa STATISTICA™ y un nivel de significancia de 0.05.

Para el experimento “Efecto de la UVR sobre asentamiento de larvas de coral (2010)” de *A. palmata* en el cual si hubo diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tratamientos (UVO y UVT), se determinó la variación en la distribución de los datos entre los contenedores de cada tratamiento (o réplicas), así como dentro de cada uno de los 3 contenedores de acrílico por tratamiento (tanto en los tapones como en la superficie del fondo de los contenedores que fueron los lugares en donde se asentaron los individuos). La superficie del fondo de los contenedores de acrílico fue dividida en 5 secciones para determinar si hay preferencias para el sitio de asentamiento basado en la luz (Figura 6).

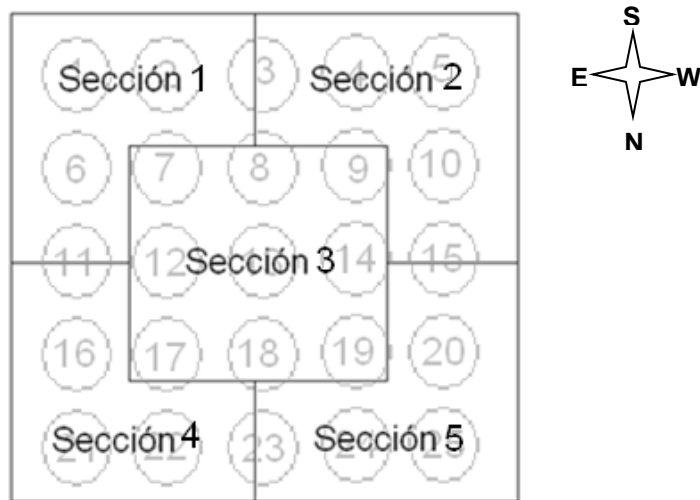


Figura 6. Secciones en las que se dividieron los contenedores de acrílico y orientación geográfica.

Como las condiciones dentro de cada de uno de los contenedores de acrílico eran heterogéneas se realizó una correlación lineal para determinar la relación entre la intensidad luminosa y el número de individuos asentados.

5. RESULTADOS

5.1. Caracterización del campo lumínico y monitoreo de la temperatura durante los experimentos

Como se mencionó anteriormente (sección 3.4), existen factores biológicos (bióticos) y físicos y químicos (abióticos) que determinan la elección del sitio de asentamiento de las larvas de coral. Los factores abióticos considerados en los experimentos que se realizaron para la elaboración de este trabajo fueron el campo lumínico (exposición diaria a la radiación solar) y la temperatura. Los valores de estos parámetros en cada uno de los experimentos se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Exposición diaria a la radiación solar en los distintos experimentos.

Año	Especie	Experimento	Temp. (°C)-	Exposición diaria a la radiación solar		
				PAR*	UVA+	UVB+
2010	<i>A. palmata</i>	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral	26.50 ± 0.44	46.51 ± 7.63	1.15 ± 0.19	0.06 ± 0.01
		Preferencia de sitio de asentamiento	26.50 ± 0.44	46.51 ± 7.63	1.15 ± 0.19	0.06 ± 0.01
2010	<i>O. faveolata</i>	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral	26.35 ± 0.33	40.05 ± 11.68	0.98 ± 0.29	0.05 ± 0.02
		Preferencia de sitio de asentamiento	26.35 ± 0.33	40.05 ± 11.68	0.98 ± 0.29	0.05 ± 0.02
2011	<i>A. palmata</i>	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral	26.5 ± 0.27	33.71 ± 5.56	0.82 ± 0.14	0.04 ± 0.01
2011	<i>O. faveolata</i>	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral	26.5 ± 0.32	37.76 ± 7.46	0.92 ± 0.18	0.05 ± 0.01

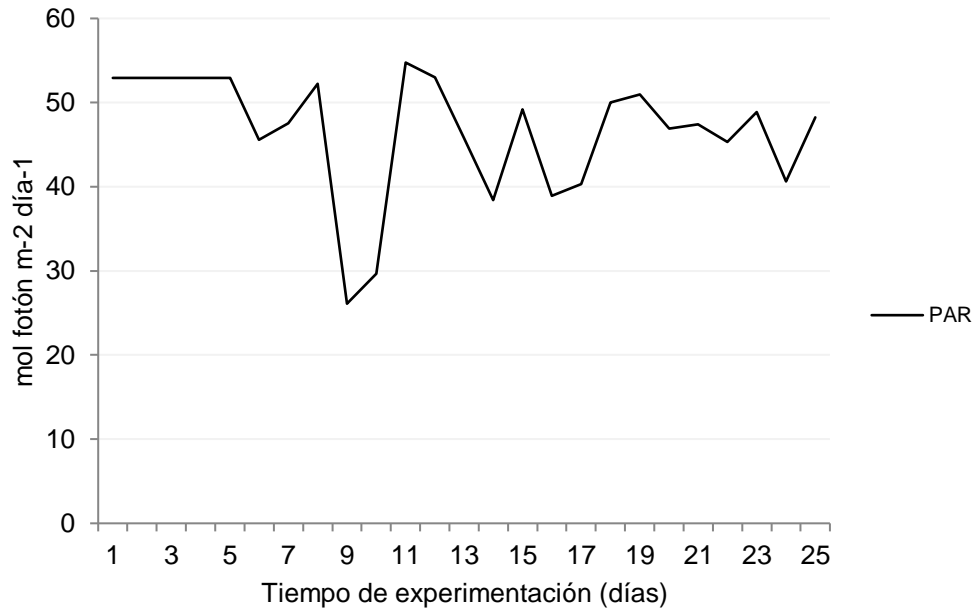
- Media ± DE

*Mol fotones m⁻² día⁻¹, Media ± DE

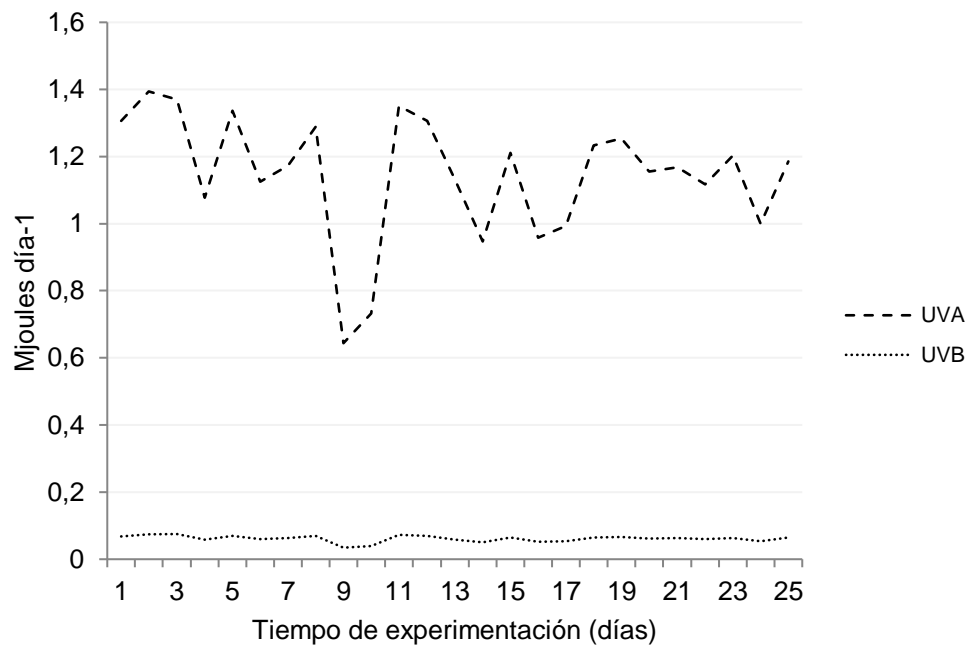
+MJoules día⁻¹, Media ± DE

Como se detalla en la sección 4.3, los datos de PAR fueron cuantificados y los datos UVR fueron estimados.

En las Figura 7-10 se muestra la exposición diaria a la radiación solar (PAR y UVR) durante el periodo experimental del 2010 y del 2011 tanto de *A. palmata* como de *O. faveolata*.

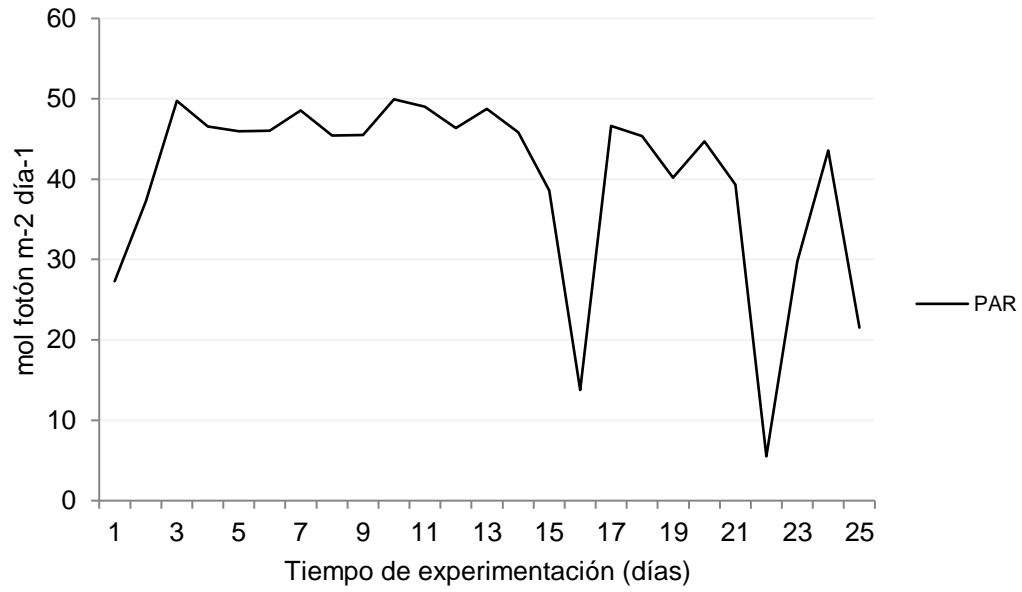


A

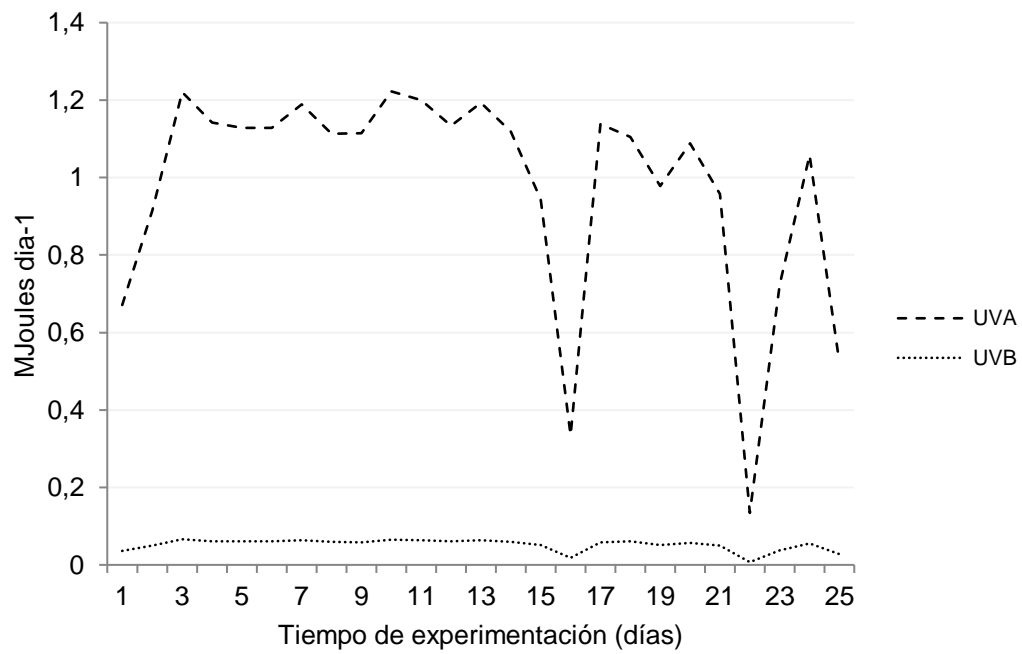


B

Figura 7. Registros de exposición diaria a la PAR (A) y a la UVR (B) de los experimentos "Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral" y "Preferencia de sitio asentamiento" de *A. palmata* tomados durante el periodo del 4 al 28 de agosto del 2010.

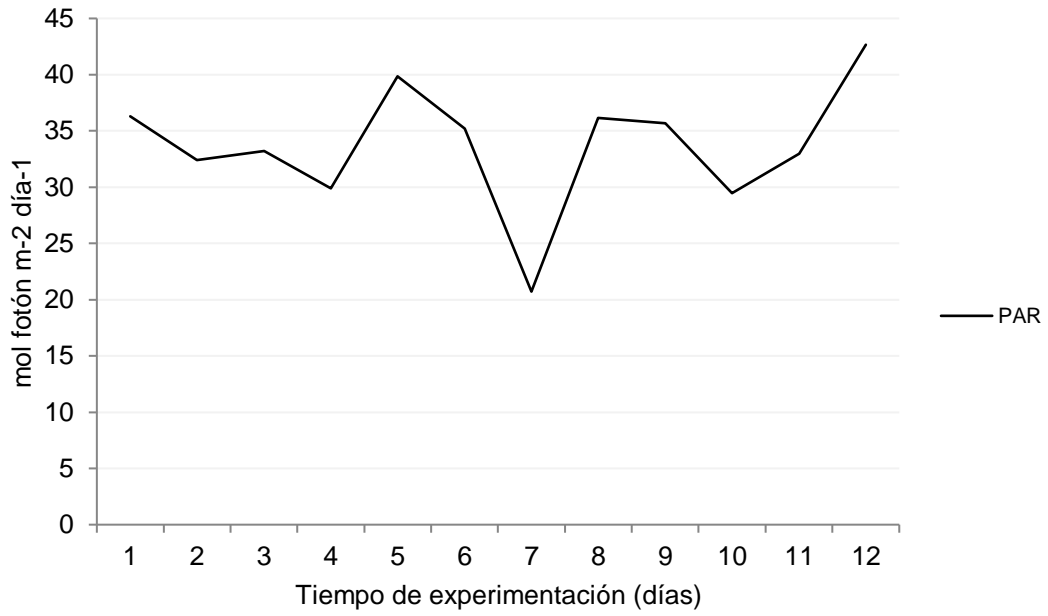


A

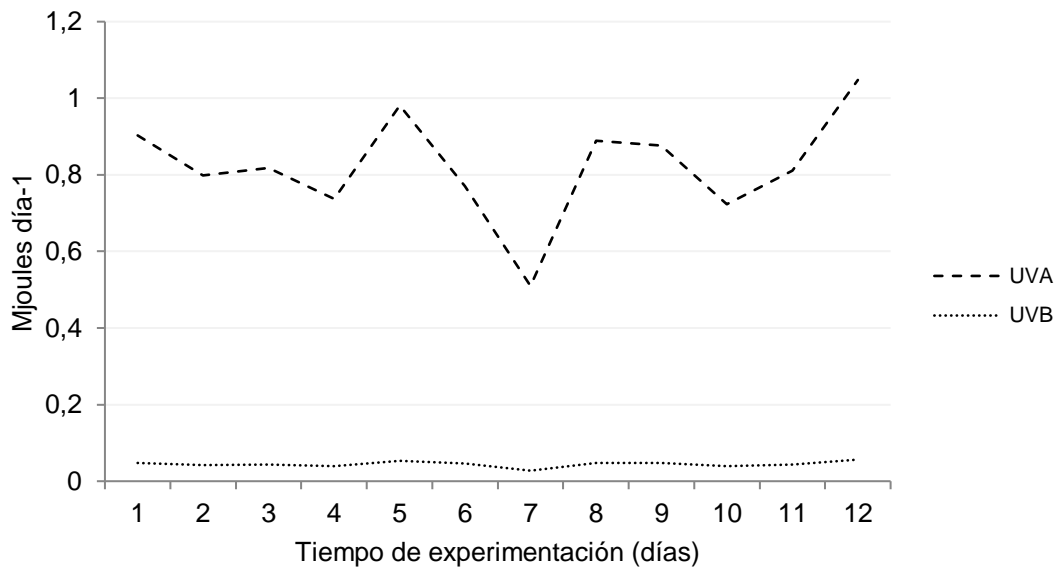


B

Figura 8. Registros de exposición diaria a la PAR (A) y a la UVR (B) de los experimentos "Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral" y "Preferencia de sitio asentamiento" de *O. faveolata* tomados durante el periodo del 1 al 25 de septiembre del 2010.

