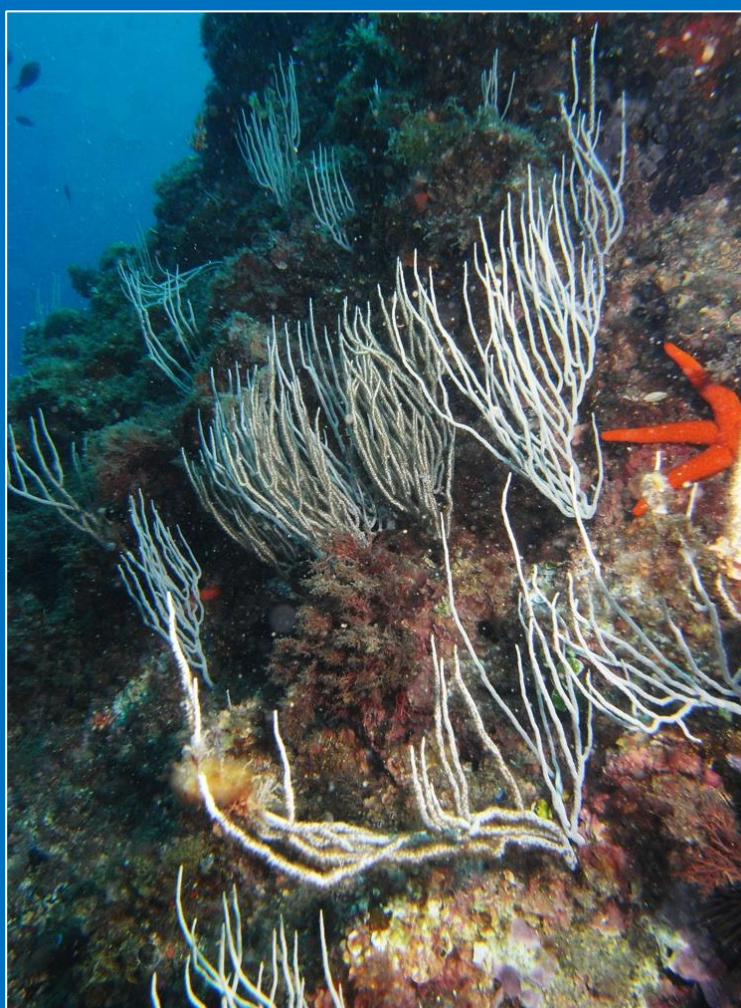


Evento de mortalidad en masa de 2018 en la gorgonia blanca *Eunicella singularis*: evaluación de la técnica de poda de ramas muertas como herramienta de gestión para su conservación.

Mass mortality event in 2018 on the white gorgonian *Eunicella singularis*: evaluation of the dead branch pruning technique as a management tool for its conservation.



Gerard Mas Jiménez

Máster en Biología Marina: Biodiversidad y Conservación. Universidad de La Laguna. Julio 2020

Tutora Universidad de La Laguna:

Dr. Covadonga Rodríguez González

Tutor CEAB-CSIC: Dr. Rafel Coma Bau

Supervisor CEAB-CSIC: Dr. Eduard Serrano Gras

Fotografía de la portada: Facies de la gorgonia blanca *Eunicella singularis* en Illa Pedrosa norte, Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter (Mediterráneo nord-occidental). Fotografía realizada el año 2011, antes del episodio de mortalidad en masa del año 2018. Autor: Eduard Serrano.

Citar como:

Mas G (2020) Evento de mortalidad en masa de 2018 en la gorgonia blanca *Eunicella singularis*: evaluación de la técnica de poda de ramas muertas como herramienta de gestión para su conservación. Trabajo de Final de Máster en Biología Marina: Biodiversidad y Conservación. Universidad de La Laguna. 24 pp.

La **Dra. Covadonga Rodríguez González**, profesora titular en la Universidad de La Laguna y el **Dr. Rafel Coma Bau**, científico titular en el Centro de Estudios Avanzados de Blanes-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, como Tutora Académica y Tutor Externo, respectivamente,

DECLARAN:

Que la memoria presentada por el Graduado en Biología, **Don Gerard Mas Jiménez** titulada

“Evento de mortalidad en masa de 2018 en la gorgonia blanca *Eunicella singularis*: evaluación de la técnica de poda de ramas muertas como herramienta de gestión para su conservación.”,

ha sido realizada bajo su dirección y consideran que reúne todas las condiciones de calidad y rigor científico requeridas para optar a su presentación como Trabajo de Fin de Máster, en el Máster Oficial de Postgrado de Biología Marina: Biodiversidad y Conservación de la Universidad de La Laguna, curso 2019-2020.

Y para que así conste y surta los efectos oportunos, firman el presente informe favorable en San Cristóbal de La Laguna a 3 de julio de 2020.

Firmado por COMA BAU RAFAEL -
DNI 33931817D el día 03/07/2020
con un certificado emitido por
AC Administración Pública

Fdo. Dra. Covadonga Rodríguez González

Fdo. Dr. Rafel Coma Bau

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2615800 Código de verificación: GI4ouuh/

Firmado por: Covadonga Rodríguez González
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 05/07/2020 11:27:07

Índice

Introducción.....	1
El mar Mediterráneo y el cambio global.....	1
La gorgonia blanca <i>Eunicella singularis</i> como caso de estudio.....	2
Ciclo reproductivo de <i>Eunicella singularis</i>	5
Episodios de mortalidad en masa en <i>Eunicella singularis</i>	6
Material y métodos.....	9
Área de estudio.....	9
Impacto del episodio de mortalidad en el año 2018.....	10
Instalación de parcelas fijas de seguimiento para estudiar los parámetros demográficos.....	12
Diseño experimental en las parcelas fijas de seguimiento: Control <i>versus</i> Poda.....	12
Incidencia de mortalidad en las parcelas Control <i>versus</i> Poda.....	16
Producción gonadal en función del porcentaje de mortalidad parcial.....	16
Análisis estadístico.....	19
Resultados.....	22
Impacto del episodio de mortalidad en el año 2018.....	22
Estado de conservación de las poblaciones de <i>E. singularis</i>	24
Actuación de poda.....	26
Seguimiento al cabo de 1 año.....	27
Tasa anual de mortalidad: Control <i>versus</i> Poda.....	27
Variación anual en la mortalidad parcial: Control <i>versus</i> Poda.....	29
Reproducción.....	32
Proporción de sexos.....	32
Fertilidad.....	32
Producción gonadal en función de la mortalidad parcial.....	33
Colonias Femeninas.....	33
Colonias Masculinas.....	34
Efecto de la poda sobre la producción gonadal.....	37
Colonias femeninas.....	38
Colonias masculinas.....	39

Discusión.....	42
Impacto del episodio de mortalidad en el año 2018.....	42
Estado de conservación de las poblaciones de <i>E. singularis</i>.....	43
Actuación de poda.....	44
Seguimiento al cabo de 1 año.....	46
Reproducción.....	47
Proporción de sexos y fertilidad.....	47
Producción gonadal en función de la mortalidad parcial.....	49
Efecto de la poda sobre la producción gonadal.....	51
Conclusiones.....	53
Agradecimientos.....	54
Bibliografía.....	56

Resumen

Las gorgonias son organismos filtradores bentónicos que ejercen un papel clave como especies ingenieras en el mar Mediterráneo. En las últimas décadas, el aumento de episodios climáticos extremos ha provocado diversos eventos de mortalidad en masa. A principios de otoño de 2018 se observó cómo una prolongación de las condiciones estivales debida a la elevada temperatura provocó un evento de mortalidad de las poblaciones de las gorgonias del Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter (noroeste del Mediterráneo), y el presente trabajo estudió los efectos de este evento en las poblaciones de la gorgonia blanca *Eunicella singularis*. Además, la instalación de parcelas fijas permitió examinar los resultados de la aplicación de una innovadora herramienta de gestión de las poblaciones de gorgonias: la poda de ramas muertas. Los resultados obtenidos mostraron cómo este evento de mortalidad afectó gravemente al estado de conservación y la producción gonadal de las poblaciones estudiadas. Los resultados de la técnica de poda mostraron cómo la actuación de poda favorece la supervivencia de las colonias contribuyendo a reducir significativamente la mortalidad parcial al cabo de 1 año. Sin embargo, la poda de ramas muertas no consiguió mejorar la producción gonadal de las colonias del primer ciclo reproductivo después del evento de mortalidad, posiblemente porque la producción gonadal se ve reducida durante un periodo de tiempo más largo al de la duración de este estudio, debido a la inversión prioritaria de los recursos energéticos en la regeneración del tejido vivo perdido después de un evento de mortalidad en masa para favorecer su supervivencia. Futuros estudios a largo plazo permitirán elucidar los beneficios del uso de la técnica de poda para la gestión de los bosques de gorgonias.

Palabras clave: Mar Mediterráneo, gorgonias, calentamiento global, mortalidad, reproducción.

Abstract

Gorgonians are benthic suspension feeders that play a key role as engineering species in hard-bottom substrates in the Mediterranean Sea. During the last decades, extreme weather episodes have increased in frequency and intensity leading to mass mortality events. In autumn 2018, it was observed that the prolonged high-water temperature conditions during summer led to a mass mortality event of the gorgonian populations in the Natural Park El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter (north-western Mediterranean). The present work studied the effects of this event on the populations of the white gorgonian *Eunicella singularis*. Moreover, by means of installing permanent plots, it was possible to assess the innovative technique of pruning dead branches on gorgonians oriented to improve their management and preservation. The results showed how this mortality event severely affected the preservation status and gonadal production of the studied population. Besides, the results of the pruning technique revealed how pruning helped to the preservation of the colonies by reducing partial mortality at the end of the experiment, 1 year later. Nevertheless, the pruning technique of dead branches failed to improve gonadal production of colonies at the first reproductive cycle after pruning, probably because gonadal production is reduced over a longer time period than the duration of this study, due to the priority of reallocation of energetic resources to regenerate lost tissues after a mass mortality event in order to favor colony survivorship. Future long-term studies may demonstrate the possible benefits of the use of the pruning technique for the management the gorgonian forests.

Keywords: Mediterranean Se, gorgonians, global warming, mortality, reproduction.

Introducción

El mar Mediterráneo y el cambio global

El cambio global originado por los impactos directos e indirectos de la actividad humana es una de las principales causas de las grandes perturbaciones ecológicas acontecidas en los últimos tiempos y que, en el Mediterráneo, ha ido claramente aumentando en magnitud durante los últimos 20-25 años (Cerrano et al., 2005, Coma et al., 2009). La actual tendencia de calentamiento global ha resultado en un amplio espectro de respuestas en los ecosistemas marinos, tales como cambios en la productividad, en la fisiología y en las distribuciones geográficas de las especies, en la composición de las comunidades y modificaciones en los patrones de migración (Clemente et al., 2011; Coma et al., 2009, Garrabou et al., 2009, Girard et al., 2012, IPCC, 2007, Sangil et al., 2012, Serrano et al., 2013, Verdura et al., 2019). Los resultados de diferentes revisiones auguran una tendencia al incremento de la intensidad y la frecuencia de las anomalías térmicas que conllevan a verdaderos eventos de mortalidad en masa en organismos marinos (Calvo et al., 2011, Rivetti et al., 2014).

Numerosos eventos de mortalidad en masa documentados comprenden la regresión de especies ingenieras, muchas de las cuales son organismos filtradores suspensívoros tales como corales, esponjas y gorgonias (Coma y Ribes., 2003, Garrabou et al., 2009). Su amplia complejidad estructural contribuye a la biodiversidad de los ecosistemas, además de tener un papel muy importante en el acoplamiento pelágico-bentónico (Ballesteros, 2006, Coma et al., 2009). En este escenario, la frecuencia e intensidad de estos eventos puede causar la pérdida de la biodiversidad marina y de funciones importantes que realizan los ecosistemas. Diversos estudios han demostrado que uno de los principales factores que causan las mortalidades en masa y perturban la dinámica de las comunidades bentónicas está relacionado con el calentamiento global, no tanto debido al progresivo incremento de la temperatura del agua del mar, sino a causa de los eventos climáticos extremos (Cerrano et al., 2008, Coma et al., 2009, IPCC 2007). Estos eventos han modificado las comunidades bentónicas de fondos rocosos afectando a la distribución, la fisiología y la fenología de muchas especies.

En el Mar Mediterráneo, las anomalías térmicas a finales de verano y durante el otoño conllevan una prolongación del tiempo durante el cual la termoclina estacional persiste, de manera que la mayor exposición de los organismos bentónicos a las elevadas temperaturas presentes en la capa superficial de la columna de agua (i.e., por encima de la termoclina), ha provocado múltiples episodios de mortalidad en masa en las comunidades del coralígeno (Coma

et al., 2009, Garrabou et al., 2009). La causa de los episodios de mortalidad se describe básicamente por la interacción de dos factores, la prolongación de la estratificación (temperatura más elevada y durante más tiempo de lo habitual) y el agotamiento de recursos tróficos en la capa de agua superior a la termoclina debido al impedimento de ser suplidos por la masa de agua profunda rica en nutrientes (Coma y Ribes, 2003; Coma et al., 2009). Habitualmente, durante los períodos estivales muchas especies suspensívoras adoptan la estrategia de reducir su actividad vital (estivación) para así lidiar contra el estrés fisiológico asociado al período estival (Coma et al., 2000, Coma y Ribes, 2003, Rossi et al., 2006). Estos eventos de mortalidad en masa han afectado a un amplio espectro de especies en grandes áreas geográficas, incluyendo gran parte del Mediterráneo nord-occidental, aunque han afectado de forma desigual a nivel local o regional (Bavestrello et al., 1994, Coma et al., 2009, Garrabou et al., 2009, Linares et al., 2005, Pilczynska et al., 2016).

La gorgonia blanca *Eunicella singularis* como caso de estudio

La comunidad del coralígeno es una de las más emblemáticas del Mediterráneo y puede ser descrita como una comunidad con una baja tasa de renovación, que se desarrolla sobre sustratos duros de origen biogénico debido a la acumulación de algas calcáreas incrustantes, que crecen en zonas con escasa iluminación (Ballesteros, 2006). La comunidad del coralígeno se puede encontrar en mayor esplendor en la zona circalitoral, aunque también puede desarrollarse en la zona infralitoral, donde habita superficies pequeñas con poca luminosidad en paredes verticales, canales profundos o salientes. Además, se desarrolla en áreas con fuertes corrientes. La estructura tridimensional de la comunidad del coralígeno permite el desarrollo de múltiples comunidades de algas en las franjas superiores, junto con la meiofauna (moluscos, crustáceos, etc.) y filtradores suspensívoros (esponjas, tunicados, gorgonias, etc.), con una elevada biodiversidad y más de 1,600 especies distintas descritas (Ballesteros, 2006). La alta complejidad de estas comunidades se hace aún más visible con la aparición de la fauna epibionte que se sirve de las estructuras de las gorgonias entre otras, tanto como alimento como asentamiento, dando lugar a multitud de relaciones tróficas en la comunidad (mutualismo, comensalismo y parasitismo; Ballesteros y Karim, 2003).

Las gorgonias (Cnidaria, Octocorallia, Anthozoa) son de las especies más conspicuas de las comunidades rocosas del coralígeno en el Mediterráneo, y juegan un papel ecológico muy importante como especies clave e ingenieras, puesto que proporcionan hábitats y/o refugio para

distintas especies, gracias a sus colonias erectas de morfología arborescente (Ballesteros, 2006, Ponti et al., 2016.). Las gorgonias crean una estructura tridimensional que proporciona una mayor complejidad a la comunidad, un hábitat característico que puede albergar una gran cantidad de especies tanto vágiles como sésiles, además de aumentar la biomasa y la biodiversidad de este ecosistema (Ballesteros y Karim, 2003; Coma et al., 1998a, Verdura et al., 2019). La ecología y la fisiología de las gorgonias están fuertemente ligadas a las condiciones ambientales tales como la temperatura del agua, la velocidad de la corriente, la luz, y la cantidad y calidad del alimento disponible (Gili y Coma, 1998, Gori et al, 2012b).

La contribución de las gorgonias en los ecosistemas bentónicos se hace más relevante al ser un canal de transferencia de energía y materia, desde el medio pelágico al medio bentónico, gracias a su alimentación heterótrofa por filtración. Las gorgonias se alimentan heterotróficamente de un gran abanico de recursos tróficos, desde zooplancton, nanoplancton, picoplancton, hasta materia orgánica particulada. Además, algunas especies de gorgonias contienen zooxantelas simbiotas que les proporcionan la capacidad de alimentarse también autotróficamente (Coma et al., 2009, 2015, Gori et al., 2012a, Ribes et al., 1999).

Las gorgonias se caracterizan por un crecimiento modular que se basa en la producción asexual de nuevos módulos energéticamente autosuficientes, los pólipos. Este crecimiento, combinado con el hecho de que el superávit de energía atribuible al crecimiento y a la reproducción crece proporcionalmente con la masa de la colonia, hace que el crecimiento sea teóricamente ilimitado (Coma et al., 1998b). Numerosos factores determinan el crecimiento de las colonias, por ejemplo, la especie, la edad, la localidad y la variación anual de las condiciones ambientales, entre otros. (Weinberg y Weinberg, 1979). Las gorgonias, que en algunas especies pueden alcanzar >100 cm de altura son organismos de crecimiento lento, con tasas anuales promedio de crecimiento de 2.2 cm año⁻¹ para *E. singularis* (Weinberg y Weinberg, 1979), entre 0.8-1.1 cm año⁻¹ en *Eunicella cavolinii* (Weinbauer y Velimirov, 1995) y entre 1.8-2.7 cm año⁻¹ en *Paramuricea clavata* (Coma et al., 1998a). El crecimiento lento, la pobre capacidad de dispersión por reproducción sexual, el bajo e infrecuente reclutamiento, la alta mortalidad en reclutas y la madurez tardía, hacen de las gorgonias un grupo muy vulnerable a los impactos del cambio climático, con las posibles consecuencias que pueden derivarse para el conjunto de la comunidad en la que estas especies clave se desarrollan (Coma et al., 2004, Linares et al., 2005, 2007, 2008a, Verdura et al., 2019).

Entre las gorgonias mediterráneas, la gorgonia blanca *E. singularis* (Esper, 1794) es una de las especies más comunes y abundantes (Gori et al., 2011a). Esta especie, a la par que la mayoría de las gorgonias, tiene una vida longeva que puede llegar a más de 50 años (Coma et al., 2004). Aunque su distribución geográfica también incluye el Este del Mediterráneo, sus poblaciones son escasas y poco desarrolladas. Las colonias adultas tienen una morfología en forma de candelabro, con largas ramas primarias que crecen en paralelo y con relativamente pocas ramificaciones (Gori et al., 2012a). La colonia se sustenta por un eje de consistencia dura, formado por la agrupación de espículas de gorgonina. Este eje, es envuelto por el tejido blando (cenénquima) que a su vez incorpora a los pólipos. Tiene un crecimiento modular asexual, que permite a la colonia crecer en biomasa de forma ilimitada (Coma et al., 1998b). Su patrón de coloración puede variar desde un color gris blanquecino hasta un color blanco brillante (Gori et al., 2012a).

E. singularis es la única especie de gorgonia del Mediterráneo con capacidad de alimentarse de manera dual: heterotrófica- y autotróficamente (Coma et al., 2009, 2015, Gori et al., 2012a, Ribes et al., 1999). Las zooxantelas simbiotes en *E. singularis* son dinoflagelados del género *Symbiodinium* que transfieren la mayor parte del carbono fotosintetizado a la gorgonia (Ezzat et al., 2013). La distribución batimétrica de *E. singularis* incluye la franja comprendida entre los 10 y los 70 m de profundidad, con poblaciones más abundantes entre los 10 y los 25 m de profundidad (Gori et al. 2011b). Esta especie presenta un amplio rango de tolerancia a los factores abióticos, y es común en sustratos rocosos con fondos cubiertos de sedimentos horizontales o inclinados (Linares et al., 2008a). Gori y colaboradores (2011b, 2012a) describieron cómo las características biológicas y ecológicas de *E. singularis* varían con la profundidad, distinguiendo las poblaciones someras (10-25 m de profundidad) y las profundas (50-67 m de profundidad). Estos dos tipos de poblaciones se diferencian por distintas características tales como el almacenamiento de energía, la presencia de zooxantelas simbiotes y el ciclo reproductivo, entre otras (Gori et al., 2011b, 2012a). Durante el verano, la concentración de zooplancton en las aguas someras se vuelve muy escasa, de manera que las gorgonias de las poblaciones someras consiguen suplir la escasez de zooplancton gracias a la actividad simbiote de las zooxantelas (Cocito et al., 2013).

Ciclo reproductivo de *Eunicella singularis*

La gorgonia blanca *E. singularis* es una especie dioica, con colonias masculinas y femeninas (Ribes et al., 2007, Gori et al. 2007). El ciclo reproductivo de *E. singularis* presenta un episodio anual de liberación de los productos sexuales, entre finales de mayo y principios de junio (Ribes et al., 2007). La fertilización es interna, de manera que los espermatozoides son liberados a la columna de agua y fecundan las gónadas femeninas que se encuentran dentro de las cavidades corporales de los pólipos de las colonias femeninas. La segmentación holoblástica y el desarrollo del cigoto también es interna, liberándose una larva plánula a la columna de agua. La larva plánula es de un color rosado brillante debido a las reservas vitelinas que le permiten sobrevivir durante esta fase móvil. Su tamaño normalmente es de unos 2.5 x 0.5 mm, presenta una baja capacidad de natación y una flotabilidad negativa, por lo que acostumbra a asentarse en un sustrato cercano a la colonia madre (entre 2 y 60 m; Pilczynska, et al., 2016, Weinberg, 1979). Una vez la larva se encuentra sobre un sustrato, empieza a arrastrarse gracias a sus cilios y/o acompañado por un dextrógiro a lo largo de su eje principal. La larva presenta cierta capacidad para escoger un lugar de asentamiento en base a las condiciones ambientales: un sustrato rocoso adecuado, con cierta rugosidad, ausencia de otros organismos y una óptima iluminación (ya que la larva presenta fototropismo positivo; Weinberg, 1979). Este período puede llevar aproximadamente 30 horas y, posteriormente, la larva empieza a invaginar y a convertirse en el pólipo primario, el cual empieza a desarrollar los tentáculos que son claramente visibles a los dos días del asentamiento, y se desarrolla completamente a los 4 días (Weinberg y Weinberg, 1979). Las colonias pequeñas consistentes en pocos pólipos son observadas visualmente a los 4-5 meses del desove (Ribes et al., 2007).

La reproducción sexual de las gorgonias juega un papel crucial no solo necesario para mantener la descendencia, así como las poblaciones, sino para generar la necesaria variabilidad genética que permita a las poblaciones afrontar cambios ambientales en el futuro (Ribes et al., 2007). *E. singularis* es una gorgonia con gonocorismo estable, y con una proporción 1:1 de colonias de ambos sexos (Ribes et al., 2007). Aunque las colonias sean de un solo sexo, las colonias no presentan ningún carácter sexual diferencial, aparte de la morfología de las gónadas, que permita distinguir el género. Mientras las gónadas femeninas (ovocitos) tienen una consistencia mayor, las gónadas masculinas (sacos espermáticos) tienen menor consistencia (Ribes et al., 2007, Gori et al., 2011b). Las gónadas femeninas se caracterizan por ser una única célula de gran tamaño con mucho contenido vitelino, mientras que las gónadas masculinas son sacos espermáticos de menor tamaño que los ovocitos, y contienen un elevado número de

células espermáticas. Las gónadas de ambos géneros se encuentran desarrollándose dentro del pólipo unidas al mesenterio. El período de gametogénesis difiere entre sexos, siendo de entre 13 y 17 meses, para las gónadas femeninas y de entre 4 y 6 meses para las gónadas masculinas. El hecho de ser una especie con un único evento anual de liberación de los productos sexuales y un largo período de maduración de los ovocitos induce a la coexistencia de dos cohortes de gónadas femeninas. La cohorte de ovocitos maduros ($\geq 300 \mu\text{m}$) será fecundada en el próximo evento reproductivo mientras que la cohorte de gónadas inmaduras ($< 300 \mu\text{m}$) seguirá su ciclo de gametogénesis un año más hasta su maduración y liberación (Ribes et al., 2007). La inversión en reproducción incrementa con el tamaño de las colonias, de manera que las colonias alcanzan una completa madurez a partir de los 30 cm de altura máxima, para ambos sexos (Marta Ribes, ICM-CSIC, datos no publicados). En cuanto a la producción gonadal, las ramas de orden menor, las que se hallan más distales a la base, están más desarrolladas sexualmente que las ramas de la base de las colonias (Marta Ribes, ICM-CSIC, datos no publicados).

Episodios de mortalidad en masa en *Eunicella singularis*

Durante las dos últimas décadas, los eventos de mortalidad en masa han afectado a las poblaciones de gorgonias mediterráneas durante el período post-estival, destacando los episodios del 1999, 2003, 2009, 2011 y 2018 (Bonhomme et al., 2003, Gambi y Barbier, 2012, Garrabou et al., 2009, Huete-Stauffer et al., 2011). Ello es debido a la prolongación en el tiempo de las condiciones estivales, caracterizadas por la persistencia de la termoclina por debajo de la distribución de las poblaciones someras de *E. singularis*. Las poblaciones distribuidas en los límites superiores (menor profundidad) están expuestas más tiempo a esta termoclina, con lo cual son las más afectadas (Calvo et al. 2011; Serrano et al., 2019). La mortalidad parcial de las colonias tiene su explicación en la afectación de la fisiología. Las altas temperaturas y la irradiación solar provocan una disminución de la actividad fotosintética (por la degradación o expulsión de los organismos simbiotes) y no se lograría paliar la escasez de alimento del verano (debido a la estratificación y por lo tanto, el nulo aporte de nutrientes de las capas profundas, debajo de la termoclina estacional; Coma y Ribes, 2003), provocando una reducción de las tasas de calcificación y fotosíntesis dando lugar a más radicales libres con los que los sistemas de defensa antioxidativa no pueden hacer frente y terminan dañando a los tejidos e incluso produciendo la necrosis de éstos y desprendiéndose de los ejes de las colonias (Baker et al., 2008; Ezzat et al., 2013, Ferrier-Pagès et al. 2009). También algunos eventos de

mortalidad han sido producidos por tormentas extremas que causan disminuciones en la densidad de las poblaciones (Coma et al., 2012). Además, las actividades humanas como el efecto del impacto de las aletas de los buceadores no concienciados y las artes de pesca abandonadas diezman la densidad y la viabilidad de las poblaciones de gorgonias (Coma et al., 2004, Linares et al., 2010).