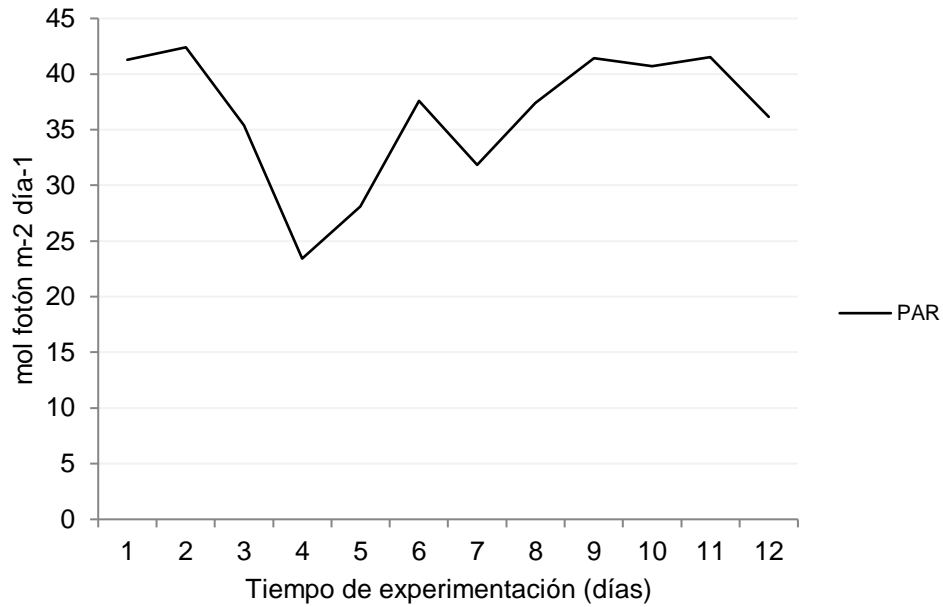


A

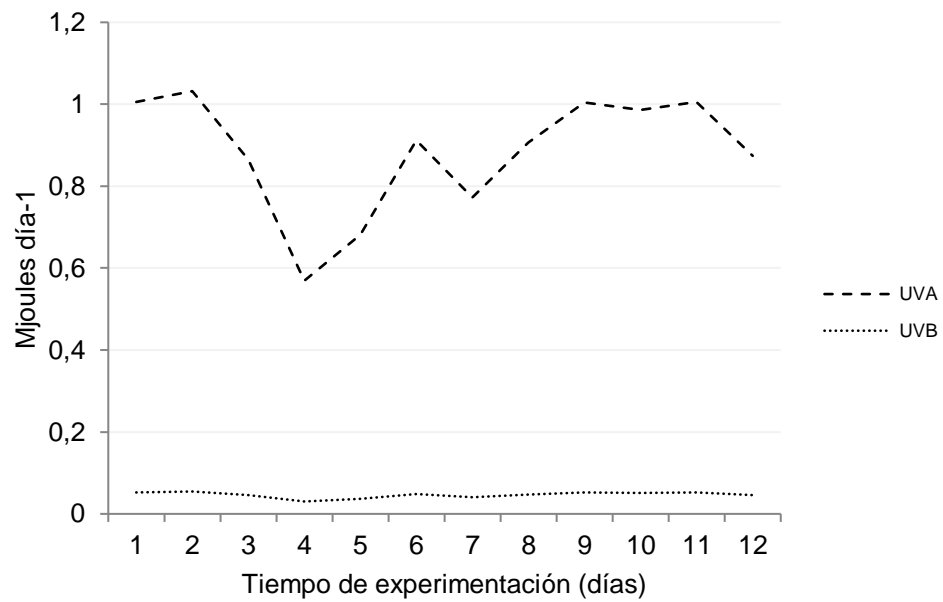


B

Figura 9. Registros de exposición diaria a la PAR (A) y a la UVR (B) del experimento "Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral" de *A. palmata* tomados durante el periodo del 22 de agosto al 2 de septiembre del 2011.



A



B

Figura 10. Registros de exposición diaria a la PAR (A) y a la UVR (B) del experimento "Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral" de *O. faveolata* tomados durante el periodo del 20 de septiembre al 1 de octubre del 2011.

En el caso de la exposición diaria a la radiación solar, los valores más bajos se deben a días nublados y/o mal tiempo ocasionados por depresiones y tormentas tropicales características de los meses de verano.

5.2. Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)

5.2.1. *Acropora palmata*

En este experimento la comparación entre el número de individuos asentados en UVO es menor que el número de individuos asentados en UVT. En la Figura 11 se puede observar que las medianas de los tratamientos UVO y UVT son significativamente diferentes con un nivel de significancia del 95% (Prueba U de Mann-Whitney $p= 0.04953$), excepto en los días 2, 4 y 5 donde $p>0.05$ y se ve en el gráfico como sus intervalos se sobrelapan.

A partir del día 7 el número de individuos asentados comienza a disminuir.

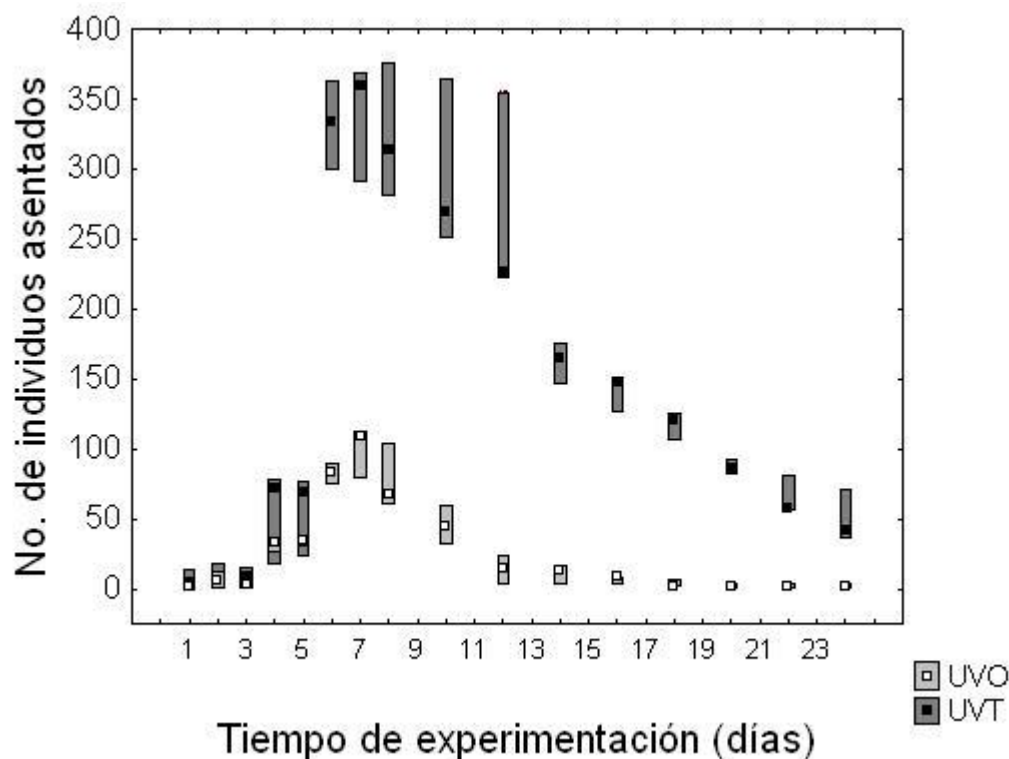


Figura 11. Comparación entre tratamiento UVO y UVT en *Acropora palmata* (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

Dentro de cada uno de los contenedores de acrílico, los individuos se asentaron tanto en los tapones de cemento como en la superficie del fondo del contenedor de acrílico, la cual fue dividida en 5 secciones (Figura 6).

El número de individuos asentados por tapón en el día 7 (día en el que ocurrió el mayor asentamiento) para el tratamiento UVO fue de 1.36 ± 0.2 (media \pm DE) y para

el tratamiento UVT fue de 2.45 ± 0.95 . Hay más dispersión de los datos en el tratamiento UVT, ya que hay tapones con ningún individuo asentado y otros tapones hasta con 13 individuos asentados. En el tratamiento UVO este intervalo varía entre 0 hasta 7 individuos asentados (Figura 12). En las réplicas de cada tratamiento no hubo diferencias significativas. Sin embargo, si hubo diferencias en cómo se asentaron los individuos en los tapones, es decir, dentro del contenedor.

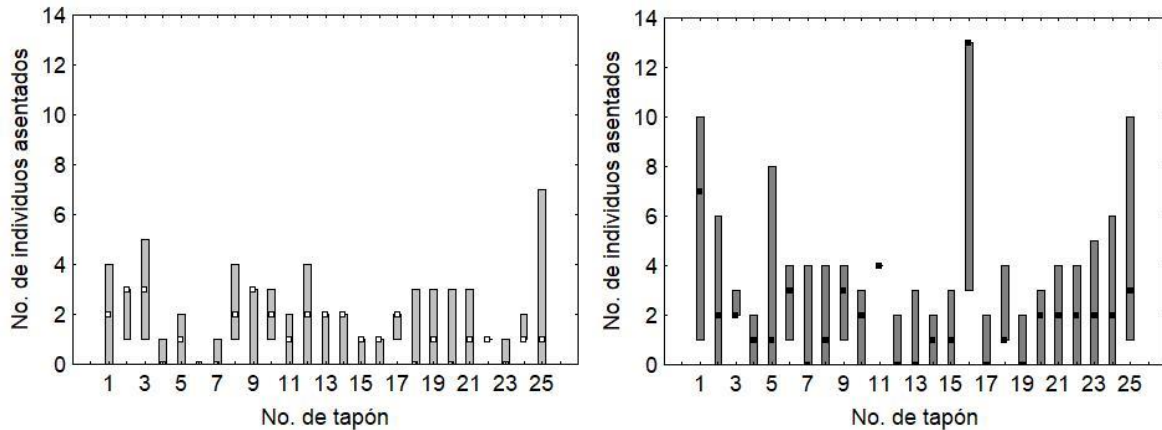


Figura 12. Distribución de los datos de asentamiento de los contenedores UVO (izquierda) y UVT (derecha) en cada tapón (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

El número de individuos asentados por sección durante el día 7 para el tratamiento UVO fue de 13.2 ± 4.79 y para el tratamiento UVT fue de 55.73 ± 27.65 . Otra vez encontramos mayor dispersión de los datos en UVT con valores mínimos de 20 y máximos de 116 individuos asentados por sección, mientras que para el caso de UVO el valor mínimo es de 0 y el máximo es de 31 individuos asentados por sección. En las réplicas de los tratamientos UVO y UVT no se encontraron diferencias significativas.

Respecto al número de individuos que se asentaron en cada una de las secciones de los contenedores, en el tratamiento UVO no se encontraron diferencias significativas en, mientras que en UVT se puede ver que la sección 4 es en donde ocurrió el mayor número de individuos asentados (Figura 13).

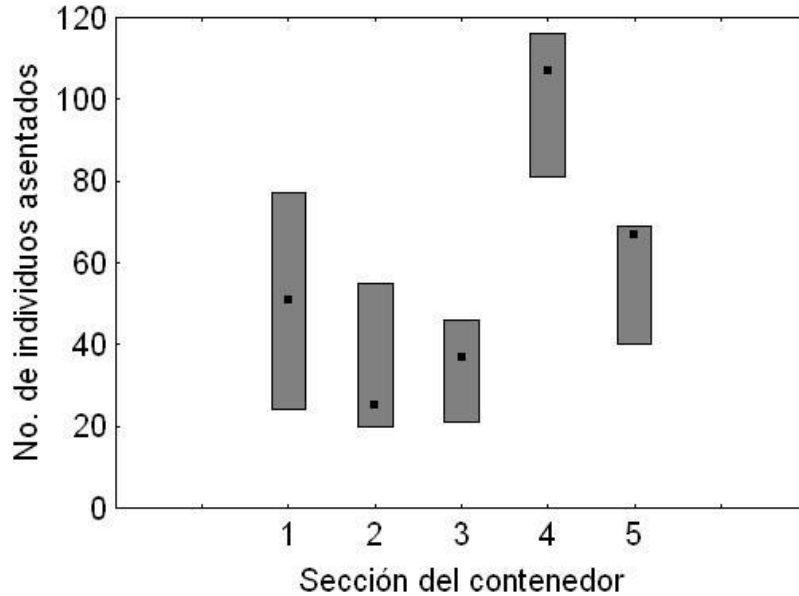


Figura 13. Distribución de los datos de asentamiento en cada sección del fondo de los contenedores UVT (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max) y orientación geográfica.