Debido a la estructura modular de las gorgonias, éstas pueden vivir a pesar de tener alguna parte de la colonia muerta (Coma et al., 1998b). La mortalidad parcial suele estimarse visualmente como el porcentaje de las ramas muertas de la colonia respecto al total de ramas de la colonia (Linares et al., 2005; Serrano et al., 2019). La mortalidad parcial se categoriza según la antigüedad: reciente y antigua (Harmelin y Marinopoulos, 1994). Así pues, la mortalidad parcial reciente se define como el porcentaje de la superficie de la colonia desprovista de tejido vivo (cenénquima), en que solo se observa el eje de la colonia desnudo. En cuanto a la mortalidad parcial antigua, se define como el porcentaje de la superficie muerta de la colonia en la que el eje ha sido recubierto por organismos epifitos, siendo el recubrimiento un proceso que requiere de > 1-2 meses (Linares et al., 2005; Serrano et al., 2019). Los organismos epifitos más frecuentes, agrupados en grandes grupos taxonómicos, son las algas filamentosas, hidrarios, briozoos, algas calcáreas, poliquetos, poríferos, antozoos y ascidias. También resulta interesante la sucesión ecológica de estos grupos taxonómicos a lo largo del tiempo (Linares et al., 2005).

En otoño del 2018, la elevada temperatura de las capas superficiales del agua del mar prolongó las condiciones estivales causando un evento de mortalidad en masa en las gorgonias de la Costa Brava (Cataluña, España; Hereu et al., 2018, Rafel Coma y Eduard Serrano, CEAB-CSIC, datos no publicados). En este contexto, el presente trabajo final de máster (TFM) consideró estudiar los efectos de esta anomalía térmica que conllevó a la mortalidad en masa de la gorgonia blanca *E. singularis*. Por lo tanto, el primer objetivo de este trabajo fue estudiar la incidencia de mortalidad (tanto la mortalidad total como la mortalidad parcial de las colonias) de las poblaciones de *E. singularis* a causa de este evento. Además de estudiar la mortalidad, consecuencia directa de este episodio fue muy interesante e incluso parte fundamental de este trabajo, examinar posibles consecuencias indirectas de este evento, a través del estudio de la variación en la producción gonadal de la especie en función del porcentaje de mortalidad parcial de las colonias, en el próximo evento reproductivo de la especie a finales del mayo del 2019.

El segundo objetivo de este TFM fue poner en práctica y validar científicamente una técnica novedosa de gestión para la conservación de la gorgonia *E. singularis*: la poda de ramas muertas. En base al conocimiento científico actual, la disminución de la mortalidad parcial de las colonias de gorgonias con la poda podría mejorar la viabilidad de sus poblaciones a través de disminuir la mortalidad por desprendimiento del sustrato, así como incrementar la fecundidad y el reclutamiento (Linares et al. 2005; Linares and Doak 2010). En efecto, las gorgonias con una elevada incidencia de mortalidad parcial (>50% de su superficie afectada) muestran una tasa de mortalidad mayor a largo plazo, en comparación con las gorgonias sanas o con menor incidencia de mortalidad parcial (Linares et al. 2005). Un estudio piloto previo sobre los beneficios de la técnica de poda en la gorgonia *Ellisella paraplexauroides* realizado en las Islas Chafarinas (mar de Alborán), con un número de colonias limitado, muestra posibles efectos positivos del uso de la técnica de poda (Sánchez-Tocino et al., 2017). Así pues, el presente TFM pretende evaluar los posibles beneficios de la técnica de poda para la conservación de las poblaciones de *E. singularis*, a través del estudio de las diferencias en la incidencia de mortalidad en parcelas fijas de seguimiento de los tratamientos Control y Poda, y del estudio de su producción gonadal en función del cambio en la mortalidad parcial después de la actuación de poda, en el próximo evento reproductivo de la especie a finales del mayo del 2019.

Material y métodos

Área de estudio

Durante el periodo post-estival del año 2018 tuvo lugar un episodio de mortalidad en las poblaciones de *E. singularis* del Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter (Mediterráneo noroccidental), con una mortalidad que varió geográficamente entre el 40 y el 80% de incidencia de mortalidad parcial de las colonias en las 6 localidades estudiadas (Hereu et al., 2018, Serrano et al., 2019). El presente estudio se ha realizado en dos localidades distintas, también pertenecientes al Parque Natural (Illa Pedrosa, 42°04'27.7"N–3°12'19.1"E; y Tascó Gran 42°2'31.0"N–3°13'38.0"E; Fig. 1). Illa Pedrosa se localiza en la costa del Montgrí, mientras que el Tascó Gran es un islote situado a ~ 2 Km de la costa, en el archipiélago de las Illes Medes. Ambas localidades presentan poblaciones abundantes de la gorgonia blanca *E. singularis* en un rango de profundidad de 8 a 25 m, con una densidad máxima entre los 10 y los 15 m (Serrano et al., 2019).



Figura 1. Zona de estudio en el Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter (Mediterráneo noroccidental). Se indican las dos localidades estudiadas: Illa Pedrosa en la costa del Montgrí y el Tascó Gros en el archipiélago de las Illes Medes.

Impacto del episodio de mortalidad en el año 2018

Para evaluar el impacto del episodio de mortalidad acaecido durante el periodo post-estival del año 2018, en noviembre de 2018 se examinaron dos poblaciones de la gorgonia *E. singularis*, en las localidades de Illa Pedrosa y Tascó Gros, mediante cuadros (0.25 m²) al azar dispuestos a una profundidad de entre 12 y 14 m. Para cada colonia, se midió la altura máxima con una regla, midiendo la distancia desde el punto de anclaje de la base de la gorgonia al sustrato hasta la punta de la rama más larga, con una precisión de 0.5 cm (Linares et al., 2005; Serrano et al., 2019). También se estimó el porcentaje de mortalidad parcial diferenciando entre reciente o antigua. La mortalidad reciente se manifiesta en forma de ramas de la gorgonia desprovistas de tejidos blandos y de epífitos que, recientemente (aproximadamente 1-2 meses), han perdido el tejido de color blanco. En el caso de la mortalidad antigua, las ramas desprovistas de tejidos blandos han sido recubiertas por organismos epífitos que han crecido encima de las ramas, un proceso que requiere >1-2 meses (Linares et al., 2005; Serrano et al., 2019). La zona donde se localizaba dicha mortalidad también se registró, diferenciando entre apical y basal. La zona apical o basal se refiere a la posibilidad de podar las ramas de la gorgonia sin perder tejido blando (apical) o perdiendo tejido blando (basal). Además, fue recopilada la información sobre la naturaleza de los epibiontes, diferenciando entre grandes grupos taxonómicos, por ejemplo, algas filamentosas, algas calcáreas, hidrarios, briozoos, poliquetos y esponjas). Además, las colonias fueron clasificadas en 4 clases según la mortalidad parcial que presentaban (0-5%, > 5-33%, > 33-66% y > 66-99%; Linares et al., 2005; Fig. 2). A partir de los datos obtenidos con los cuadros al azar se han obtenido los siguientes parámetros demográficos:

- *Densidad* (número de colonias m⁻²).
- Porcentaje de colonias muertas (*% gorgonias muertas*, sin tejido blando) y Porcentaje de colonias vivas (*% gorgonias vivas*, con tejido blando).
- Porcentaje de mortalidad parcial (*% mortalidad parcial*, en un rango de 0 a 99% de la superficie de la colonia), distinguiendo 4 clases: 0-5%, > 5-33%, > 33-66% y > 66-99%; y considerando como gorgonias sanas aquellas que presentan ≤ 5% de la superficie afectada por mortalidad (Linares et al., 2008).
- Porcentaje de mortalidad parcial, distinguiendo 2 categorías en función de la antigüedad de la mortalidad: Porcentaje de mortalidad parcial reciente (*% mortalidad parcial reciente*) y el Porcentaje de mortalidad parcial antigua (*% mortalidad parcial antigua*).
- *Estructura de tallas* en clases de tamaño de 10 cm de altura máxima (Linares y Doak, 2010).

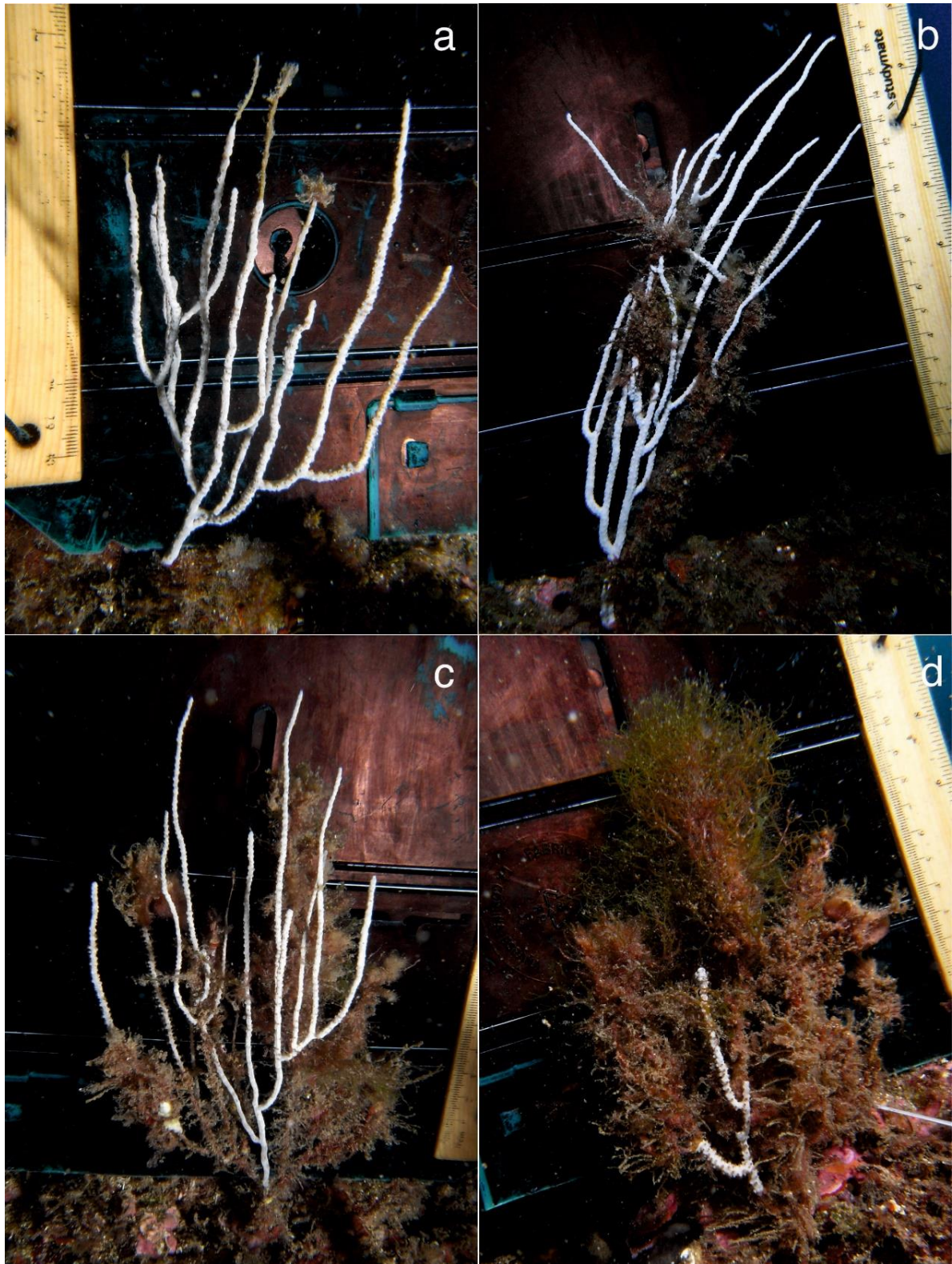


Figura 2. Fotografías de la gorgonia *Eunicella singularis* en las parcelas fijas de seguimiento del tratamiento Control, distinguiendo colonias con 4 clases de incidencia de mortalidad parcial. **a** 0-5% de la superficie de la colonia afectada, **b** > 5-33%, **c** > 33-66% y **d** > 66-99%. Fotografías: Eduard Serrano.

Instalación de parcelas fijas de seguimiento para estudiar los parámetros demográficos

Con el objetivo de validar científicamente la técnica de poda de ramas muertas como herramienta de gestión de las poblaciones de la gorgonia blanca *E. singularis*, se realizó un experimento científico mediante el uso de parcelas fijas de seguimiento. En la población de *E. singularis* de Illa Pedrosa se instalaron 8 parcelas fijas en diciembre de 2018 (Fig. 3). El tamaño aproximado de cada parcela era de 5 m de longitud (horizontal) y un ancho de 1 m (vertical), dividida en 20 cuadros de 0.5 x 0.5 m, con un área de $\sim 0.25 \text{ m}^2$ (Tabla 1). Las parcelas se instalaron al azar a lo largo de la cara noreste de Illa Pedrosa (Fig. 3), en paredes semi-verticales ($45\text{-}80^\circ$ de inclinación) y comunidades esciáfilas dominadas por algas calcáreas, a una profundidad de 12-14 m (Tabla 1). Las esquinas de las parcelas, así como las esquinas de los 20 cuadros que componen cada parcela, fueron marcados con tornillos de PVC fijados al sustrato rocoso, aprovechando agujeros naturales, con masilla de uso subacuático de dos componentes (IVEGOR[®]). La delimitación de los 20 cuadros de 50 x 50 cm de una parcela, mediante el uso de cintas elásticas de color blanco, permitió la identificación y mapeo individual de todas las colonias presentes en cada cuadro, de manera que se ha podido realizar un seguimiento demográfico de las colonias a lo largo del tiempo (Linares et al., 2005).



Figura 3. Mapa de la disposición de las 8 parcelas fijas de seguimiento en la cara noreste de Illa Pedrosa, en el Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter. Se indica la posición de las 4 parcelas Control y de las 4 parcelas Poda. Fotografía área de satélite, obtenida con Google Earth.

Diseño experimental en las parcelas fijas de seguimiento: Control *versus* Poda

La elevada incidencia de mortalidad parcial observada en la población de *E. singularis* en las poblaciones estudiadas (Illa Pedrosa y Tascó Gran) durante el periodo post-estival del año 2018 permitió el diseño de un experimento científico para estudiar los posibles beneficios de la

técnica de poda de ramas muertas, como herramienta de gestión de las poblaciones de la gorgonia blanca *E. singularis*. El diseño experimental se basa en el seguimiento individual de gorgonias mediante el uso de parcelas fijas, y consta de 2 tratamientos: parcelas Control (i.e., no se realizó ninguna actuación) y parcelas Poda (i.e., se realizó la actuación de Poda). A lo largo del periodo de estudio, se han realizado 2 campañas de seguimiento de las 8 parcelas fijas, el seguimiento inicial en enero de 2019 (T0) y el seguimiento al cabo de 349 días (~ 1 año) en diciembre de 2019 (T1). En el primer seguimiento se instalaron las 8 parcelas fijas y se mapearon todas las colonias de *E. singularis* presentes en cada cuadro de las parcelas, utilizando hojas de polivinilo y lápiz, con una plancha de plástico rígido de soporte. La localización de la posición de las gorgonias en cada cuadro de cada parcela facilita la identificación individual de las gorgonias en los muestreos posteriores. Para cada colonia se midió la altura máxima y se estimó visualmente el porcentaje de mortalidad parcial, y se calcularon los parámetros demográficos de cada parcela (igual que en el estudio con cuadros al azar del impacto del episodio de mortalidad del año 2018, *ver arriba*).

Tabla 1. Incidencia de mortalidad parcial en las colonias de *Eunicella singularis* de las parcelas fijas de seguimiento del experimento de poda en Illa Pedrosa (Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter). Se indica la profundidad promedio de cada parcela, calculada en base a las profundidades de sus 4 esquinas. Área: área de las parcelas. N: número de colonias examinadas. % Mortalidad parcial (porcentaje de la superficie de la colonia afectada): Promedio y Error Estándar (SE). Porcentaje de colonias sanas (0-5% mortalidad parcial), colonias afectadas (> 5-33%, > 33-66% y > 66-99% mortalidad parcial) y colonias totalmente muertas (100%).

Parcela	Profundidad (m)	Área (m ²)	FECHA	% Mortalidad parcial			% Colonias				
				N	Promedio	SE	0-5%	> 5-33%	> 33-66%	> 66-99%	100%
C1	12.8	6.62	T0	85	49	4	18	33	8	15	26
			T2	80	49	5	29	24	3	10	35
C2	12.8	7.20	T0	80	36	4	30	31	13	8	19
			T2	79	37	4	35	28	9	6	22
C3	13.6	5.51	T0	96	43	4	31	24	7	10	27
			T2	90	38	5	39	24	4	7	26
C4	13.5	6.42	T0	71	66	5	17	13	10	17	44
			T2	62	71	5	10	13	11	21	45
P1	13.9	5.03	T0-A	96	59	4	14	23	11	24	28
			T0-D	96	39	5	46	15	5	6	28
			T2	101	42	4	41	16	6	10	28
P2	12.4	5.97	T0-A	81	33	4	41	22	12	11	14
			T0-D	81	25	4	74	4	7	1	14
			T2	93	30	4	51	18	6	5	19
P3	13.9	6.14	T0-A	78	39	4	28	31	13	9	19
			T0-D	78	23	4	67	12	3	0	19
			T2	87	24	4	55	22	5	1	17
P4	14.2	6.32	T0-A	106	62	4	16	22	8	14	41
			T0-D	106	50	5	42	7	4	7	41
			T2	101	57	5	27	16	5	4	49

De las 8 parcelas fijas, 4 fueron establecidas como Control (C1, C2, C3 y C4) y las otras 4 como parcelas de Poda (P1, P2, P3 y P4). La actuación de poda en las parcelas Poda se llevó a cabo en el primer muestreo realizado en enero de 2019. Esta actuación consistió en podar las ramas muertas de las gorgonias que se localicaban en la zona apical de la colonia, de manera que la poda no implicara la pérdida de tejido vivo de la gorgonia. Por lo tanto, solo se podaron las gorgonias que presentaban mortalidad parcial (i.e., > 0-99% de la superficie de la colonia afectada por mortalidad) y sólo las ramas que no presentaban tejido vivo en su extremo apical. Antes y después de la actuación de poda, las colonias podadas se clasificaron en 4 clases de mortalidad parcial, según el porcentaje de la superficie de la colonia afectada: **a** 0-5%, **b** > 5-33%, **c** > 33-66% y **d** > 66-99% (Fig. 4). Las ramas de gorgonias se podaron con unas tijeras de jardinería de acero inoxidable, las cuales realizan un corte limpio y sin desgarre, y se desinfectaron previamente a su uso con alcohol 96°. Además de la poda, las secciones muertas de las ramas que se localizaban en la zona basal de la colonia (i.e., con tejido vivo en el extremo apical de la rama) se limpiaron de epífitos (Fig. 4). La acción de limpiar los epífitos de las secciones muertas de las ramas facilita el cierre de la herida por parte del mismo tejido vivo de la gorgonia, un proceso que es más lento, o no tiene lugar, cuando la rama está recubierta de epífitos (Rafel Coma y Eduard Serrano, CEAB-CSIC, datos no publicados). Una vez realizada la actuación de poda se volvieron a tomar los datos biométricos de las colonias podadas (altura máxima y el porcentaje de mortalidad). En la siguiente campaña, realizada en diciembre de 2019 (al cabo de 1 año), se volvieron a tomar los datos biométricos de las colonias, tanto de las parcelas Control como de las parcelas Poda.

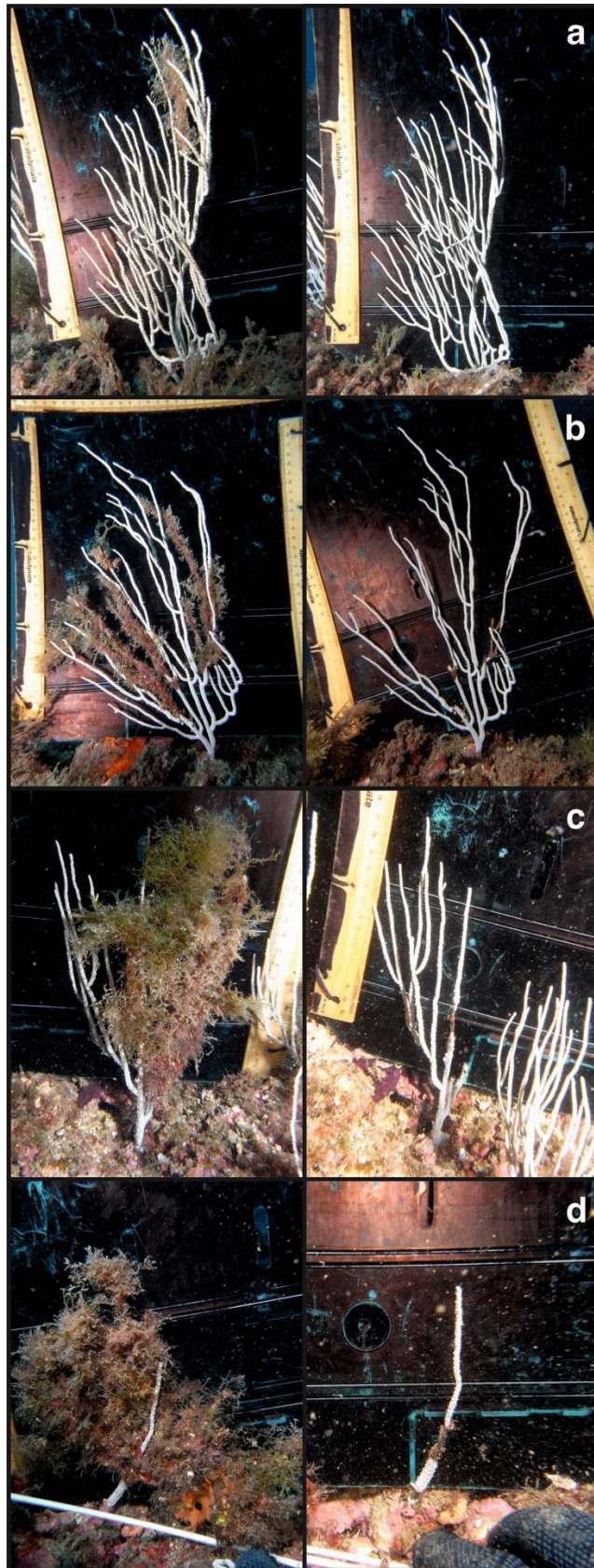


Figura 4. Fotografías de la gorgonia *Eunicella singularis* en las parcelas fijas de seguimiento del tratamiento Poda, distinguiendo las colonias en 4 clases de incidencia de mortalidad parcial. Fotografías de la misma colonia de gorgonia antes (izquierda) y después (derecha) de la actuación de poda. **a** 0-5% de la superficie de la colonia afectada, **b** > 5-33%, **c** > 33-66% y **d** > 66-99%. Fotografías: Eduard Serrano.

Incidencia de mortalidad en las parcelas Control versus Poda

En las parcelas fijas de seguimiento en Illa Pedrosa, los dos descriptores demográficos utilizados para validar los posibles beneficios de la técnica de poda de ramas muertas de las gorgonias como herramienta de gestión fueron la tasa anual de mortalidad de las colonias y la variación anual en la mortalidad parcial. La tasa anual de mortalidad fue estimada como la proporción de colonias vivas al inicio del experimento (T0) que al cabo de 1 año (T1, final del experimento) han muerto (Linares et al., 2005). Las colonias muertas son aquellas que se encuentran recubiertas por epifitos en su totalidad (100% mortalidad parcial, es decir sin tejido vivo) y aquellas que han desaparecido (debido al desprendimiento de las colonias del sustrato; Linares et al., 2005). La tasa anual de mortalidad se calculó con la siguiente fórmula:

$$\text{Tasa de mortalidad anual} = \left(\frac{\text{Colonias muertas a T1}}{\text{total de colonias vivas a T0}} \right) / 349 \times 365$$

La variación anual en la mortalidad parcial de las colonias fue estimada en base a los datos obtenidos al inicio del experimento (T0) y al cabo de 1 año (T1). La mortalidad parcial se consideró como el porcentaje de la superficie de la colonia que se hallaba sin tejido vivo, con o sin recubrimiento por epibiontes. En poblaciones sanas de la gorgonia *E. singularis*, no afectadas por eventos de mortalidad en masa, el promedio del porcentaje de mortalidad parcial de las poblaciones suele ser < 15% (Linares et al., 2008a). El efecto de la actuación de poda en la variación anual en la mortalidad parcial se analizó mediante la comparación de la incidencia de mortalidad parcial de las colonias en el seguimiento inicial antes y después de la poda (T0-A y T0-D, respectivamente), en base al total de colonias podadas. Para examinar el efecto de la actuación de poda a lo largo del experimento (~ 1 año) en la mortalidad parcial de las colonias, se compararon las parcelas Control con las Poda en base a la mortalidad parcial de las colonias entre el seguimiento inicial (T0 en parcelas Control y T0-A en parcelas Poda) y el seguimiento al cabo de un año (T1).