En cuanto a la intensidad luminosa recibida en los contenedores de las réplicas de cada tratamiento no se presentaron diferencias estadísticamente significativas (Figura 14).

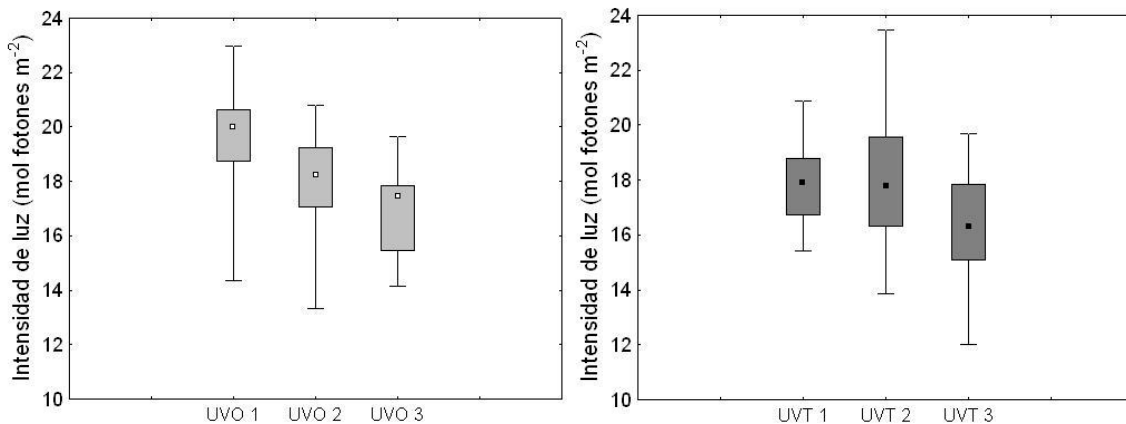


Figura 14. Comparación de la intensidad de luz (mol fotón m^{-2}) de 06:00 a 17:30 horas en cada réplica ($n=3$) de los tratamientos UVO (izquierda) y UVT (derecha) (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

Respecto a la intensidad de luz que llega a cada uno de los tapones de 06:00 a 17:00 horas (CDT) que es el periodo en que reciben luz solar directa se puede ver en la Figura 15.

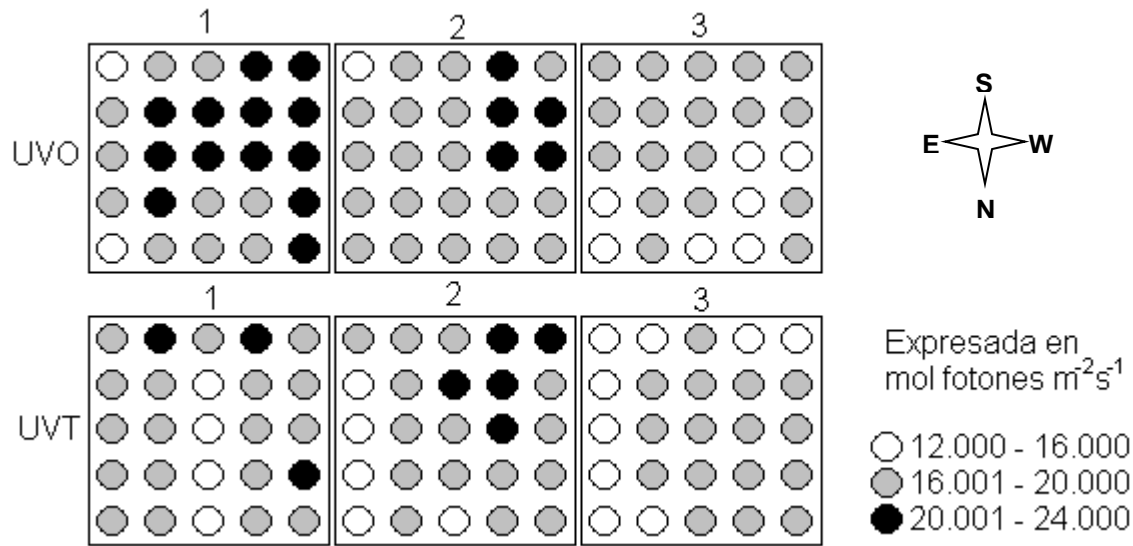


Figura 15. Distribución de la intensidad de luz (mol fotón m^{-2}) de 06:00 a 17:30 horas en cada réplica ($n=3$) de los tratamientos UVO (arriba) y UVT (abajo) por tapón.

La relación entre la intensidad luminosa y el número de individuos asentados en cada uno de los tapones se ve en la Figura 16.

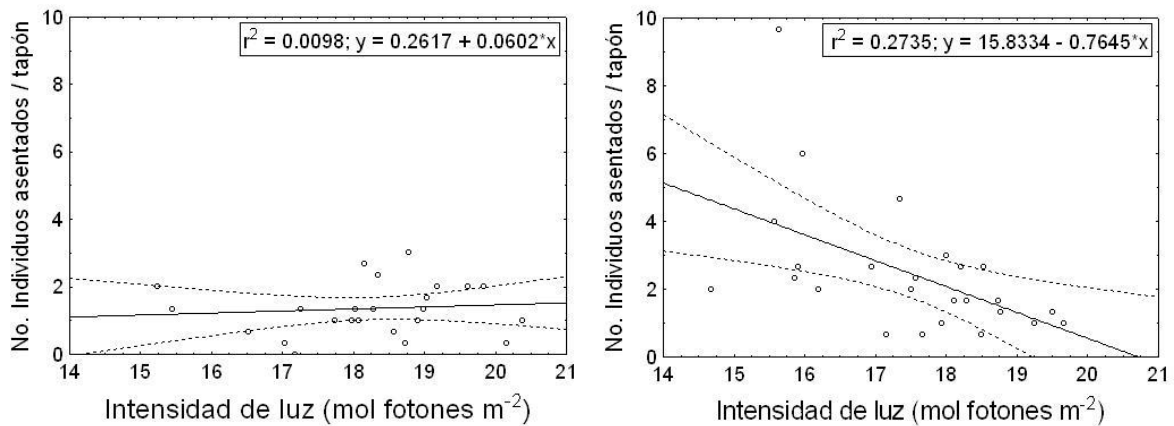


Figura 16. Regresión lineal entre la intensidad de luz (mol fotón m^{-2}) y el número de individuos asentados por tapón de los tratamientos UVO y UVT.

En cuanto a la intensidad luminosa recibida en las secciones de los contenedores de cada réplica de los tratamientos UVO y UVT no se presentaron diferencias significativas (Figura 17), sin embargo, es evidente que la réplica UVO1 presenta intensidades un poco más elevadas del tratamiento UVO, mientras que UVT3, es la réplica con valores más bajos del tratamiento UVT.

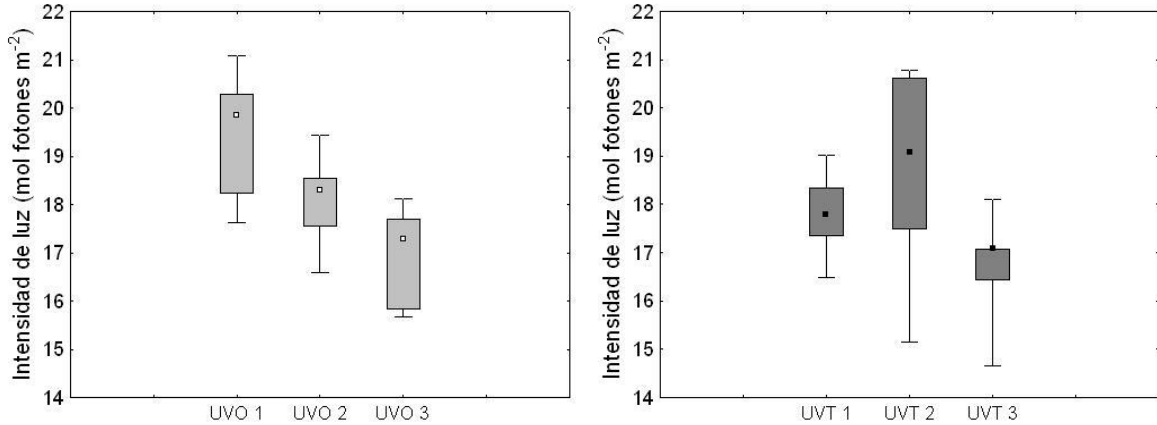


Figura 17. Comparación de la intensidad de luz (mol fotón m^{-2}) de 06:00 a 17:30 horas en cada réplica ($n=3$) de los tratamientos UVO (izquierda) y UVT (derecha) por sección (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

En cuanto a la intensidad de luz que llega a cada una de las secciones de 06:00 a 17:00 horas (CDT) que es el periodo en que reciben luz solar directa se puede ver en la Figura 18.

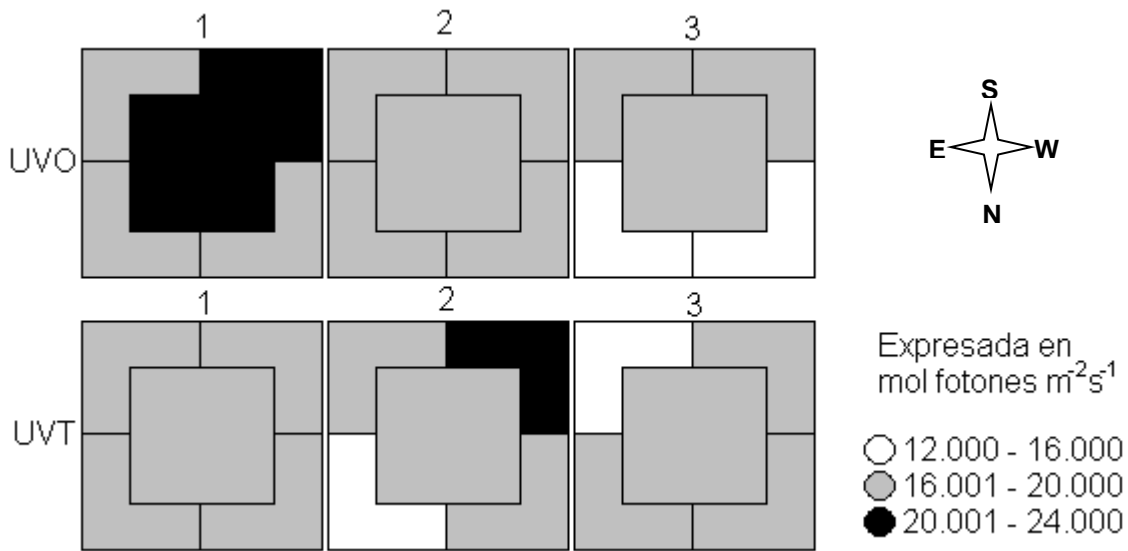


Figura 18. Distribución de la intensidad de luz (mol fotón m^{-2}) de 06:00 a 17:30 horas en cada réplica ($n=3$) de los tratamientos UVO (arriba) y UVT (abajo) por las secciones de los contenedores.

La relación entre la intensidad luminosa y el número de individuos asentados en cada una de las secciones del contenedor de acrílico se ve en la Figura 19.

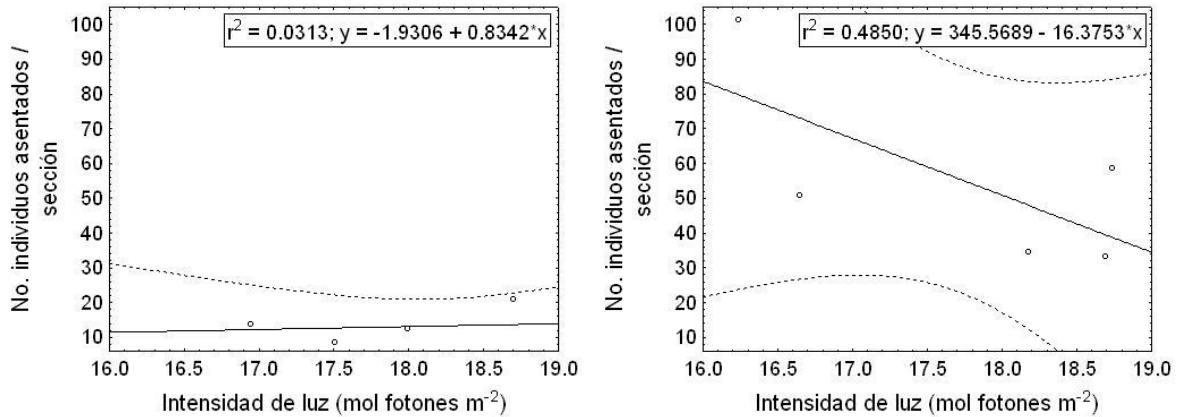


Figura 19. Regresión lineal entre la intensidad de luz (mol fotón m⁻²) y el número de individuos asentados por sección en los tratamientos UVO y UVT.

5.2.2. *Orbicella faveolata*

En el experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)” en *O. faveolata*, la comparación entre el número de individuos asentados en UVO y en UVT se ve en la Figura 20. Se aprecia que hay un mayor número de individuos asentados en UVO, alcanzando un máximo el día 10 con 54 individuos asentados (10.8%), mientras que en UVT el máximo ocurre el día 8 con 24 individuos asentados (4.8%). A partir de estos días en número de individuos asentados comenzó a disminuir.

Respecto a si hay diferencias significativas entre número de individuos asentados en UVO y UVT, la prueba U de Mann-Whitney arrojó valores de $p > 0.05$ excepto para los días 10 y 11 ($p = 0.04953$).

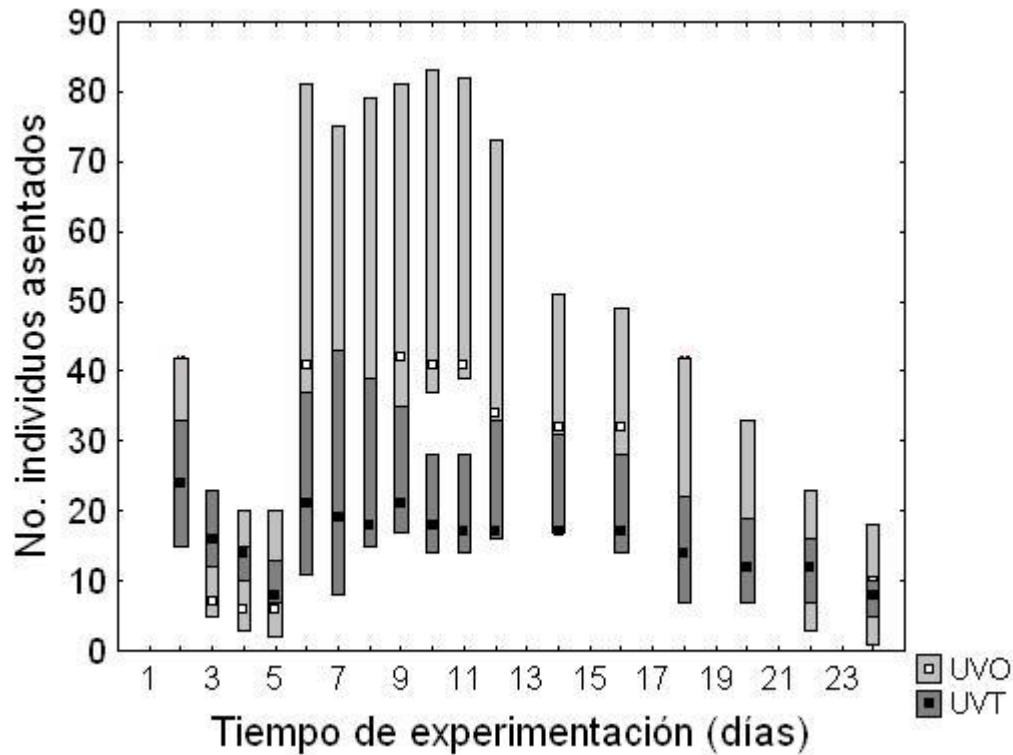


Figura 20. Comparación entre condición UVO y UVT en *Orbicella faveolata* (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

5.3. Preferencia de sitio de asentamiento

5.3.1. *Acropora palmata*

En el experimento “Preferencia de sitio de asentamiento” en *A. palmata*, la comparación entre el número de individuos asentados a partir del día 1 de estar en los contenedores de acrílico a cada lado del contenedor (UVO y UVT) se puede ver en la Figura 21. Nótese que hay un mayor número de individuos asentado en el lado UVO que en el lado UVT, alcanzando un nivel máximo en el día 7 con 146 individuos (29.2%) en el lado UVO y 79 individuos (15.8%) en lado UVT, sin embargo, las diferencias no fueron estadísticamente significativas.

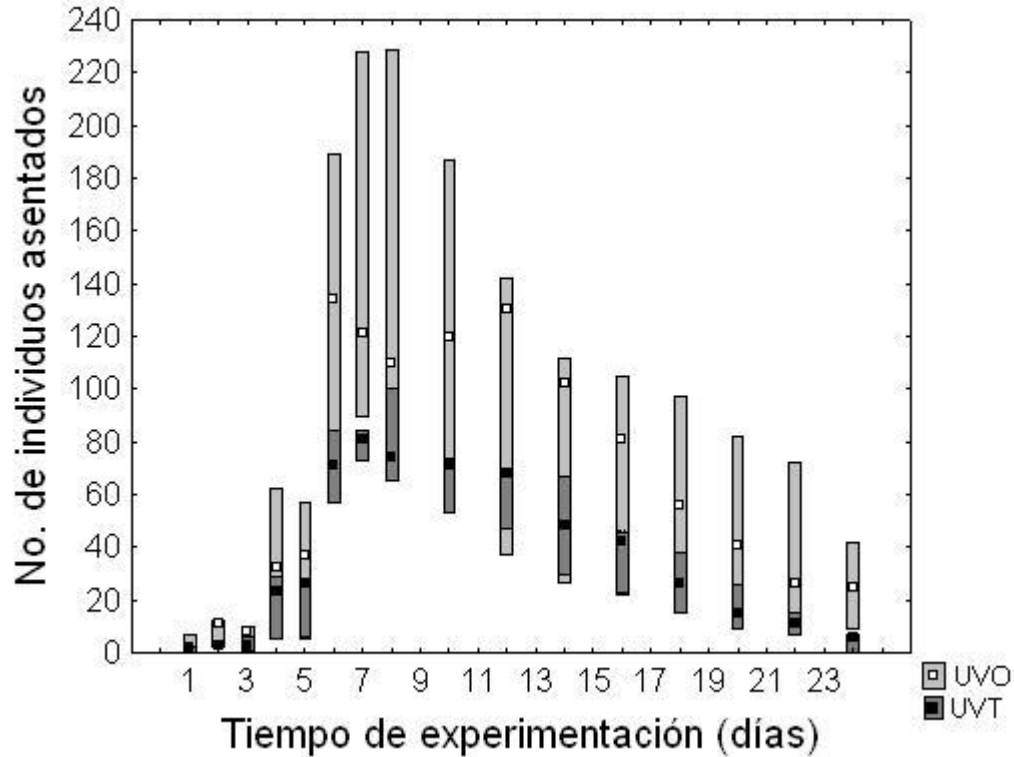


Figura 21. Comparación entre el lado UVO y el lado UVT para *Acropora palmata* (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

Con la prueba U de Mann-Whitney se determinó que el valor de $p > 0.05$ en todos los días excepto los días 7 y 24 ($p = 0.04953$).

5.3.2. *Orbicella faveolata*

En el experimento “Preferencia del sitio de asentamiento” en *O. faveolata*, la comparación entre el número de individuos asentados a partir del día 1 de estar en los contenedores de acrílico a cada lado del contenedor (UVO y UVT) se puede ver en la Figura 22. Nótese que hay un mayor número de individuos asentados en el lado UVO que en el lado UVT, alcanzando un máximo en el día 6 con 20 individuos asentados (4 %) en el lado UVO y el día 5 con 14 individuos asentados (2.8 %) en lado UVT, sin embargo, las diferencias no fueron estadísticamente significativa.

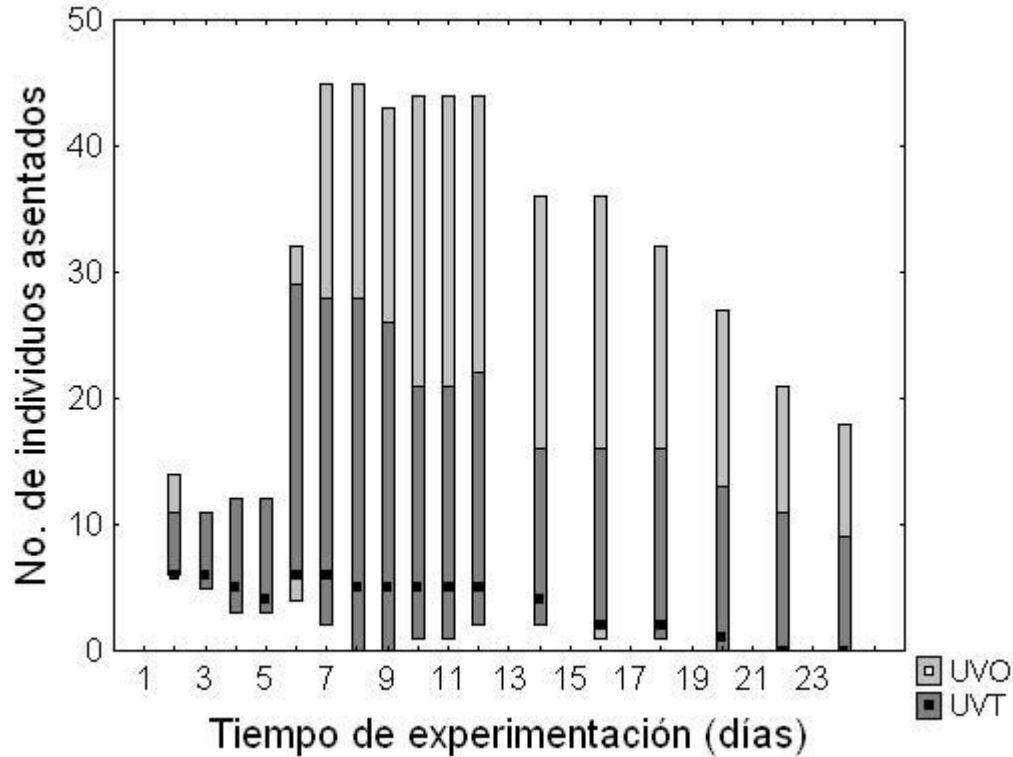


Figura 22. Comparación entre el lado UVO y el lado UVT para *Orbicella faveolata* (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

Como se puede ver, los intervalos de las distribuciones de ambos lados (UVO y UVT) se sobrelapan. Con la prueba U de Mann-Whitney se determinó que todos los valores de $p > 0.05$.

5.4. Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)

5.4.1. *Acropora palmata*

En el experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)” en *A. palmata*, el desarrollo de los embriones ocurrió en un tanque en exterior expuestos a la radiación solar atenuada con malla sombra, esto con la finalidad de aclimatar a los individuos y evitar la alta mortalidad ocurrida en los experimentos del 2010.

Se determinó la proporción entre el número de individuos asentados, en columna de agua y los muertos (Figura 23-25).

En la Figura 23 se puede ver el número de individuos asentados en UVO y en UVT a partir de 12 h de estar en los contenedores de acrílico. En el lado UVT el número de individuos asentados es más grande, alcanzando un máximo a las 72 h con 38 individuos (25.33 %), mientras el máximo de UVO ocurre a las 60 h con 26 individuos

(17.33 %), sin embargo, estas diferencias no son estadísticamente significativas. A partir de las 60 h para UVO y las 72 h para UVT el número de individuos asentados comienza a disminuir.

Con la prueba U de Mann-Whitney se determinó que el valor de $p > 0.05$ en todas las horas excepto a las 36, 72 y 84 horas ($p=0.0431$, $p=0.0012$ y $p=0.0179$ respectivamente).

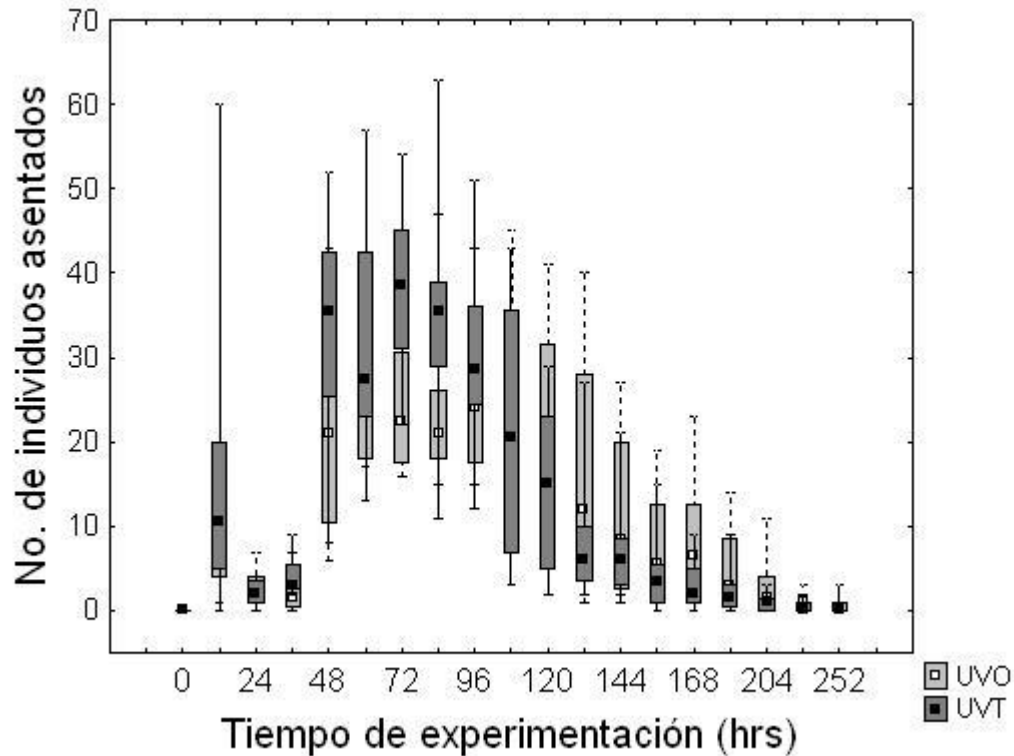


Figura 23. Comparación del número de individuos asentados UVO y UVT en *Acropora palmata* (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

Respecto al número de individuos en columna de agua, la comparación entre el tratamiento UVO y UVT se ve en la Figura 24.

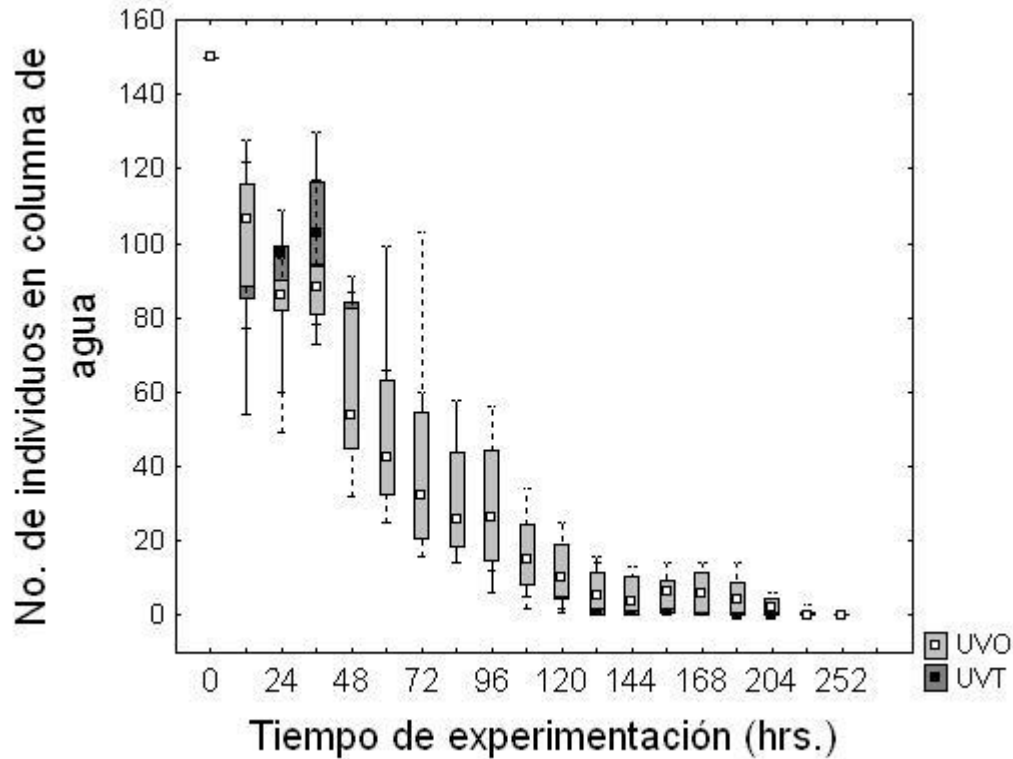


Figura 24. Comparación número de individuos en columna de agua UVO y UVT para *Acropora palmata* (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

Con la prueba U de Mann-Whitney se determinó que las diferencias que hay entre el número de individuos en columna de agua en UVO y en UVT son significativas de 24-36 y de 156-228 h. En las horas 24 y 36 ($p=0.0398$ y $p=0.0402$ respectivamente) el número de individuos en columna de agua en UVT fue mayor. Sin embargo, en las horas 156, 168, 180, 204 y 228 ($p=0.0241$, $p=0.0159$, $p=0.0089$, $p=0.0006$ y $p=0.0325$ respectivamente) el número de individuos en columna de agua en UVO fue mayor.