Producción gonadal en función del porcentaje de mortalidad parcial

Las muestras de las poblaciones de *E. singularis* en Illa Pedrosa y Tascó Gros para el estudio de la producción gonadal fueron recolectadas a una profundidad de entre 11 y 14 m mediante el uso de escafandra autónoma. La profundidad de 12-14 m fue establecida en este estudio para evitar sesgos por el efecto de la profundidad en la variabilidad demográfica de las poblaciones. En el presente estudio se han recolectado muestras de colonias dentro del rango de 20 a 30 cm

de altura máxima para evitar la interferencia de la variable edad. En el intervalo 20-30 cm de altura máxima, el porcentaje de colonias maduras es del 95%, en colonias sanas (Marta Ribes, ICM-CSIC, datos no publicados). La altura máxima de todas las colonias fue medida con una regla simple, des de la base hasta la punta de la rama más larga, con una precisión de 0.5 cm. Las muestras fueron recolectadas cortando una rama apical de aproximadamente 8-10 cm de longitud de cada colonia muestreada. Una vez fuera del agua, las muestras recogidas fueron fijadas inmediatamente en agua de mar con un 10% de formalina (Coma et al., 1995a).

Para evaluar los efectos de la mortalidad parcial en la producción gonadal se establecieron 4 clases de colonias según la incidencia de mortalidad parcial (0-5%, > 5-33%, > 33-66% y > 66-99%). En Illa Pedrosa y en Tascó Gros se recolectaron 30 muestras de colonias distintas al azar (30 ramas apicales) por cada clase de mortalidad parcial, con un total de 120 muestras por localidad (Tabla 2).

El efecto de la poda en la producción gonadal fue evaluado en Illa Pedrosa mediante la recolección de muestras de colonias podadas según su porcentaje de mortalidad parcial antes de la poda. En este sentido se recolectaron un total de 64 muestras de colonias podadas situadas en las parcelas podadas. Se estableció como control las colonias recolectadas en Illa Pedrosa descritas en el párrafo anterior (Tabla 2).

Tabla 2. Detalle de las muestras de *Eunicella singularis* recogidas para el estudio de la producción gonadal en las dos localidades estudiadas en el Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes y el Baix Ter. Se detallan las muestras Control de Illa Pedrosa y Tascó Gros, y las muestras para el estudio del efecto de la actuación de poda en illa Pedrosa. Se distinguen 4 clases de incidencia de mortalidad parcial: > 0-5%, > 5-33%, > 33-66% y > 66-99%. según la clase de mortalidad parcial de cada colonia.

Localidad	Tratamiento	Clase Mortalidad	Número de muestras
Illa Pedrosa	Control	0-5%	30
		> 5-33%	30
		> 33-66%	30
		> 66-99%	30
Tascó Gros	Control	0-5%	30
		> 5-33%	30
		> 33-66%	30
		> 66-99%	30
Illa Pedrosa	Poda	Antes poda 0-5%	3
		Antes poda > 5-33%	39
		Antes poda > 33-66%	13
		Antes poda > 66-99%	9

En el laboratorio, las muestras de ramas de *E. singularis* se retiraron al cabo de 48 horas de la solución fijadora (agua de mar y 10% de formalina) y se guardaron en una solución de alcohol 70%. Posteriormente, se determinó el sexo y la fertilidad de las colonias con la ayuda de una lupa binocular, según la bibliografía revisada sobre las características gonadales de cada género (Ribes et al., 2007; Fig. 5). Las colonias masculinas que presentaban dudas fueron examinadas al microscopio para determinar la presencia de espermatozoides. Una vez determinado el sexo y la fertilidad de las colonias (presencia de gónadas en al menos un pólipo de cada 10 observados; Rafel Coma, CEAB-CSIC, datos no publicados), se procedió a contar y medir las gónadas presentes en el interior de los pólipos con una lupa binocular. La extracción de las gónadas del interior de los pólipos se realizó mediante unas pinzas de punta fina y de forma meticulosa para no malograr las gónadas. Para cada muestra, se diseccionaron un total de 10 pólipos y se contó el número total de gónadas por cada pólipo y midieron todas las gónadas presentes con la ayuda de un ocular con una regla milimétrica. Debido a la forma de las gónadas (esférica o elipsoidal), para cada gónada se midieron los 2 diámetros máximos perpendiculares, y el cálculo del volumen de cada gónada se realizó en función de su forma (esférica o elipsoidal) utilizando las siguientes fórmulas:

$$\text{Volumen gónada esférica} = \frac{4}{3} \times \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^3$$

Y

$$\text{Volumen gónada elipsoidal} = \frac{4}{3} \times \pi \times \frac{D}{2} \times \frac{d^2}{2}$$

Donde *D* es el diámetro mayor y *d* el diámetro menor de la elipse.

Para el estudio de la producción gonadal se analizaron las colonias femeninas y masculina por separado. En el caso de las gónadas femeninas, solo se tuvieron en cuenta aquellas que tuvieran un diámetro > 300 μm (i.e., el límite de madurez; Ribes et al., 2007). Una vez calculado el volumen de cada gónada, se sumó el volumen de todas las gónadas de cada pólipo para obtener el volumen gonadal por pólipo, que es la unidad utilizada en este estudio basado en la bibliografía existente (Coma et al., 1995a; Ribes et al., 2007). Posteriormente, se calculó el promedio del volumen gonadal de los 10 pólipos diseccionados. Tanto la localidad de Illa Pedrosa como la localidad del Tascó Gros se utilizaron como referencia para establecer la

relación entre la incidencia de mortalidad (porcentaje de mortalidad parcial) y la producción gonadal.

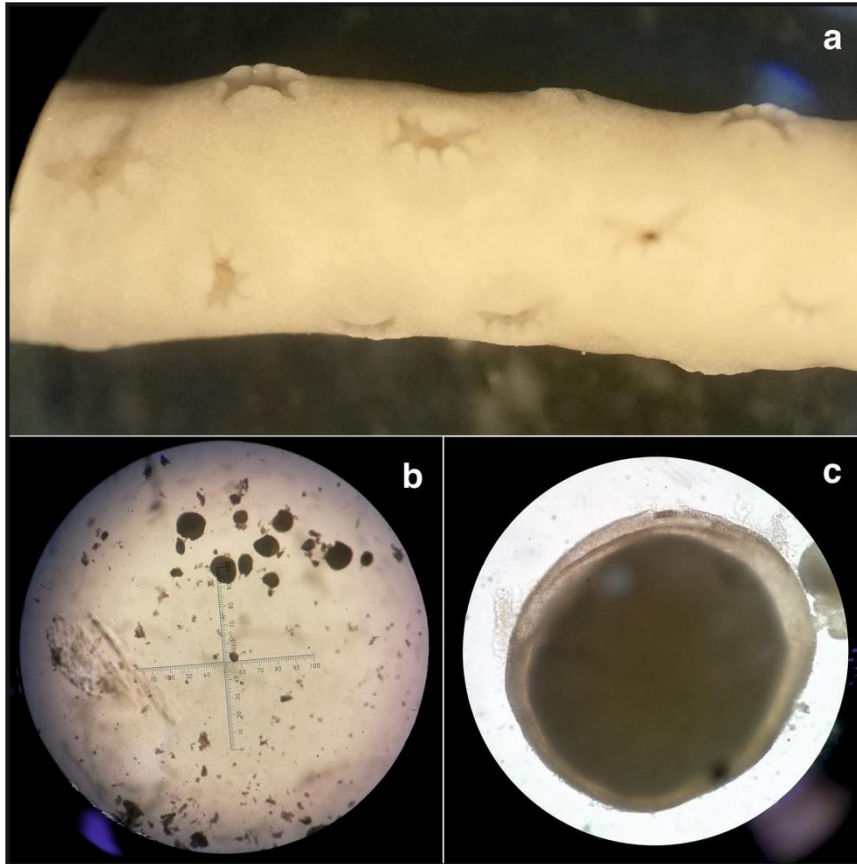


Figura 5. Fotografías de los pólipos y las gónadas de la gorgonia *Eunicella singularis* vistas con una lupa binocular. a Detalle de los pólipos de una rama apical. **b** Detalle de varias gónadas masculinas (sacos espermáticos). **c** Detalle de una gónada femenina (ovocito). Fotografías: Gerard Mas.

Análisis estadístico

Se utilizó el software STATISTICA versión 6.1 para el procesamiento de datos y análisis estadísticos de los datos obtenidos: actuación de poda y el seguimiento de un año en las colonias de *E. singularis* (tanto para los indicadores de mortalidad parcial y total, como para los efectos de la actuación de poda en la reproducción). Para comprobar la normalidad y la homogeneidad de varianzas se aplicaron las pruebas estadísticas de Shapiro-Wilk y Test de Levene, respectivamente. Para la realización de las gráficas de este trabajo se utilizó el software SigmaPlot 12.0, y se editaron con Corel Draw 2019.

Se aplicó una ANOVA de un factor para analizar los datos sobre el promedio de la mortalidad parcial de las colonias podadas antes y después de la actuación de poda. Se aplicó una ANOVA de medidas repetidas de un factor para analizar los datos sobre la variación en la mortalidad

parcial de las colonias podadas y las colonias control entre el seguimiento inicial antes de la poda (T0, para las colonias control y T0-A, para las colonias podadas) y el seguimiento al cabo de un año (T1). Este análisis permitió analizar la variación de la mortalidad parcial colonia por colonia. Cuando no se cumplió alguno de los dos requerimientos para las pruebas paramétricas, se intentó transformar las variables. Las transformaciones utilizadas han sido la raíz cuadrada y el logaritmo + 1.

Se empleó una ANOVA anidada de un factor para analizar los datos sobre la tasa anual de mortalidad de las colonias podadas y las colonias control entre el seguimiento inicial antes de la poda (T0, para las colonias control y T0-A, para las colonias podadas) y el seguimiento al cabo de un año (T1). Este análisis permitió analizar la tasa anual de mortalidad de las colonias según el porcentaje de mortalidad que tenían en el seguimiento inicial antes de la poda (T0, para las colonias control y T0-A, para las colonias podadas). Posteriormente se aplicó un Post-hoc test de Tuckey para observar las diferencias en la tasa anual de mortalidad entre las clases de mortalidad parcial de las colonias al seguimiento inicial antes de la poda (T0, para las colonias control y T0-A, para las colonias podadas).

Para evaluar cómo la incidencia de mortalidad parcial (4 clases de mortalidad parcial) afecta a la proporción de sexos se aplicaron las pruebas no paramétricas chi-cuadrado. Así pues, se aplicó una chi-cuadrado para las muestras 0-5% mortalidad parcial (Illa Pedrosa y Tascó Gros conjuntamente), una chi-cuadrado para las muestras > 5% mortalidad parcial de Illa Pedrosa y una chi-cuadrado para las muestras > 5% mortalidad parcial de Tascó Gros. Para el análisis, los resultados observados (proporción de sexos observada) se compararon con los resultados esperados en poblaciones sanas (proporción de sexos 1:1; Ribes et al., 2007).

Para determinar cómo afecta la mortalidad parcial a la fertilidad de las colonias se aplicaron las pruebas no paramétricas chi-cuadrado. Se aplicó una chi-cuadrado para las muestras 0-5% mortalidad parcial (Illa Pedrosa y Tascó Gros conjuntamente), una chi-cuadrado para las muestras > 5% mortalidad parcial de Illa Pedrosa y una chi-cuadrado para las muestras > 5% mortalidad parcial de Tascó Gros. Para el análisis, los resultados observados (porcentaje de colonias fértiles observada) se compararon con los resultados esperados en poblaciones sanas (fertilidad del 100%; Ribes et al., 2007).

Se aplicaron ANOVAs factoriales de dos vías para analizar los datos de la producción gonadal (número de gónadas y del volumen gonadal por pólipo) de las colonias femeninas y masculinas de las localidades de Illa Pedrosa y del Tascó Gros, según la clase de mortalidad parcial. Cuando

no se cumplió alguno de los requerimientos para las pruebas paramétricas, se realizó la transformación raíz cuadrada, la cual permitió cumplir el requisito de homogeneidad de varianzas. No obstante, no se logró cumplir la normalidad, es por ello por lo que se redujo el nivel de significación del p-valor a 0,01 (Guidetti et al., 2004). Posteriormente, se realizaron las pruebas Post-hoc para analizar las diferencias entre las clases de mortalidad parcial.

Se aplicó la prueba paramétrica ANOVA anidada de un factor para evaluar el efecto de la poda en la producción gonadal (número de gónadas y volumen gonadal por pólipo) de colonias femeninas y masculinas según la clase de mortalidad parcial de cada colonia. Las clases de mortalidad parcial de las colonias podadas fueron 0-5% (> 5-33% Antes Poda) y > 5-33% (> 33-66% Antes Poda). Estas dos clases de colonias podadas se compararon con las colonias Control de las clases de mortalidad parcial equivalentes.