En cuanto al número de individuos que mueren, la comparación entre el tratamiento UVO y UVT se ve en la Figura 25.

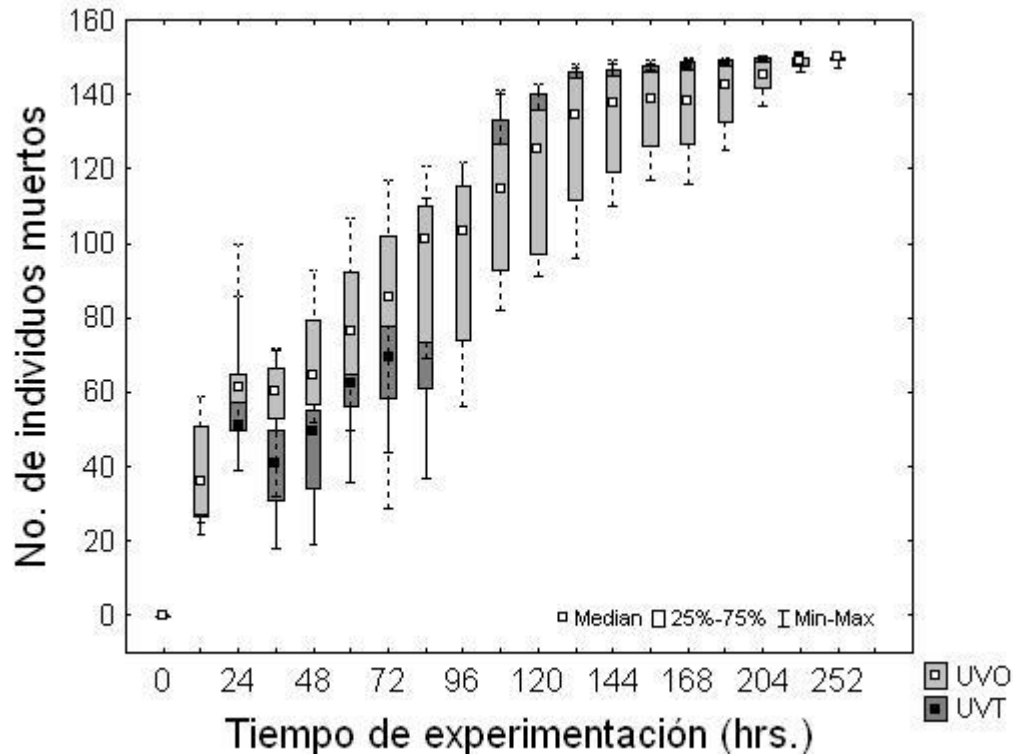


Figura 25. Comparación número de individuos muertos UVO y UVT para *Acropora palmata* (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

Con la prueba U de Mann-Whitney se determinó que las diferencias que hay entre el número de individuos muertos en UVO y en UVT son significativas de 24-72 y de 168-204 h. En las horas 24, 36, 48, 60 y 72 ($p=0.0376$, $p=0.0179$, $p=0.0029$, $p=0.0153$ y $p=0.0303$ respectivamente) la mortalidad en UVO fue mayor. Sin embargo, en las horas 168, 180 y 204 ($p=0.0326$, $p=0.0243$ y $p=0.0093$ respectivamente) la mortalidad en UVT fue mayor.

5.4.2. *Orbicella faveolata*

En el experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)” en *O. faveolata*, se determinó la proporción entre el número de individuos asentados, en columna de agua y los muertos (Figura 26-28).

En la Figura 26 se puede ver el número de individuos asentados en UVO y en UVT a partir de 12 h de estar en los contenedores de acrílico. En los recipientes UVT el número de individuos asentados es mayor, alcanzando un máximo a las 72 h con 21 individuos (14 %), mientras el máximo de UVO ocurre también a las 72 h con 19 individuos (12.66 %), sin embargo, estas diferencias no son estadísticamente significativas. A partir de las 72 h para UVO y UVT el número de individuos asentados comienza a disminuir.

Con la prueba U de Mann-Whitney se determinó que el valor de $p > 0.05$ en todas las horas excepto a las 48 horas ($p = 0.0243$).

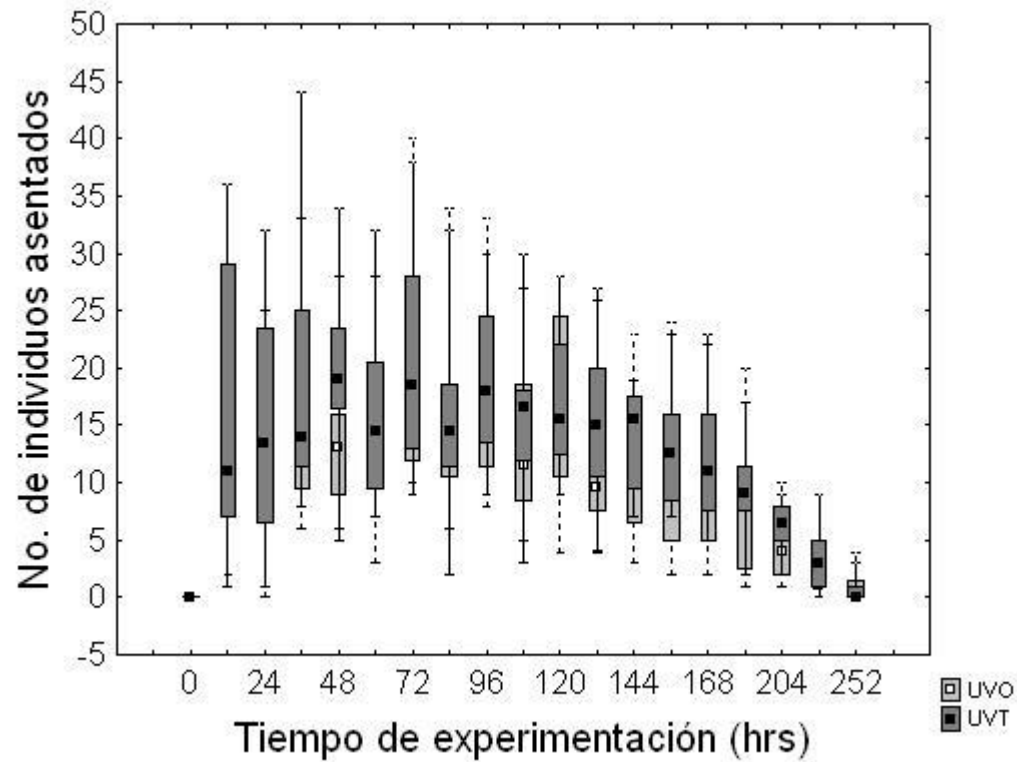


Figura 26. Comparación del número de individuos asentados UVO y UVT para *Orbicella faveolata* (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

Respecto al número de individuos en columna de agua, la comparación entre el tratamiento UVO y UVT se ve en la Figura 27.

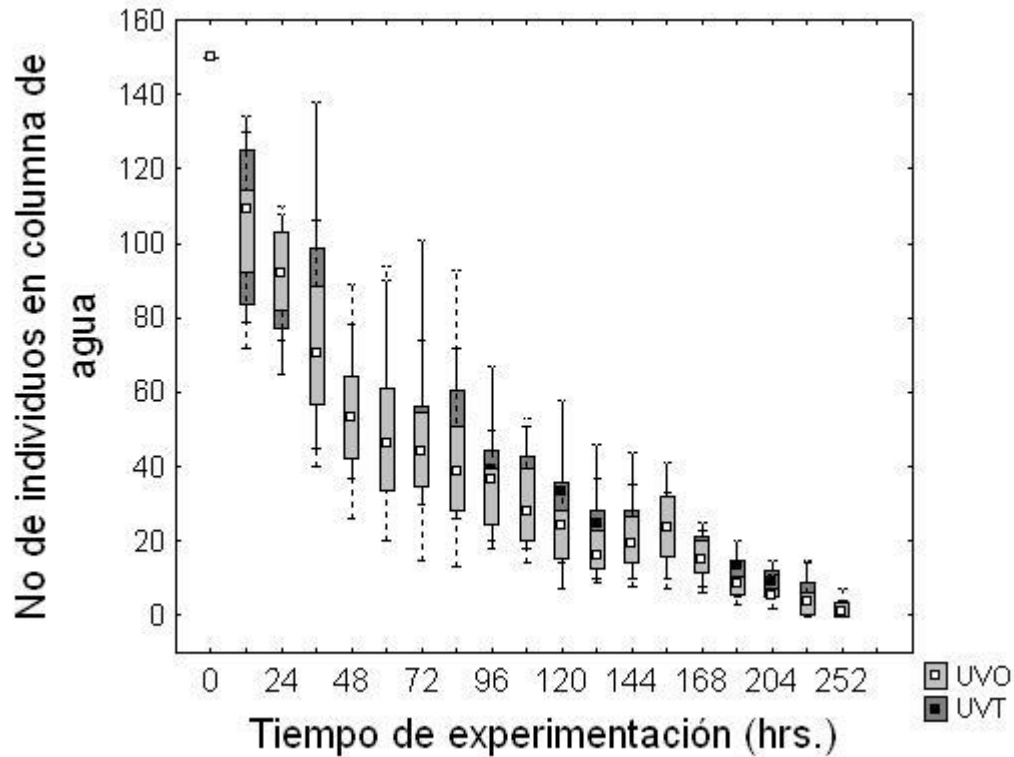


Figura 27. Comparación número de individuos en columna de agua UVO y UVT para *Orbicella faveolata* (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

Con la prueba U de Mann-Whitney se determinó que las diferencias que hay entre el número de individuos en la columna de agua en UVO y en UVT son significativas de 132, 180 y 204 h (Figura 26). En las horas 132, 180 y 204 ($p=0.0347$, $p=0.0275$ y $p=0.0195$ respectivamente) el número de individuos en columna de agua en UVT fue mayor.

En cuanto al número de individuos que mueren, la comparación entre el tratamiento UVO y UVT se ve en la Figura 28.

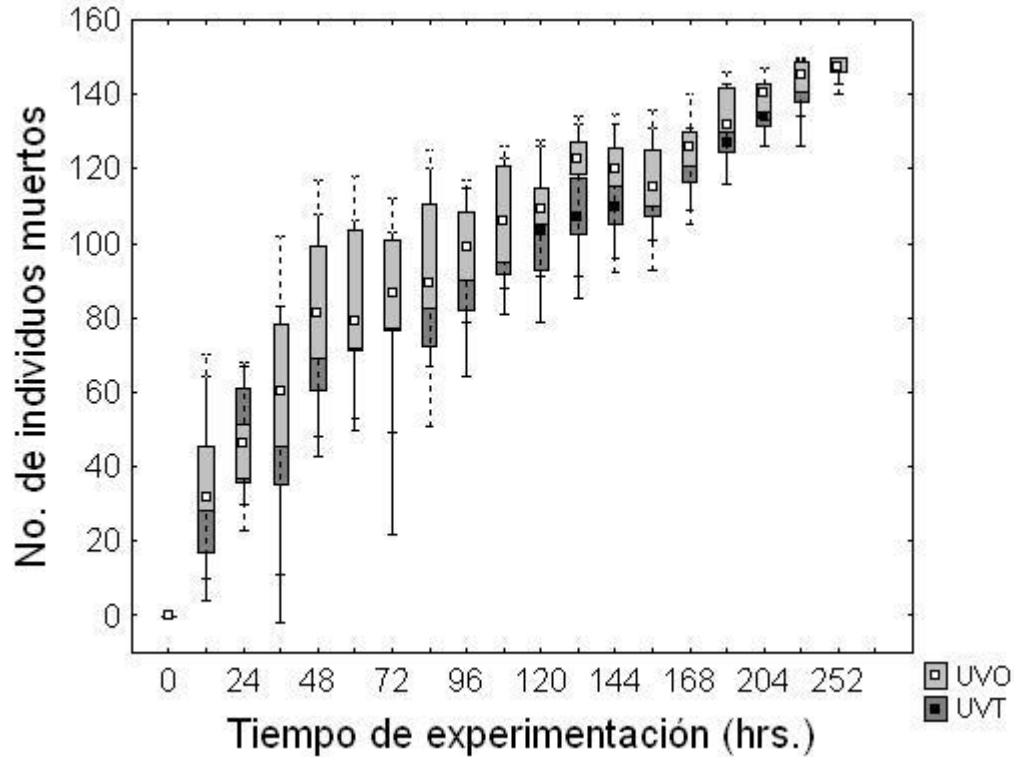


Figura 28. Comparación número de individuos muertos UVO y UVT para *Orbicella faveolata* (mediana, intervalo intercuartil, Min-Max).

Se determinó con la prueba U de Mann-Whitney que las diferencias que hay entre el número de individuos muertos en UVO y en UVT no son estadísticamente significativas, excepto para 204 h ($p=0.0240$) donde hay más mortalidad en UVO que en UVT (Figura 28).

En la Tabla 3 se encuentra un resumen de los resultados principales obtenidos en los diferentes experimentos llevados a cabo durante este trabajo de investigación.

Tabla 3. Resumen de los resultados principales obtenidos durante los experimentos realizados para determinar el efecto de la radiación ultravioleta (UVR) en larvas de coral.

Especie	Experimento (año)	Objetivo particular	Resultados principales
<i>Acropora palmata</i>	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral (2010)	13	Mayor número de individuos asentados en UVT
		2	Dentro de cada contenedor la intensidad de luz es heterogénea. En UVT el 27% de la variabilidad en el número de individuos asentados en los tapones es inversamente proporcional a la intensidad de luz. En UVT el 48% de la variabilidad en el número de individuos asentados en las secciones del contenedor es inversamente proporcional a la intensidad de luz.
	3	Número máximo de individuos asentados ocurrió el día 7 en UVO y UVT.	
	4	Los resultados no son estadísticamente significativos, por lo tanto no es posible determinar si las larvas pueden detectar y evitar la UVR.	
	Preferencia de sitio de asentamiento (2010)	3	Número máximo de individuos asentados ocurrió el día 7 en UVO y UVT.
<i>Orbicella faveolata</i>	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral (2010)	1	Los resultados no son estadísticamente significativos, por lo tanto no es posible determinar si hay diferencias del número de individuos asentados en UVO y UVT.
		2	Al no ser posible determinar si hay diferencias del número de individuos asentados en UVO y UVT, no se determinó si hay preferencias de las larvas en la selección del sitio de asentamiento dentro de los contenedores por el efecto de la variabilidad de la intensidad de luz.
		3	Número máximo de individuos asentados ocurrió el día 10 en UVO y día 8 para UVT.

		4	Los resultados no son estadísticamente significativos, por lo tanto no es posible determinar si las larvas pueden detectar y evitar la UVR.
	Preferencia de sitio de asentamiento (2010)	3	Número máximo de individuos asentados día 6 para UVO y 5 para UVT.
<i>Acropora palmata</i>	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral (2011)	1	Más individuos asentados en UVT que en UVO en 36, 72 y 84 horas (1.5, 3 y 3.5 días respectivamente).
		3	Número máximo de individuos asentados ocurrió a las 60 horas (2.5 días) en UVO y 72 horas (3 días) para UVT.
		5	Más mortalidad en UVO entre las 24 y 72 horas (entre los días 1 y 3). De 168 a 204 horas (día 7 y 8.5 respectivamente) hay más mortalidad en UVT.
		6	Más individuos en columna de agua en UVT en los tiempos 24 y 36 horas (1 y 1.5 días). A partir de 156 horas (6.5 días) hay más individuos en columna de agua en UVO.
<i>Orbicella faveolata</i>	Efecto de la UVR en el asentamiento de larvas de coral (2011)	1	Más individuos asentados en UVT a las 48 horas (día 2).
		3	Número máximo de individuos asentados ocurrió a las 72 horas (3 días) en UVO y UVT.
		5	Mayor mortalidad en UVO para a las 204 horas (8.5 días).
		6	Más individuos en la columna de agua en UVT en los tiempos 132, 180 y 204 (días 5.5, 7.5 y 8.5 respectivamente).

6. DISCUSIÓN

Existen diferentes factores físicos, químicos y biológicos que influyen en el asentamiento de las larvas del coral en el sustrato. Una característica esencial determinante del asentamiento de las larvas es el acondicionamiento biológico en agua de mar del sustrato (los tapones y los azulejos en este caso), para que contenga a las comunidades microbianas y algales que promueven el asentamiento de las larvas actuando como inductores.

Durante los experimentos llevados a cabo para la realización de este trabajo, las larvas no fueron alimentadas con zooplancton (rotíferos) ni inoculadas con *Symbiodinium* para no impactar en la adecuación individual y, por lo tanto, después de un tiempo de permanecer asentadas comenzaron a morir ya que estaban en AMF y la posibilidad de que obtuvieran alimento era limitada.

6.1. Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral

6.1.1. *Acropora palmata*

En los experimentos “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010) y (2011)” se asentaron más individuos en el tratamiento UVT que en el tratamiento UVO, con diferencias estadísticamente significativas (Figura 11) en 2010, mientras que en 2011, también hubo diferencias estadísticamente significativas en determinados momentos del experimento, particularmente en los tiempos 36, 72 y 84 h, en los dos últimos se presentó el mayor número de individuos asentados (Figura 23). Esto sugiere que la UVR es un estímulo que promueve que las larvas se asienten y se conviertan en pólipos primarios. Esto se puede entender ya que, al estar en el fondo del contenedor, es el lugar más lejano a las altas exposiciones a la UVR presentes en la superficie de la columna de agua.

Kuffner (2001) encontró que gran proporción de las larvas de *Pocillopora damicornis* se asentaron en el sol directo (teniendo disponible sol indirecto y sombra) cuando había UVR presente, independientemente de la profundidad de origen de las larvas (someras o profundas). Este autor atribuye que esto se puede deber a que la UVR es una presión de selección que actúa en una etapa previa a la selección del sitio de asentamiento. Sin embargo, es importante destacar que las larvas de *P. damicornis* son larvas que tienen endosimbiontes (ya que esta es una especie planuladora) lo cual, como se mencionó en la sección 3.6, puede impactar la respuesta a la UVR de las especies.

Acropora palmata es una especie que vive en aguas someras y que a lo largo de la evolución ha desarrollado los medios para enfrentar los altos niveles de UVR presentes en el medio en el que habita. Wellington y Fitt (2003) encontraron que los huevos y las larvas de *Montastraea annularis*, *M. franksi* y *A. palmata* son capaces de sobrevivir a altos niveles de UVR que reciben estando en la superficie del mar

en etapas tempranas cuando su contenido de grasas es tan alto que las imposibilita a sumergirse, debido a la correlación directa entre la concentración de MAAs y la supervivencia. Un ejemplo de ello es que la dosis máxima de exposición a la UVR con efecto biológico en sus experimentos fue entre 1.6 y 1.8 veces mayor que la encontrada en los experimentos de Gleason y Wellington (1995) en el coral planulador *Agaricia agaricites*, cuyas larvas tuvieron una mortalidad significativamente mayor a profundidades comparables. Esto se puede explicar por los resultados obtenidos por Baird et al. (2021) en donde encontraron mayor mortalidad en larvas de *Acropora tenuis* inoculadas con *Symbiodinium* expuestas a luz solar, en comparación con larvas sin simbiontes, como consecuencia del daño celular ocasionado por especies de oxígeno reactivas (reactive oxygen species, ROS) resultado del estrés foto-oxidativo en el sistema fotosintético del simbiote.

Gleason y Wellington (1995) encontraron que las larvas de *Agaricia agaricites* de origen somero son mucho menos susceptibles al UVB en comparación con las larvas de sus conespecíficos de origen profundo, esto debido a la correlación inversa que existe entre la profundidad de origen de las larvas y la concentración de MAAs, sin embargo Kuffner (2001) encontró que en *P. damicornis* el origen de procedencia de las larvas no era particularmente importante para determinar la supervivencia de las larvas de su estudio.

Los individuos de este estudio se asentaron tanto en los tapones de concreto como en el contenedor de acrílico. En ambos casos se encontró que en el tratamiento UVT hubo una correlación negativa entre la intensidad luminosa y el número de individuos asentados (Figura 16 y Figura 19). En la Figura 13, se ve como la sección 4 de UVT presentó un número considerablemente mayor de individuos asentados, y también es una sección menos expuesta a la intensidad solar (Figura 18). Una limitación en este estudio es que en las condiciones experimentales no se consideró la composición espectral del tratamiento UVT. La composición espectral es importante porque las longitudes de onda más cortas (UVB) de la UVR son mucho más dañinas biológicamente por fotón que las longitudes de onda más largas (UVA). Wellington y Fitt (2003) encontraron que la exposición a UVB de larvas de *Montastraea annularis*, *M. franksi* y *A. palmata* provocaba menor supervivencia y actividad de nado, y que el efecto de UVA era significativamente menor. Mientras que Zhou et al. (2017) encontraron que la exposición a UVA de larvas de *Seriatopora caliendrum* provocaba un decremento en las tasas de asentamiento y metamorfosis (etapa planctónica prolongada), mientras que la eficiencia fotoquímica de sus simbiontes aumentaba al estar expuestas a UVA (efecto positivo). Es decir, la inhibición inducida por UVA o UVB de algunos procesos fisiológicos es dependiente de la sensibilidad especie específica, y hay diferencias considerables en la respuesta a la UVR en larvas con simbiontes y sin simbiontes (Baird et al., 2021).

Durante el experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)”, se encontró que el ambiente lumínico presentaba heterogeneidad (Figura 15 y Figura 18) debido a que la topografía del área de estanques de la UASA y la orientación en que se encontraban los tanques en donde se realizaron los experimentos, crearon diversas opciones en cuanto a calidad lumínica. Esto es más

representativo de las características lumínicas que encontrarían las larvas en su ambiente natural. Al homogenizar el ambiente lumínico durante el experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)” vemos que las diferencias en el número de individuos asentados en UVO y UVT no son tan evidentes como en los experimentos realizados en el 2010. (Figura 23).

La heterogeneidad del medio natural, sumado a la dinámica y elección de las larvas, crean una amplia gama de combinaciones de calidad y cantidad lumínica, por ejemplo, Babcock y Mundy (1996) encontraron que la cantidad de luz que reciben las larvas al variar la orientación en la que se asientan cambia considerablemente. En las superficies verticales de las placas de asentamiento, encontraron que llega menos del 25% de la luz que llega a la superficie superior, en tanto que la luz que llega a la superficie inferior de las placas de asentamiento es menor al 2% que la que llega a la superficie superior, además encontraron que los corales que se asentaban en las superficies superiores (más expuestas a la luz) crecían y vivían más, ya que en varias especies de corales masivos existe una correlación positiva entre el tamaño y la supervivencia, aunque en este caso hay competencia con otros organismos que también son dependientes a la luz como las macroalgas. Por otro lado, encontraron alta mortalidad en los corales asentados en las superficies inferiores, asociada a los bajos niveles de luz, baja tasa de crecimiento y a la competencia con otros organismos que habitan en sitios sombreados (como ascidias, briozoarios, esponjas, etc.) y que no tienen dependencia a la luz. Otros de los factores que afectan el ambiente lumínico (calidad y cantidad) son el microhábitat, la cobertura de nubes, los aerosoles en la atmósfera, la materia orgánica disuelta (dissolved organic matter, DOM), la profundidad de la capa superficial mezclada de los cuerpos de agua, entre otros explicados en la sección 3.5.1. de este trabajo.

En este trabajo, se analizó la respuesta a un factor de estudio: la UVR, sin considerar su interacción con otros factores abióticos. Esto también es una limitación, ya que carece realismo ecológico. Przeuslaski et al. (2015) recomendaron que se realicen estudios enfocados en evaluar el impacto de la exposición simultánea a múltiples factores de estrés, es decir, multifactoriales, que faciliten el entendimiento de relaciones ecológicas, así como las interacciones que ocurren entre los estresores (que pueden tener efectos aditivos, antagónicos o sinérgicos) y la sensibilidad de los organismos. Por otro lado, es fundamental conocer cómo los estresores se relacionan con el cambio climático (en la sección 3.5.1 se describió cómo la UVR interactúa con el cambio climático), ya que si no se consideran estas interacciones se pueden subestimar las respuestas de los organismos. Otro dato interesante es que en el meta-análisis que realizaron (integrado por 128 estudios) las combinaciones de factores más comunes fueron temperatura y salinidad (64%), seguido de temperatura y CO₂/pH (23%). A pesar de lo recurrente de muchos estresores naturales (como la UVR o la depredación) y antropogénicos (como los contaminantes), el conocimiento sobre sus interacciones con temperatura, salinidad y pH en etapas tempranas del ciclo de vida de la biota marina es limitado.

6.1.2. *Orbicella faveolata*

En los experimentos “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010) y (2011)” de *O. faveolata* no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos UVO y UVT. Los resultados obtenidos en el experimento del 2010 parecen mostrar una tendencia de mayor número de individuos asentados en UVO (Figura 20), sin embargo, en el experimento del 2011 parecen haber al principio del experimento (0-72 h) más individuos asentados en UVT que en UVO y a partir de las 72 h esta tendencia se invierte (Figura 26). Sin embargo, al no haber datos estadísticamente significativos, estas variaciones pudieran ser ocasionadas por factores estocásticos o fallas en el diseño experimental.

6.2. Preferencia de sitio de asentamiento

6.2.1. *Acropora palmata*

En cuanto al experimento “Preferencia de sitio de asentamiento”, cuyo objetivo era determinar si las larvas de *A. palmata* son capaces de detectar y evitar altas intensidades de UVR teniendo simultáneamente los tratamiento UVO y VT, los resultados obtenidos en este experimento no son consistentes, ya que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el asentamiento en cada uno de los lados del contenedor (Figura 21), además, la tendencia es contraria a las tendencias observadas en los experimentos “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010) y (2011)”, es decir, mayor número de individuos asentados en el lado UVO. Lo anterior puede deberse a factores estocásticos, así como a errores en el diseño experimental.

Gleason et al. (2006) consideran en su estudio la posibilidad de que *Porites astreoides* más que evitar activamente la UVR, se distribuía azarosamente entre las diferentes condiciones lumínicas (PAR, PAR+UVA y PAR+UVA+UVB) y que, posteriormente al asentamiento la UVR inducía mortalidad en los individuos asentados, antes de que estos sufrieran metamorfosis y calcificación, esto último para explicar la ausencia de esqueletos en las secciones de sus cámaras de experimentación en donde había UVR.

6.2.2. *Orbicella faveolata*

En el experimento “Preferencia del sitio de asentamiento” no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el asentamiento de las larvas de *O. faveolata* en cada uno de los lados del contenedor (Figura 22). Sin embargo, se observa una tendencia de más individuos asentados en UVO, lo cual es congruente a la tendencia observada en el experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)”, pero al no existir datos estadísticamente significativos, no se puede asegurar que esto sea un patrón real en el asentamiento

de estas larvas. El diseño del experimento “Preferencia del sitio de asentamiento” en *O. faveolata* es el mismo que el de *A. palmata*, por lo que la falta de consistencia en los resultados obtenidos en ambos casos puede deberse a los errores en el diseño del experimento que se discutieron en la sección 6.2.1.

6.3. Tiempo de asentamiento

6.3.1. *Acropora palmata*

En cuanto a los tiempos en que ocurre el mayor número de individuos asentados, en el experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)” son más largos (7 días en ambas condiciones experimentales) en relación a los tiempos de asentamiento del experimento del 2011 (2.5 y 3 días para UVO y UVT respectivamente) como puede observarse en la Tabla 4. Esto podría deberse a que en el primer experimento, los niveles de exposición diaria al PAR (y por lo tanto a la UVR) son en promedio más altos (46.51 ± 7.63 mol fotones $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ [media \pm DE]) (Tabla 2), mientras que en el experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)”, los niveles de exposición diaria son en promedio más bajos (33.71 ± 5.56 mol fotones $m^{-2} \text{ día}^{-1}$).

Algunos autores, como Kuffner (2001), Mundy y Babcock (1998) y Zhou et al. (2017) encontraron que las larvas de algunas especies de corales expuestas a altas intensidades luminosas (incluyendo UVR), pueden sufrir un retraso o inhibición en el asentamiento, esto también puede variar, como ya se ha mencionado, dependiendo de la composición espectral de la UVR a la se exponen los organismos.

Por otro lado, la columna de agua del contenedor en “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)” es mayor (~9 cm) que la columna de agua del experimento del 2011 (~3 cm), pudiendo reflejar y/o atenuar (por absorción y dispersión) más a la UVR, y en consecuencia, permitiendo que los individuos permanecieran mayor tiempo en la columna de agua.