Resultados

Impacto del episodio de mortalidad en el año 2018

En noviembre de 2018, para evaluar el impacto del episodio de mortalidad en las poblaciones de *E. singularis* durante el periodo post-estival del año 2018 se estudiaron 2 localidades en el Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter (Illa Pedrosa y Tascó Gros) mediante cuadros al azar, con un área estudiada de 12.0 y 6.3 m², respectivamente; mientras que el número de gorgonias examinadas fue de 217 y 144, respectivamente. Las poblaciones de *E. singularis* en ambas localidades no mostraron diferencias significativas en la densidad (ANOVA de un factor, $F_{1,71} = 2.08$, p-valor > 0.05), con un valor promedio de 20 ± 2 colonias/m² (Fig. 6a).

El porcentaje de mortalidad parcial total (i.e., porcentaje de la superficie de las colonias afectada por mortalidad) en la población de *E. singularis* de Illa Pedrosa ($48 \pm 3\%$) fue un 50% superior al de Tascó Gros ($32 \pm 3\%$; Fig. 6b). El porcentaje de mortalidad parcial antigua (i.e., ramas desprovistas de tejido blando que han sido recubiertas por organismos epífitos de crecimiento lento, > 1-2 meses) fue muy similar en ambas localidades (Illa Pedrosa: $5 \pm 1\%$; Tascó Gros: $5 \pm 2\%$; Fig. 6b). Las diferencias observadas en la mortalidad parcial entre ambas localidades son debidas al porcentaje de mortalidad parcial reciente (i.e., ramas desprovistas de tejido blando o que han sido recubiertas por organismos epífitos de crecimiento rápido, < 1-2 meses) que, en Illa Pedrosa ($43 \pm 3\%$), fue un 65% superior al observado en Tascó Gros ($26 \pm 3\%$; Fig. 6b).

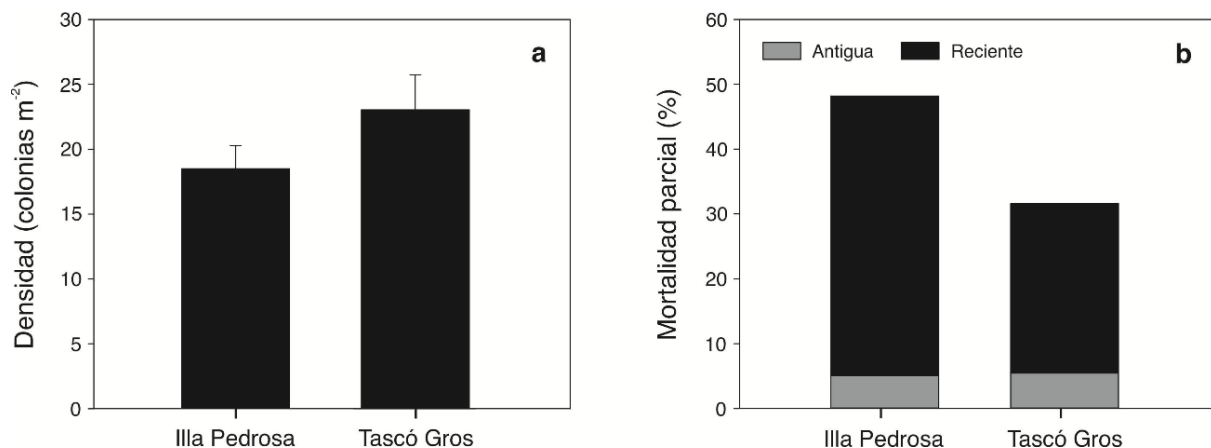


Figura 6 Parámetros demográficos de las poblaciones de *Eunicella singularis* en Illa Pedrosa y Tascó Gros obtenidos en noviembre de 2018 mediante cuadros al azar. **a** Densidad. Los valores son el promedio \pm SE (Error estándar). **b** Incidencia de mortalidad parcial (i.e., porcentaje de la superficie de las colonias afectado por mortalidad), distinguiendo entre mortalidad antigua y reciente.

La población de *E. singularis* en Illa Pedrosa presentó una estructura de tallas unimodal dominada por colonias de talla entre 10 y 30 cm, que representaron el 73% del total de colonias (Fig. 7a). En cambio, la población de Tascó Gros presentó una estructura de tallas unimodal dominada por colonias de la primera clase de talla (0-10 cm), que representaron un 53% del total (Fig. 7a). De manera similar en ambas poblaciones, la incidencia de mortalidad parcial reciente incrementó con la talla de las colonias, de manera que la mortalidad parcial reciente en las colonias de la primera clase de talla (0-10 cm, 19% en Illa Pedrosa y 15% en Tascó Gros) fue al menos un 60% inferior a la de la clase de talla más grande (> 30 cm, 54% en Illa Pedrosa y 47% en Tascó Gros; Fig. 7b).

En las dos poblaciones de *E. singularis* estudiadas, la clase de talla de > 20-30 cm fue la única clase de talla abundante (Fig. 7a) donde la mayor parte de las colonias son fértiles (i.e., la fertilidad incrementa con la clase de talla; Marta Ribes, ICM-CSIC, datos no publicados). Además, la pauta de incremento de la incidencia de mortalidad parcial reciente con la talla de las colonias se estabilizó a partir de la clase de talla > 20-30 cm (Fig. 7b). Por lo tanto, la clase de talla de > 20-30 cm fue la más idónea, y fue la escogida, para estudiar el efecto de la incidencia de mortalidad parcial y de la actuación de poda sobre la producción gonadal de la especie en el presente estudio.

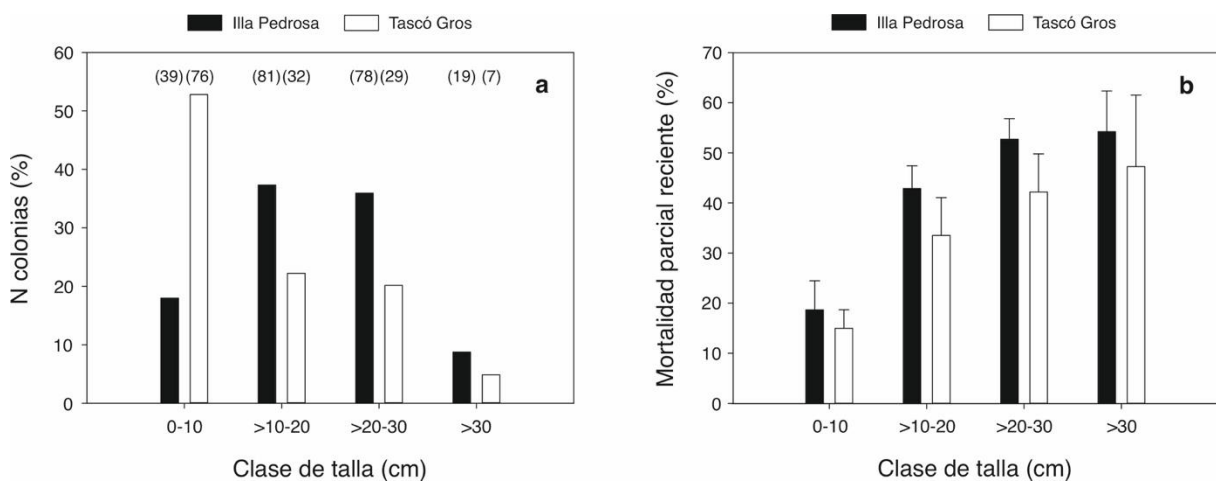


Figura 7. Estructura de tallas (altura máxima en cm) e incidencia de mortalidad parcial reciente en las poblaciones de *Eunicella singularis* de Illa Pedrosa y Tascó Gros obtenidos en noviembre de 2018 mediante cuadros al azar. a Porcentaje de colonias en las 4 clases de talla (0-10, > 10-20, > 20-30 y > 30 cm de altura máxima). **b** Mortalidad parcial reciente de las colonias (i.e., porcentaje de la superficie de las colonias afectado por mortalidad) en función de las 4 clases de talla. El número de colonias examinadas en cada localidad y clase de talla es el mismo en ambas gráficas y se indica entre paréntesis en la gráfica **a**. Los valores en **b** son el promedio \pm SE.

Estado de conservación de las poblaciones de *E. singularis*

Durante el seguimiento inicial de las 8 parcelas fijas instaladas en la población de *E. singularis* de Illa Pedrosa, que se realizó en enero de 2019 (T0 en parcelas Control y T0-A en parcelas Poda), se examinaron un total de 693 colonias, con un rango de 71 a 106 colonias por parcela (87 ± 4 colonias, $n = 8$; Tabla 1). Al inicio del experimento, la incidencia promedio de mortalidad parcial en las colonias (i.e., el porcentaje de la superficie de las colonias afectada por mortalidad) en las 8 parcelas varió entre el 33 y el 66% ($48 \pm 4\%$, $n = 8$; Tabla 1). El porcentaje de colonias muertas (i.e., con un 100% de la superficie de la colonia afectada por mortalidad) en las 8 parcelas estudiadas osciló entre el 14 y el 44% del total de colonias de cada parcela ($27 \pm 4\%$, $n = 8$), mientras que el porcentaje de colonias vivas (i.e., con un 0-99 % de la superficie afectada por mortalidad parcial) osciló entre el 56 y 86% ($73 \pm 4\%$, $n = 8$; Tabla 1). El porcentaje de colonias sanas (i.e., con un 0-5% de la superficie afectada por mortalidad parcial) en las 8 parcelas estudiadas osciló entre el 16 y el 41% ($24 \pm 3\%$, $n = 8$), mientras que el porcentaje de colonias afectadas por mortalidad parcial (i.e., con > 5 -99% de la superficie de la colonia afectada) osciló entre el 39 y el 57% ($49 \pm 2\%$, $n = 8$; Tabla 1).

Durante el seguimiento inicial (T0 en parcelas Control y T0-A en parcelas Poda), la densidad de *E. singularis* en las 8 parcelas estudiadas osciló entre 14 ± 2 y 21 ± 2 colonias m^{-2} (17 ± 1 colonias m^{-2} , $n = 8$; Fig. 8a). En referencia a las colonias vivas (i.e., con un 0-99% de la superficie afectada por mortalidad parcial), se examinaron un total de 503 colonias en las 8 parcelas, con un rango de 40 a 70 colonias vivas por parcela (63 ± 3 colonias, $n = 8$). El porcentaje de mortalidad parcial de las colonias vivas osciló entre el 21 y el 42% ($30 \pm 3\%$, $n = 8$; Fig. 8b).