Otra posibilidad para explicar las diferencias en el tiempo de asentamiento es que los individuos del experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)” tuvieron un periodo de aclimatación durante su desarrollo de embriones a larvas plánulas en presencia de luz natural antes de ser colocados en el experimento, lo cual pudo influenciar en su asentamiento en tiempos más cortos. Sumado a lo anterior, Gleason et al. 2006 y Gleason y Hofmann, 2011 afirman que existen diferencias fisiológicas en los individuos según el tiempo o fecha en que ocurrió el desove.

Tabla 4. Datos de asentamiento de las larvas plánulas de *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata* de los experimentos “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010) y (2011)”.

Especie	Año	Tratamiento	NII	TMA (días)	EL (días)	NIA	PA
<i>A. palmata</i>	2010	UVO	500	7	12	100 *	20%
	2011	UVO	150	2.5	6.5	26	17.33%
	2010	UVT	500	7	12	340 *	68%
	2011	UVT	150	3	7	38	25.33%
<i>O. faveolata</i>	2010	UVO	500	10	12	54	10.8%
	2011	UVO	150	3	5	19	12.66%
	2010	UVT	500	8	10	24	4.8%
	2011	UVT	150	3	5	21	14%

NII= Número inicial de individuos. TMA= Tiempo de máximo asentamiento. EL= Edad de las larvas. NIA= Número de individuos asentados. PA= Porcentaje de asentamiento. *Diferencias estadísticamente significativas al 95%.

6.3.2. *Orbicella faveolata*

En cuanto al tiempo de asentamiento, al igual que los resultados obtenidos en *A. palmata*, en el experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)” el tiempo en el que ocurrió el mayor número de individuos asentados fue de 10 y 8 días para UVO y UVT respectivamente, mientras que en el experimento realizado en el 2011, el tiempo en el que ocurrió el mayor número de individuos asentados fue de 3 días para ambos tratamientos (Tabla 4). Al igual que en el caso de *A. palmata* los niveles de exposición diaria al PAR del experimento del 2010 alcanzan valores más altos (40.05 ± 11.68 mol fotones $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ [media \pm DE]), mientras que en el experimento del 2011 los niveles de exposición diaria son en promedio más bajos (37.76 ± 7.46 mol fotones $m^{-2} \text{ día}^{-1}$) (Tabla 2), además de las diferencias en el tamaño de la columna de agua y del posible efecto del periodo de aclimatación en luz natural previo al periodo de experimentación que se mencionó en la sección 6.3.1. *Acropora palmata*.

El retraso en el desarrollo larval de los corales ocasionado por factores externos (como la UVR), puede tener una ventaja ecológica y evolutiva para las especies que lo sufren. En términos poblacionales, pudiera resultar benéfico extender el tiempo de dispersión para alejarse de condiciones ambientales no óptimas para su desarrollo, y con ello aumentar la conectividad de la población. Sin embargo, en términos fisiológicos puede no ser tan ventajoso toda vez que las larvas dependen únicamente de la energía que tienen almacenada en sus reservas de lípidos, ya que en estado planctónico no tienen boca para alimentarse. Esto no ocurre con las larvas de corales planuladores que ya tienen su dinoflagelado simbiote y este les puede proporcionar energía extra, aunque algunos estudios como los de Baird et al. (2021) y Nesa et al. (2012) encontraron que el simbiote puede ser una “carga” para las larvas ya que es responsable de una alta mortalidad y daño al DNA de larvas

como resultado del estrés oxidativo en presencia de altas cantidades de UVR. Además, incrementar el gasto energético durante la dispersión, merma la energía disponible para el asentamiento y la metamorfosis y compromete la supervivencia de los pólipos si no pueden capturar alimento y/o adquirir sus simbiontes después de asentarse. Por otro lado, es importante señalar que tanto *A. palmata* como *O. faveolata* son especies que tiene preferencias por un sustrato para asentarse, el cual también puede ser afectado por exposición a UVR y provocar cambios en la cobertura de algas coralinas crustosas, así como en la composición de la comunidad microbiana asociada a ellas (Gleason & Wellington, 1995; Kuffner, 2001; Wellington & Fitt, 2003; Zhou et al. 2017).

6.4. Individuos en columna de agua y mortalidad

6.4.1. *Acropora palmata*

Respecto a la mortalidad, en los experimentos “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)” y “Preferencia de sitio de asentamiento” de *A. palmata* hay una pronunciada disminución del número de individuos en superficie en el primer día en que los individuos fueron colocados en los contenedores de acrílico (casi 50% del número inicial= 500 individuos), esto se debe a que los organismos marinos son muy susceptibles a cambios ambientales como un incremento a la exposición de UVR o cambios de temperatura. Los cambios bruscos de los factores abióticos pueden superar los límites fisiológicos de los organismos como mencionan Banaszak & Lesser (2009). Gleason et al. (2006) también tuvieron >50% de mortalidad en sus experimentos, sin embargo, autores como Pechenik (1999), argumentan que estos porcentajes de mortalidad son comunes en larvas pelágicas de invertebrados marinos bentónicos. En los experimentos “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2010)” y “Preferencia de sitio de asentamiento” de *A. palmata*, un error en el diseño experimental fue la falta de conocimiento del número de individuos que se desplazaban en columna de agua (d) y del número de individuos que morían (m) ya que:

$$N = a + s + X$$

Donde N = 500, a = número de individuos asentados, s = número de individuos en superficie y X = d + m, sin embargo, en el experimento realizado en el 2011, se corrigió esta situación realizando los conteos de los individuos que se desplazaban en columna de agua (d) y del número de individuos que morían (m) (Figura 24 y Figura 25).

Durante el inicio del experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)” (24-72 h) hubo más mortalidad en los tratamientos UVO que en los UVT.

Esto es congruente con los resultados de Kuffner (2001) en el cual las larvas de origen somero tuvieron más supervivencia en sus tratamientos UVT en comparación con los UVO. Sin embargo, con el paso del experimento, esta tendencia cambió y en los tiempos finales (168-204 h) la mortalidad en UVT fue mayor que en UVO, sin embargo, como se ve en la Figura 25, estas diferencias son muy pequeñas, por lo que pudieran ser despreciables. Esto se podría explicar por lo discutido en la sección 6.1.1 sobre que las larvas de *A. palmata* en ausencia de UVR, no son estimuladas a asentarse. La movilidad, supervivencia, diferenciación celular y el crecimiento de las larvas sin endosimbiontes depende de las reservas energéticas maternas, en ausencia de las señales indicadas que promuevan el asentamiento, la larva puede llegar al punto de deteriorarse y morir (Gleason & Hofmann, 2011).

El número de individuos que se encuentran en la columna de agua al inicio del experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)” (24-36 h) es mayor en UVT en comparación con UVO, esta diferencia está relacionada con el punto anterior, ya que al haber más mortalidad en UVO y al no estar listos biológicamente para asentarse (por ejemplo, tener muchas reservas de lípidos aun para poder sumergirse), ya que el mayor número de individuos asentados ocurrió hasta 72 h.

6.4.2. *Orbicella faveolata*

Respecto a si existen diferencias en la mortalidad de las larvas en ambas condiciones experimentales (UVO y UVT), al final del experimento “Efecto de la UVR sobre el asentamiento de larvas de coral (2011)” (204 h) hubo más individuos muertos en UVO que en UVT, sin embargo, estas diferencias son mínimas y por lo tanto pueden ser despreciables (Figura 28).

Las diferencias en el número de individuos que permanecen en la columna de agua, sólo se aprecian a las 204 h en donde hay más individuos en UVT. Esta diferencia es mínima y está relacionada con el punto anterior, ya que al no haber diferencias en el número de individuos asentados y al haber más mortalidad en UVO, en la columna de agua quedaron más individuos en UVT (Figura 27).

7. CONCLUSIONES

El asentamiento al sustrato de las larvas de los corales parece representar el balance entre dos presiones de selección aparentemente opuestas, ya que por un lado, los corales requieren acceso a luz adecuada para que sus simbioses realicen fotosíntesis, pero por otro lado, necesitan evitar la competencia con algas, la sedimentación, el pastoreo y los efectos nocivos que la UVR puede provocar en ellos o en sus simbioses (Gleason & Wellington, 1995; Babcock & Mundy, 1996; Lesser, 2000; Kuffner, 2001; Bruckner, 2002; Villinsky, 2003; Wellington & Fitt, 2003; Gleason et al., 2006; Torres et al., 2007; Banaszak & Lesser, 2009; Llabrés et al., 2013; Zhou et al. 2016; Zhou et al. 2017).

La UVR tiene diversos efectos biológicos nocivos (ver sección 3.6), sin embargo, también se le ha asociado con aspectos biológicos favorables. Por ejemplo, Jokiel y York (1982) encontraron que en presencia de UVR el coral *Pocillopora damicornis* produce más larvas, mientras que Fine et al. (2002) encontraron que la presencia de UVR combate el blanqueamiento del coral *Oculina patagonica* al matar a la bacteria que lo provoca. Por último, la UVR solar puede contribuir a mantener la salud de la superficie de cuerpos de agua, ya que muchos patógenos y parásitos humanos y de organismos acuáticos son inactivados por la exposición a la UVR, e incluso por longitudes de onda corta del PAR, reduciendo así la propagación de enfermedades transmitidas por el agua, además de que la UVR puede fotodegradar materia orgánica e inorgánica (Overholt et al., 2012; Williamson et al., 2017; EEAP, 2019).

En este trabajo, se observó que para el caso de *Acropora palmata* la presencia de UVR estimula el asentamiento, sin embargo, se encontró una correlación negativa entre la intensidad de luz y el número de individuos asentados, es decir, las larvas buscaron las áreas de los contenedores en donde la intensidad luminosa fue menor. Esto puede explicarse porque esta especie está adaptada a vivir en un entorno con altos niveles de UVR y tiene los mecanismos para protegerse (como los MAAs). En ausencia de UVR no hay el estímulo que promueva el asentamiento y las larvas pueden deteriorarse y morir.

También en este trabajo se observó que los individuos de *A. palmata* y *O. faveolata* cuyo desarrollo embrionario se llevó a cabo dentro del laboratorio sin estar expuesto a la luz solar (experimentos de 2010), tuvieron tiempos de asentamiento más largos (entre 7 y 10 días), en comparación con los tiempos de asentamiento de los individuos cuyo desarrollo embrionario se llevó a cabo expuestos a luz natural (experimentos de 2011) cuyos tiempos de asentamiento fueron más cortos (entre 2.5 y 3 días). Es importante mencionar que los tiempos de asentamiento reportados para *A. palmata* son 5-7 días (Padilla, 1996; Banaszak, obs. pers.) y para *O. faveolata* son 2-5 días (Wellington & Fitt, 2003; Severance & Karl, 2006; Banaszak, obs. pers.) como se menciona en las secciones 3.2.5 y 3.3.5 de este trabajo respectivamente. Lamentablemente no se puede concluir que estas diferencias se deben únicamente a la aclimatación individual por desarrollarse en condiciones de luz natural, ya que se cambió el diseño experimental (específicamente el tipo de

contenedores que contenía a las larvas que en 2010 tenían un volumen de 9 l y en 2011 de 265 ml) y también durante el año 2010 se registraron más altos niveles de exposición diaria a la PAR + UVR, lo cual puede retrasar el asentamiento de las larvas.

Por otro lado, la metodología usada en estos experimentos parece no ser adecuada para conocer el efecto de la UVR en *O. faveolata*, ya que los números de individuos asentados fueron muy bajos y los resultados de todos los experimentos no fueron concluyentes ni determinantes. Todo esto se puede deber a una mayor susceptibilidad de *O. faveolata* a cambios bruscos en las condiciones del medio, como temperatura y exposición a UVR.

La ventana temporal para experimentar con las larvas de corales desovadores, como *A. palmata* y *O. faveolata*, es muy limitada, ya que solo puede ser unos cuantos días 1 ó 2 veces al año, por lo que los datos hasta ahora adquiridos y los que se puedan obtener en las siguientes fechas de reproducción servirán para poder tener resultados más consistentes.

Los experimentos realizados en este estudio examinan las respuestas individuales a la exposición de un factor abiótico (la UVR), en un estado específico del ciclo de vida, en un reducido periodo de tiempo y utilizando exposiciones abruptas a los tratamientos (UVO y UVT), sin considerar la composición espectral de la UVR que es conocido puede tener diferentes efectos biológicos. Todo esto, son limitaciones considerables ya que en condiciones naturales hay amortiguación y gradientes de los factores abióticos, el medio marino es altamente dinámico y ocurren complejas y diversas interacciones, que son imposibles de replicar en condiciones experimentales, sobre todo cuando las variables independientes son sensibles a cambios en diferentes escalas. La variable luz (UVR y PAR) es dinámica, y es altamente sensible a los cambios en las condiciones atmosféricas (como el adelgazamiento de la SOL, la temperatura), climáticas estacionales (calmas ecuatoriales, nubosidad, tormentas, etc.), a factores antropogénicos (aerosoles, emisiones de gases de efecto invernadero), además de los cambios que pueden ocurrir en la columna de agua (como la turbiedad por materia orgánica disuelta o sedimentos suspendidos, flujos de agua, el oleaje, etc.) o incluso en el microhábitat.

Es importante considerar que la cantidad y la calidad lumínica es una variable que tiene efecto en el asentamiento de diversas larvas de organismos bentónicos, pero no es la única. En condiciones naturales hay múltiples factores (bióticos y abióticos) que determinan un asentamiento exitoso y que interactúan generando efectos en la biota marina que pueden ser sinérgicos, aditivos o antagónicos. Por ello y dado a que estamos en un contexto de cambio climático, es fundamental el desarrollo de estudios multifactoriales que reflejen condiciones ecológicamente más realistas que los estudios de un solo factor (como el presente) con los que se corre el riesgo de la simplificación de sistemas complejos y dinámicos, como los son los ecosistemas marinos.

Es fundamental más investigación en grupos taxonómicos vulnerables y con alta importancia ecológica, económica y social, como los corales, con énfasis en regiones cuyas condiciones están cambiando rápidamente y con una gran magnitud, como ocurre en las costas de Quintana Roo.

Actualmente existe una alta incertidumbre en la recuperación de la SOL y de su interacción con el cambio climático por lo que se requieren estudios con datos a largo plazo y mejorar el conocimiento de los procesos atmosféricos y sus interacciones en condiciones cambiantes.

Respecto al posible incremento de la UVR pronosticado para las latitudes tropicales, es imprescindible entender los efectos que esto tendrá para todas las formas de vida del planeta, y para los fines de esta tesis, en particular en la biota marina, con énfasis en los corales escleractinios, y los ecosistemas arrecifales cuya salud, en la crisis climática en la que nos encontramos, es fundamental, ya que estos ecosistemas son altamente valiosos para las poblaciones costeras por sus numerosos servicios ecosistémicos, como la provisión de infraestructura natural crítica que ofrece protección a estas regiones cada vez más vulnerables a tormentas e inundaciones, seguridad alimentaria para las poblaciones vulnerables, ingresos por turismo e incluso materias primas para usos farmacéuticos por mencionar algunos (Weatherhead & Andersen, 2006; Lladrés et al., 2013; IPCC, 2021).

8. REFERENCIAS

- Alvarez-Filip, L., Estrada-Saldívar, N., Pérez-Cervantes, E., Molina-Hernández, A. & González-Barrios, F. J. (2019) A rapid spread of the stony coral tissue loss disease outbreak in the Mexican Caribbean. PeerJ 7:e8069 <https://doi.org/10.7717/peerj.8069>
- Ardisson P. L., May-Kú, M. A., Herrera-Dorantes, M. T. & Arellano-Guillermo, A. (2011) El Sistema Arrecifal Mesoamericano-México: consideraciones para su designación como Zona Marítima Especialmente Sensible. Hidrobiológica 21(3): 261-280.
- Aronson, R., Bruckner, A., Moore, J., Precht, B., & Weil, E. (2008) *Montastraea faveolata*. En *IUCN Red List of Threatened Species*. Version 2010.4. <www.iucnredlist.org>. Consultado 12 Diciembre 2010.
- Babcock, R. & Mundy, C. (1996) Coral recruitment : Consequences of settlement choice for early growth and survivorship in two scleractinians. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 206: 179-201.
- Baird, A. H., Yakovleva I. M., Harii, S., Sinniger, F. & Hidaka M. (2021) Environmental constraints on the mode of symbiont transmission in corals. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 538: 1-7.
- Bais, A. F., Tourpali, K., Kazantzidis, A., Akiyoshi, H., Bekki, S., Braesicke, P., Chipperfield, M. P., Dameris, M., Eyring, V., Garny, H., Iachetti, D., Jöckel, P., Kubin, A., Langematz, U., Mancini, E., Michou, M., Morgenstern, O., Nakamura, T., Newman, P.A., Pitari, G., Plummer, D.A., Rozanov, E., Shepherd, T.G., Shibata, K., Tian, W. & Yamashita, Y. (2011) Projections of UV radiation changes in the 21st century: impact of ozone recovery and cloud effects. Atmospheric Chemistry and Physics. 11:7533–7545.
- Banaszak A. T & Lesser, M. P. (2009) Effects of solar ultraviolet radiation on coral reef organisms. Photochemical and Photobiological Science. 8: 1276-1294.
- Banaszak A. T., Barba-Santos, M. G., LaJeunesse, T. C. & Lesser, M. P. (2006) The distribution of mycosporine-like amino acids (MAAs) and the phylogenetic identity of symbiotic dinoflagellates in cnidarian hosts from the Mexican Caribbean. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 337: 131-146.
- Beltrán-Torres, A. & Carricart-Ganivet, J. P. (1999) Lista revisada y clave para los corales pétreos zooxantelados (Hidrozoa: Milleporina, Anthozoa: Scleractinia) del Atlántico mexicano. Revista de Biología Tropical 47: 813-829.

- Bruckner, A. W. (2002) Proceedings of the Caribbean Acropora workshop: Potential application of the U.S. endangered species act as a conservation strategy. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-24. Silver Spring. MD. 199 pp.
- Budd, A. F., Fukami, H., Smith, N. D. & Knowlton, N. (2012) Taxonomic classification of the reef coral family Mussidae (Cnidaria: Anthozoa: Scleractinia). *Zoological Journal of the Linnean Society*. 166: 465-529.
- CONANP. (2022) Ficha del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos en el Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación (SIMEC). <<https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=83®=9>> Consultado 26 diciembre 2022.
- EEAP. (2019) Environmental Effects and Interactions of Stratospheric Ozone Depletion, UV Radiation, and Climate Change. 2018 Assessment Report. Nairobi: Environmental Effects Assessment Panel, United Nations Environment Programme (UNEP) 390 pp. <<https://ozone.unep.org/science/assessment/eeapIPCC%20AR6%202021.%20Pp%20624>> Consultado 02 enero 2023
- Fenner, D. (1999) New observations on the stony coral (Scleractinia, Milleporidae and Stylasteridae) species of Belize (Central America) and Cozumel (Mexico). *Bulletin of Marine Science* 64: 143-154.
- FKNMS/DEP. (2018) Case definition: Stony Coral Tissue Loss Disease. <https://floridadep.gov/sites/default/files/Copy%20of%20StonyCoralTissueLossDisease_CaseDefinition%20final%2010022018.pdf> Consultado 26 diciembre 2022.
- Fine, M., Banin, E., Israely, T., Rosenberg, E. & Loya, Y. (2002) Ultraviolet radiation prevents bleaching in the mediterranean coral *Oculina patagonica*. *Marine Ecology Progress Series*. 226: 249-254.
- Gleason, D. F. & Wellington G. M. (1995) Variation in UVB sensitivity of planula larvae of the coral *Agaricia agaricites* along a depth gradient. *Marine Biology*. 123: 693-703.
- Gleason, D. F. & Hofmann, D. K. (2011) Coral larvae: From gametes to recruits. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 408: 42-57.
- Gleason, D. F., Edmunds, P. J. & Gates R. D. (2006) Ultraviolet radiation effects on the behavior and recruitment of larvae from the reef coral *Porites astreoides*. *Marine Biology*. 148: 503-512.
- Gueldulain, S. D. (2010) Variación en la densidad de zooxantelas, concentración de pigmentos, biomasa y porcentaje de lípidos en tejidos de *Pavona gigantea*

- Verril, 1896 en Bahías de Huatulco. Tesis de Licenciatura en Biología Marina. Universidad del Mar, Puerto Ángel, Oaxaca. 44 pp.
- Hirose, M., Yamamoto, H. & Nonaka M. (2008) Metamorphosis and acquisition of symbiotic algae in planula larvae and primary polyps of *Acropora* spp. *Coral Reefs*. 27: 247-254.
- INE/SEMARNAP, 2000. Programa de Manejo Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, México. <https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/83_libro_pm.pdf>. Consultado 26 diciembre 2022.
- IPCC, (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- IUCN (2022) IUCN Red List of Threatened Species. Version 2010.1. <www.iucnredlist.org>. Consultado 30 octubre 2022.
- Jaap, W. C. (2002) *Acropora* A review of Systematics, Taxonomy, Abundance, Distribution, Status and Trends: Florida, 1881-2000. En *Proceedings of the Caribbean Acropora workshop: Potential application of the U.S. endangered species act as a conservation strategy*. Editado por A. W. Bruckner. Pp. 136.141. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-24. Silver Spring. MD.
- Jokiel, P. L & York, R. H. (1982) Solar ultraviolet photobiology of the reef coral *Pocillopora damicornis* and symbiotic zooxanthellae. *Bulletin of Marine Science*. 32: 301-315.
- Jordán, E. (1978) Estructura y composición de arrecifes coralinos, en la región noreste de la península de Yucatán, México. *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología*. 165 CCMYL, UNAM.
- Jordán, E. (2002) Status of Acroporids in the Mexican Atlantic. En *Proceedings of the Caribbean Acropora workshop: Potential application of the U.S. endangered species act as a conservation strategy*. Editado por A. W. Bruckner. Pp. 156.159. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-24. Silver Spring. MD.
- Jordán-Dahlgren, E. & Rodríguez-Martínez, R. (2003) The Atlantic Coral Reefs Ecosystems of Mexico. In: J. Cortéz (Ed.) *Latin America Coral Reefs*. Elsevier Science B.V., pp. 131-158.

- Kuffner, I. B. (2001) Effects of ultraviolet (UV) radiation on larval settlement of the reef coral *Pocillopora damicornis*. Marine Ecology Progress Series. 217: 251-261.
- Lesser, M. P. (2000) Depth-dependent photoacclimatization to solar ultraviolet radiation in the Caribbean coral *Montastraea faveolata*. Marine Ecology Progress Series. 192: 137-151.
- Llabrés, M., Agusti, S., Fernández, M., Canepa, A., Maurin, F., Vidal, F. & Duarte C. M. (2013) Impact of elevated UVB radiation on marine biota: a meta-analysis. Global Ecology and Biogeography. 22: 131-144.
- McKenzie, R. L., Aucamp, P. J., Bais, A. F., Bjorn, L. O., Ilyas, M. & Madronich, S. (2011) Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation. Photochemical and Photobiological Sciences. 10:182-198.
- McPeters, R. D (2011) Total Ozone Mapping Spectrometer. NASA. <<http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>>. Consultado 08 marzo 2011.
- Merino, M. & Otero, L. (1991) Atlas ambiental costero de Puerto Morelos Quintana Roo. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM/CIQRO. 80 pp.
- Mundy, C. N & Babcock, R. C. (1998) Role of light intensity and spectral quality in coral settlement: implications for depth-dependent settlement. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 223: 235-255.
- NAS (2010) Educational Resources. Ultraviolet Radiation. <<http://www.nas.nasa.gov/About/Education/Ozone/radiation.html>>. Consultado 09 junio 2010.
- Nesa, B., Baird, A. H., Harii, S., Yakovleva, I. & Hidaka, M. (2012) Algal symbionts increase DNA damage in coral planulae exposed to sunlight. Zoological Studies. 51 (1): 12-17.
- NMFS (2022) List of Invertebrate and Plant Species under NMFS' Jurisdiction. <www.nmfs.noaa.gov>. Consultado 30 octubre 2022.
- Nozawa, Y. & Harrison, P. L. (2008) Temporal patterns of larval settlement and survivorship of two broadcast-spawning acroporid corals. Marine Biology. 155: 347-351.
- Okamoto, M., Nojima, S., Fujiwara, S. & Furushima, Y. (2008) Development of ceramic settlement devices for coral reef restoration using *in situ* sexual reproduction of corals. Fisheries Science. 74: 1245-1253.

- Overholt, E. P., Hall, S. H., Williamson, C. E., Meikle, C. K., Duffy, M. A. & Cáceres, C. E. (2012), Solar radiation decreases parasitism in *Daphnia*, *Ecology Letters*. 15: 47–54.
- Padilla, A. C. (1996) Demografía y dinámica poblacional de *Acropora palmata* en Quintana Roo, México. Tesis de Doctorado en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM. 145 p.
- Pechenik, J. (1999) On the advantages and disadvantages of larval stages in benthic marine invertebrate life cycles. *Marine Ecology Progress Series*. 177: 269-297.
- Przeslawski, R., Byrne, M. & Mellin, C. (2015) A review and meta-analysis of the effects of multiple abiotic stressors on marine embryos and larvae. *Global Change Biology*. 21: 2122-2140.
- Ritson-Williams, R., Paul, V. J., Arnold, S. N. & Steneck, R. S. (2010) Larval settlement preferences and post-settlement survival of the threatened Caribbean corals *Acropora palmata* and *A. cervicornis*. *Coral Reefs*. 29: 71-81.
- SEMARNAT (2010) Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación <<https://sidof.segob.gob.mx/notas/5173091>> Consultado 15 marzo 2023.
- SEMARNAT (2019) Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo, publicada el 30 de diciembre de 2010. Diario Oficial de la Federación <https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5578808&fecha=14/11/2019#gsc.tab=0> Consultado 15 marzo 2023.
- Severance, E. G. & Karl, S. A. (2006) Contrasting population genetic structures of sympatric, mass-spawning Caribbean corals. *Marine Biology*. 150: 57-68.
- Sheppard, C. (2010) Coralpedia, A guide of Caribbean corals, octocorals and sponges. Version 1. <<http://coralpedia.bio.warwick.ac.uk>>. Consultado 20 noviembre 2010
- Szmant, A. (1986) Reproductive ecology of Caribbean reef corals. *Coral Reefs*. 5:43-54.

- TNC. (2022). The Mesoamerican Reef is the largest barrier reef in the Western Hemisphere. <<https://www.nature.org/en-us/get-involved/how-to-help/places-we-protect/mesoamerican-reef/>> Consultado 02 enero 2023.
- Torres, J. L., Armstrong, R. A., Corredor, J. E. & Gilbes F. (2007) Physiological responses of *Acropora cervicornis* to increased solar irradiance. *Photochemistry and Photobiology*. 83: 839-850.
- UN. (2022). Día internacional para la conservación de la capa de ozono. <<https://www.un.org/es/observances/ozone-day#:~:text=El%20objetivo%20principal%20del%20Protocolo,los%20conocimientos%20cient%C3%ADficos%20e%20informaci%C3%B3n>> Consultado 03 enero 2023.
- Van Oppen, M. (2001) *In Vitro* establishment of symbiosis in *Acropora millepora* planulae. *Coral Reefs*. 20: 200.
- Villinski, J. T. (2003) Depth-independent reproductive characteristics for the Caribbean reef-building coral *Montastraea faveolata*. *Marine Biology*. 142: 1043-1053.
- Weil, E. & Knowlton, N. (1994) A multi-character analysis of the Caribbean coral *Montastraea annularis* (Ellis and Solander, 1786) and its two sibling species, *M. faveolata* (Ellis and Solander, 1786) and *M. franksi* (Gregory, 1895). *Bulletin of Marine Science*. 55: 151-175.
- Wellington, G. M. & Fitt, W. K. (2003) Influence of UV radiation on the survival of larvae from broadcast-spawning reef corals. *Marine Biology*. 143: 1185-1192.
- Weatherhead, E. C. & Andersen S. B. (2006) The search for signs of recovery of the ozone layer. *Nature*. 441: 39-45.
- Williamson, C. E., Madronich, S., Lal, A., Zepp, R. E., Lucas, R. M., Overholt, E. P., Rose, K. C., Schladow, G. & Lee-Taylor, J. (2017) Climate change-induced increases in precipitation are reducing the potential for solar ultraviolet radiation to inactivate pathogens in surface waters, *Scientific Report*. 7. 13033.
- WUI (2011) Weather history & data archive. <<http://www.wunderground.com/>>. Consultado 08 marzo 2011.
- Zeman, G. (2010) Health Physics Society, Specialists in Radiation Safety. Ultraviolet Radiation. <<http://www.hps.org/hpspublications/articles/uv.html>>. Consultado 09 junio 2010.

- Zhou, J., Fan, T. Y., Beardall, J. & Gao, K (2016) Incident ultraviolet irradiances influence physiology, development and settlement of larva in the coral *Pocillopora damicornis*. *Photochemistry and Photobiology*. 92: 293-300.
- Zhou, J., Fan, T. Y., Beardall, J. & Gao, K. (2017) UV-A induced delayed development in the larvae of coral *Seriatopora caliendrum*. *Journal of Photochemistry & Photobiology*. 167:249-255