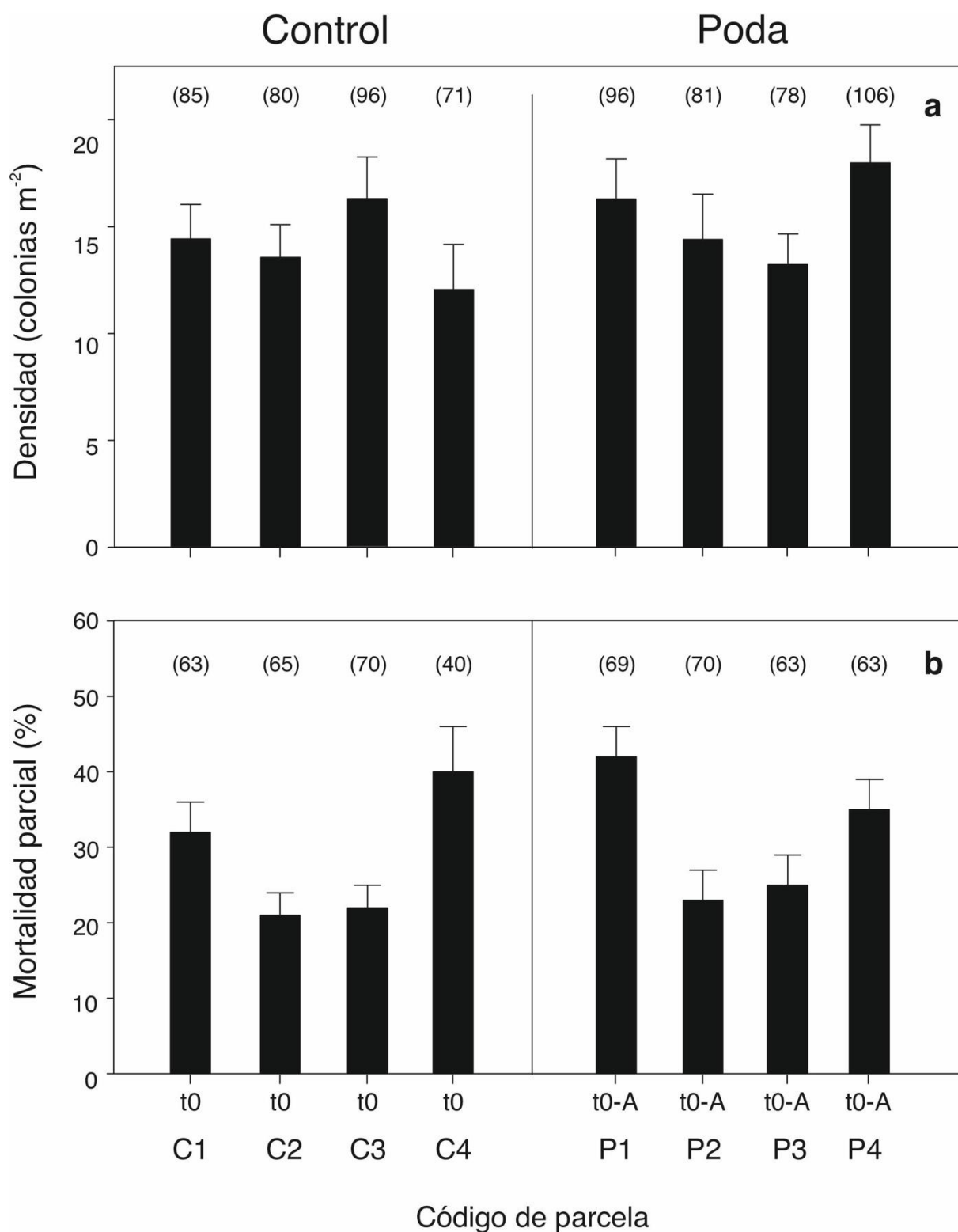


Figura 8 Parámetros demográficos de *Eunicella singularis* en las parcelas fijas de seguimiento del experimento de poda en Illa Pedrosa (Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter). Se muestran los resultados de las 8 parcelas fijas estudiadas: parcelas Control (C1, C2, C3 y C4) y parcelas Poda (P1, P2, P3 y P4), obtenidos durante el seguimiento inicial en enero de 2019 (T0 y T0-A, respectivamente). **a** Densidad total (colonias vivas y muertas). **b** Incidencia de mortalidad parcial (i.e., porcentaje de la superficie de las colonias afectado por mortalidad) en las colonias vivas (i.e., con un 0-99% de mortalidad parcial). El número de colonias examinadas para cada parámetro demográfico y en cada parcela se indica entre paréntesis. Los valores son el promedio \pm SE (Error estándar).

Actuación de poda

El número total de colonias examinadas en las 4 parcelas Poda durante el seguimiento inicial (T0-A) osciló entre 78 y 106 colonias por parcela (90 ± 7 colonias, $n = 4$; total de 361 colonias), mientras que el número de colonias vivas osciló entre 63 y 70 colonias por parcela (66 ± 2 colonias, $n = 4$; total de 265 colonias vivas). Del total de colonias, no se podaron las colonias muertas (i.e., con una mortalidad parcial del 100% de la superficie de la colonia) y en referencia a las colonias vivas, no se podaron aquellas que únicamente presentaban mortalidad en la zona basal de la colonia (i.e., en las cuales eliminar la mortalidad parcial conllevaba la pérdida de tejido vivo). Las colonias que se podaron fueron aquellas con un porcentaje de mortalidad parcial apical de $> 0-99\%$. El porcentaje de colonias podadas osciló entre el 79 y el 90% del total de colonias vivas ($84 \pm 2\%$, $n = 4$), con un total de 222 colonias vivas y podadas en las 4 parcelas Poda (rango de 50 a 58 colonias por parcela).

El porcentaje de mortalidad parcial apical de las colonias vivas (i.e., localizado en la zona apical de la colonia y que, por lo tanto, se pudo sin pérdida de tejido vivo) antes de la actuación de poda (T0-A) osciló entre el 16 y 28% ($21 \pm 2\%$, $n = 4$), representando entre el 72 y el 87% de la mortalidad parcial total ($81 \pm 4\%$, $n = 4$; Fig. 9a). La actuación de poda en las ramas muertas localizadas en la zona apical de las colonias implicó una disminución significativa de la mortalidad parcial, entre el inicio del experimento antes de la poda (T0-A) y después de la poda (T0-D; ANOVA de un factor, $F_{1,6} = 15.28$, p -valor = 0.0008). Así pues, el porcentaje de mortalidad parcial de las colonias antes de la poda (T0-A) osciló entre el 28 y 49% por parcela ($37 \pm 5\%$, $n = 4$). La actuación de poda redujo en un 69% la mortalidad parcial de las colonias (T0-D, rango entre 6 y 17% por parcela, $12 \pm 6\%$, $n = 4$; Fig. 9a).

Antes de la actuación de poda (T0-A), el porcentaje de colonias vivas y sanas (i.e., con un 0-5% de la superficie afectada por mortalidad parcial) en las 4 parcelas Poda osciló entre el 6 y el 36% del total de colonias ($20 \pm 6\%$, $n = 4$), mientras que el porcentaje de colonias afectadas por mortalidad parcial (i.e., con $> 5-99\%$ de la superficie de la colonia afectada) osciló entre el 64 y el 94% ($80 \pm 6\%$, $n = 4$; Fig. 9b). Después de la actuación de poda (T0-D), el porcentaje de colonias vivas y sanas osciló entre el 60 y el 83% en las 4 parcelas ($72 \pm 5\%$, $n = 4$), valores más de 2 veces superiores a los de antes de la poda (T0-A); mientras que el porcentaje de colonias afectadas por mortalidad parcial disminuyó al menos en un 57%, con valores que oscilaron entre el 17 y el 40% ($28 \pm 5\%$, $n = 4$; Fig. 9b).

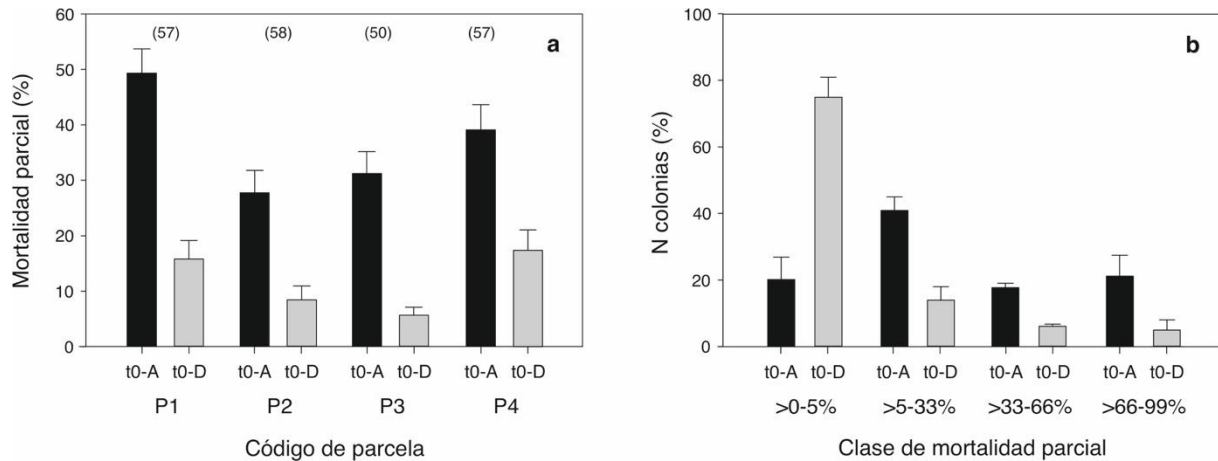


Figura 9 Efecto de la actuación de poda sobre la incidencia de mortalidad parcial en las colonias de *Eunicella singularis* de las parcelas fijas de seguimiento del experimento de poda en Illa Pedrosa (Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter). Se muestran los resultados de las 4 parcelas Poda estudiadas (P1, P2, P3 y P4), obtenidos durante el seguimiento inicial en enero de 2019, antes y después de la actuación de poda (T0-A y T0-D, respectivamente). **a** Porcentaje de mortalidad parcial (i.e., porcentaje de la superficie de las colonias afectado por mortalidad) en las colonias vivas y podadas (i.e., con > 0-99% de mortalidad parcial). **b** Porcentaje de colonias vivas y podadas en 4 clases de incidencia de mortalidad parcial: colonias sanas (> 0-5% de mortalidad parcial) y colonias afectadas (> 5-33%, > 33-66% y > 66-99% de mortalidad parcial). El número de colonias examinadas en cada parcela es el mismo en ambas gráficas y se indica entre paréntesis en la gráfica **a**. Los valores son el promedio \pm SE (Error estándar).

Seguimiento al cabo de 1 año

Tasa anual de mortalidad: Control *versus* Poda

Durante el periodo de \sim 1 año entre el seguimiento inicial realizado en enero de 2019 (T0 en parcelas Control y T0-D en parcelas Poda) y el seguimiento final realizado en diciembre de 2019 (T1), la tasa anual de mortalidad no mostró diferencias significativas entre las parcelas Control y las parcelas Poda (ANOVA, $F_{1,23} = 3.78$, p -valor > 0.05 ; Tabla 3), con una tasa anual de mortalidad de 0.26 ± 0.07 colonias muertas colonias totales⁻¹ año⁻¹ ($n = 8$) en las parcelas Control y Poda (Fig. 10a).

La tasa anual de mortalidad varió en función de la clase de mortalidad parcial presente al inicio del experimento (T0 en parcelas Control y T0-D en parcelas Poda), con un incremento progresivo de la tasa anual de mortalidad con la clase de mortalidad parcial. Así pues, en las parcelas Control, la tasa anual de mortalidad en las colonias de la clase de 0-5% de mortalidad parcial fue un 54% inferior al de la clase > 66-99% (0.14 ± 0.05 y 0.30 ± 0.08 colonias muertas colonias totales⁻¹ año⁻¹, respectivamente; Fig. 10b). De manera similar, en las parcelas Poda, la tasa anual de mortalidad en las colonias de la clase de 0-5% de mortalidad parcial fue un 93% inferior al de la clase > 66-99% (0.05 ± 0.05 y 0.79 ± 0.22 colonias muertas colonias totales⁻¹ año⁻¹, respectivamente; Fig. 10b).

La tasa anual de mortalidad analizada en función de las clases de mortalidad parcial al inicio del experimento (T0 en parcelas Control y T0-D en parcelas Poda) mostró diferencias significativas entre las parcelas Control y las parcelas Poda (ANOVA anidada, $F_{6,23} = 3.00$, p-valor = 0.0259; Tabla 3). En la clase de mortalidad parcial de 0-5%, el valor de las parcelas Control fue ~ 3 veces superior al de las parcelas Poda (0.14 ± 0.05 y 0.05 ± 0.05 colonias muertas colonias totales⁻¹ año⁻¹, respectivamente, Post-hoc test, p-valor < 0.05), mientras que en la clase de mortalidad parcial de > 66-99% el valor de las parcelas Control fue un 62% inferior al de las parcelas Poda (0.30 ± 0.08 y 0.79 ± 0.22 colonias muertas colonias totales⁻¹ año⁻¹, respectivamente; Pot-hoc test, p-valor < 0.05; Fig. 10b).

Tabla 3. Tabla ANOVA anidada. Tasa anual de mortalidad en función de la clase de mortalidad parcial al inicio del experimento. En las colonias podadas la clase de mortalidad parcial se refiere al porcentaje de mortalidad parcial después de la actuación de poda. El factor Tratamiento se refiere a las colonias Control *versus* Poda. El factor clase de mortalidad parcial se refiere a 4 clases de incidencia de mortalidad parcial: >0-5%, > 5-33%, > 33-66% y > 66-99%. Los resultados se consideran significativos si el p-valor < 0.05.

Tasa anual de mortalidad (Colonias Control <i>versus</i> Colonias Poda)					
Fuente	g.l.	SC	MC	F	p
Tratamiento	1	0.25	0.02	3.78	0.0643
Clase de mortalidad parcial (Tratamiento)	6	1.20	0.02	3.00	0.0259
Error	23	1.53	0.01		

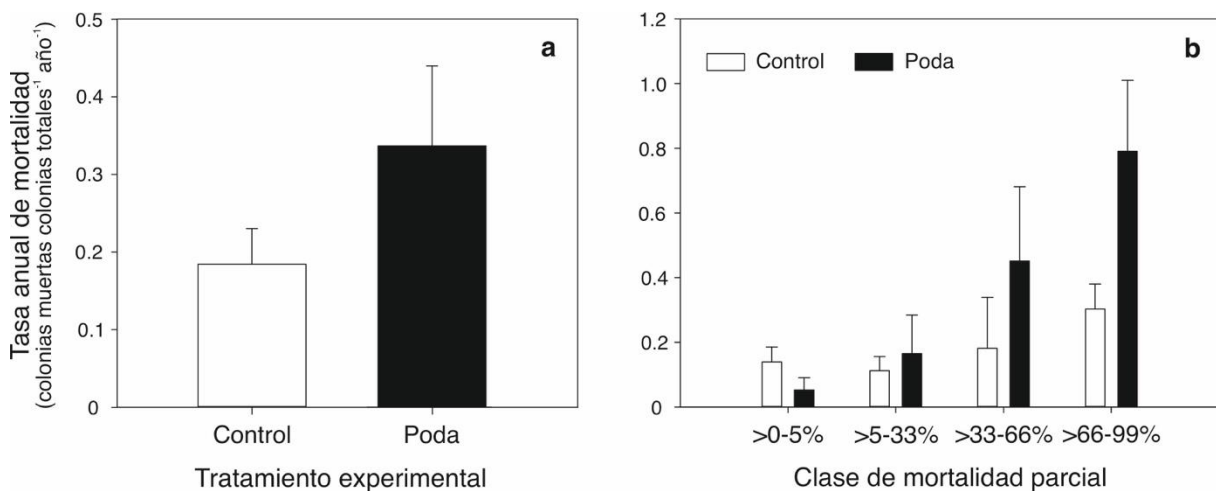


Figura 10. Tasa anual de mortalidad de las colonias Control y las colonias Poda de *Eunicella singularis* de la población de Illa Pedrosa. a Tasa anual de mortalidad. **b** Tasa de mortalidad anual en función de las 4 clases de mortalidad parcial presentes al inicio del experimento. En las colonias podadas, la clase de mortalidad parcial se refiere al porcentaje de mortalidad parcial después de la actuación de poda. Los valores son el promedio \pm SE.

Variación anual en la mortalidad parcial: Control versus Poda

En las 4 parcelas Control, el porcentaje de mortalidad parcial no mostró diferencias significativas entre el seguimiento inicial realizado en enero de 2019 (T0) y el seguimiento al cabo de 1 año realizado en diciembre de 2019 (T1; ANOVA medidas repetidas, $F_{1,173} = 0.91$, $p\text{-valor} > 0.05$; Tabla 4a), con un valor promedio de mortalidad igual de $28 \pm 2\%$ a T0 como a T1 ($n = 4$; Fig. 11a).

En las 4 parcelas Poda, el porcentaje de mortalidad parcial mostró diferencias significativas entre el seguimiento inicial (antes de la poda; T0-A) y el seguimiento al cabo de 1 año (T1; ANOVA medidas repetidas, $F_{1,189} = 89.04$, $p\text{-valor} < 0.0001$; Tabla 4b), con un valor promedio de mortalidad de $30 \pm 3\%$ a T0-A ($n = 4$) que fue un 42 % superior al de T1 ($18 \pm 2\%$; $n = 4$; Fig.11a). Así pues, el porcentaje promedio de mortalidad parcial de las colonias susceptibles a ser podadas (1-99% de mortalidad parcial) antes de la poda (T0-A) fue del $30 \pm 3\%$ (rango entre el 24 y 47% por parcela, $n = 4$), la actuación de poda redujo en un 73% la mortalidad parcial de las colonias (T0-D, $8 \pm 2\%$, rango entre 5 y 14% por parcela, $n = 4$), y al cabo de 1 año la mortalidad parcial promedio fue del $18 \pm 2\%$ (T1, rango entre el 13 y 27% por parcela, $n = 4$; Fig. 11a). A pesar del incremento del 10% en la mortalidad parcial entre T0-D y T1 en las parcelas Poda, la actuación de poda (comparación entre T0-A y T1) redujo en un 40% el porcentaje promedio de mortalidad parcial de las colonias ($30 \pm 3\%$ a T0-A y $18 \pm 2\%$ a T1, respectivamente).

Tabla 4. Tabla ANOVA medidas repetidas. Variación anual en la mortalidad parcial de las colonias de *Eunicella singularis* entre enero del 2019 (T0) y diciembre del 2019 (T1). a. Variación anual en la mortalidad parcial de las parcelas Control. Datos transformados ($\sqrt{\cdot}$). b. Variación anual en la mortalidad parcial de las parcelas Poda. Datos transformados ($\text{LOG} + 1$). Los resultados se consideran significativos si el $p\text{-valor} < 0.05$.

a					
Parcelas Control					
Fuente	gl	SC	MC	F	p
T0-T1	1.13	1	1.13	0.91	0.34
T0-T1*Parcelas Control	49.18	3	16.39	13.26	< 0.0001
Error	213.94	173	1.24		

b					
Parcelas Poda					
Fuente	gl	SC	MC	F	p
T0-T1	14.10	1	14.10	89.04	< 0.0001
T0-T1*Parcelas Poda	0.45	3	0.15	0.94	0.4237
Error	29.92	189	0.16		

En las 4 parcelas Control, el porcentaje de colonias según la clase de mortalidad parcial no mostró diferencias significativas entre el seguimiento inicial realizado en enero de 2019 (T0) y

el seguimiento realizado al cabo de 1 año (diciembre de 2019, T1; ANOVA dos factores, $F_{3,24} = 0.20$, p-valor > 0.05 ; $n = 4$; Tabla 5a; Fig. 11b).

En las 4 parcelas Poda, el porcentaje de colonias según la clase de mortalidad parcial mostró diferencias significativas entre el seguimiento inicial antes de la poda (T0-A) y el seguimiento al cabo de 1 año (T1; ANOVA dos factores, $F_{3,24} = 7.84$, p-valor < 0.001 ; $n = 4$; Tabla 5b; Fig. 11b). Así pues, el porcentaje de colonias sanas (0-5) aumenta significativamente entre el seguimiento inicial antes de la poda (T0-A) y el seguimiento al cabo de 1 año (T1; Post-hoc test, p-valor < 0.01), siendo al cabo de un año (T1: $20 \pm 7\%$) 2.4 veces superior al seguimiento inicial (T0-A: $48 \pm 5\%$).

Tabla 5. Tabla ANOVA dos factores. Variación anual del porcentaje de colonias según la clase de mortalidad parcial entre enero del 2019 y diciembre del 2019. a. Variación anual en la mortalidad parcial de las parcelas Control. **b.** Variación anual en la mortalidad parcial de las parcelas Poda. Los resultados se consideran significativos si el p-valor < 0.05 .

a					
Colonias Control					
Fuente	gl	SC	MC	F	p
Data	1	0.00	0.00	0.00	1.00
Clase Mortalidad parcial	3	3118.88	1039.63	10.12	< 0.001
Data*Clase mortalidad parcial	3	111.26	37.09	0.36	0.78
Error	24	2466.12	102.76		

b					
Colonias Poda					
Fuente	gl	SC	MC	F	p
Data	1	0.00	0.00	0.00	1.00
Clase mortalidad parcial	3	4288.75	1429.58	16.79	< 0.001
Data*Clase mortalidad parcial	3	2001.77	667.26	7.84	< 0.001
Error	24	2043.51	85.15		

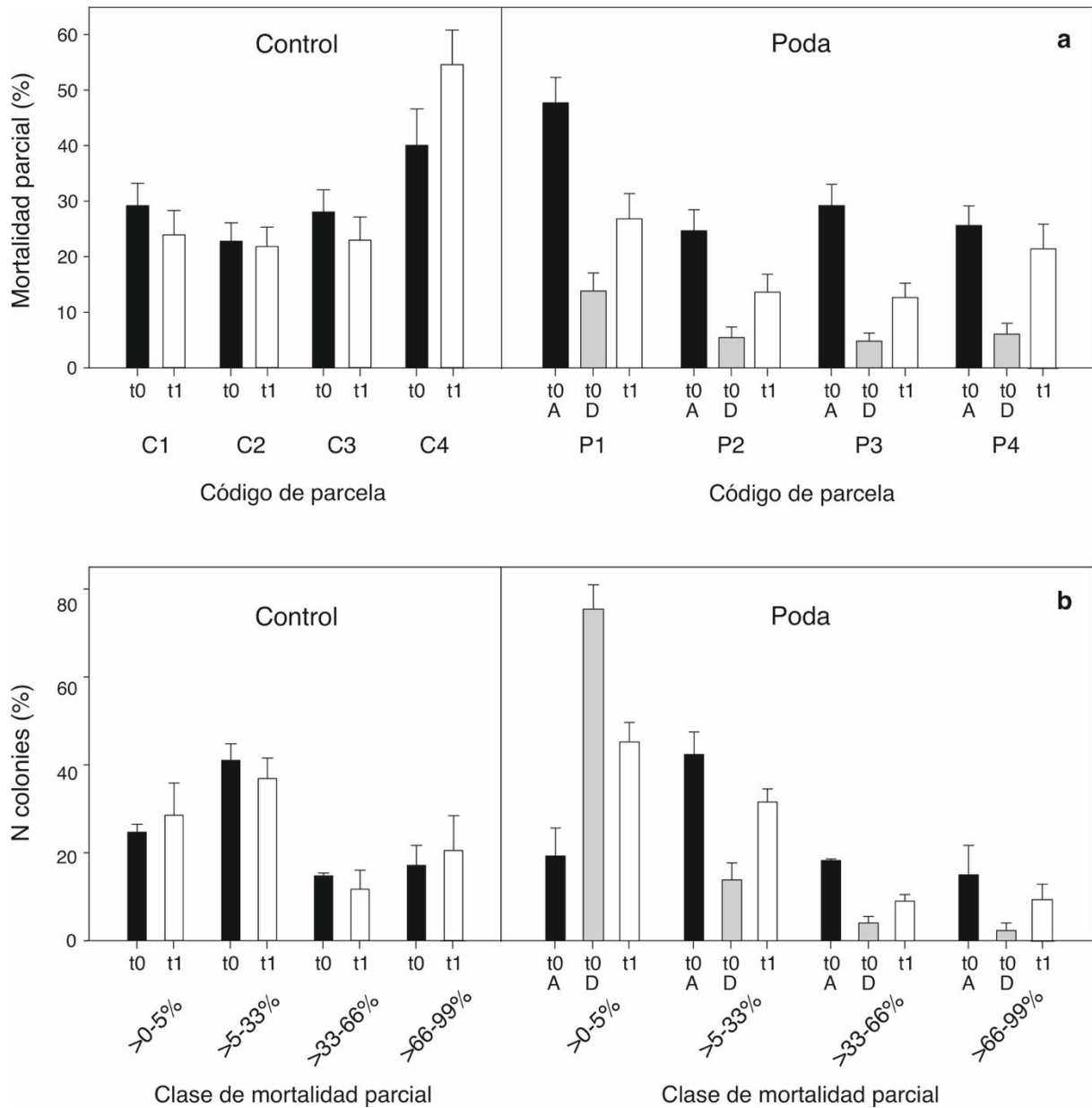


Figura 11 Evolución de la incidencia de mortalidad parcial durante el período de 1 año de seguimiento de las colonias de *Eunicella singularis* de las parcelas fijas de seguimiento (Control y Poda) del experimento de poda en Illa Pedrosa (Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter). Se muestran los resultados de las 8 parcelas fijas estudiadas: parcelas Control (C1, C2, C3 y C4) y parcelas Poda (P1, P2, P3 y P4), obtenidos durante el seguimiento inicial en enero de 2019: T0 en las parcelas Control, antes y después de la actuación de poda en las parcelas Poda (T0-A y T0-D, respectivamente), y durante el seguimiento al cabo de 1 año (T1). **a** Porcentaje de mortalidad parcial (i.e., porcentaje de la superficie de las colonias afectado por mortalidad) en las colonias vivas (i.e., con > 0-99% de mortalidad parcial). **b** Porcentaje de colonias vivas en las 4 clases de incidencia de mortalidad parcial: colonias sanas (> 0-5% de mortalidad parcial) y colonias afectadas (> 5-33%, > 33-66% y > 66-99% de mortalidad parcial). Las colonias examinadas en las parcelas Poda son las colonias podadas (se excluyen las colonias no podadas con un 0% de mortalidad parcial a T0-A). De la misma manera, en las parcelas Control se han excluido las colonias con un 0% de mortalidad parcial a T0. Los valores son el promedio \pm SE (Error estándar).

Reproducción

Proporción de sexos

La proporción de sexos (número colonias masculinas: femeninas) de las colonias no afectadas por mortalidad parcial (Control, 0-5%) de las dos localidades estudiadas (Tascó Gros e Illa Pedrosa) presentó una proporción de sexos promedio de $1.1:1 \pm 0.4$ que no difirió significativamente de la proporción 1:1 entre ambos sexos (Chi-cuadrado = 0.39, $df = 2$, p -valor > 0.05 ; Fig. 12a). El promedio de la proporción de sexos de las colonias afectadas por mortalidad parcial (Mortalidad, $> 5-99\%$) en Tascó Gros fue de $1.3:1 \pm 0.5$, no difiriendo tampoco de la proporción 1:1 entre ambos sexos (Chi-cuadrado = 0.78, $df = 2$, p -valor > 0.05 ; Fig. 12a). Sin embargo, el promedio de la proporción de sexos de las colonias afectadas por mortalidad parcial (Mortalidad $> 5-99\%$) en Illa Pedrosa ($2.8:1 \pm 1.5$) mostró una proporción de sexos significativamente sesgada hacia las colonias masculinas (Chi-cuadrado = 19.92, $df = 2$, p -valor = 0.0002; Fig. 12a).

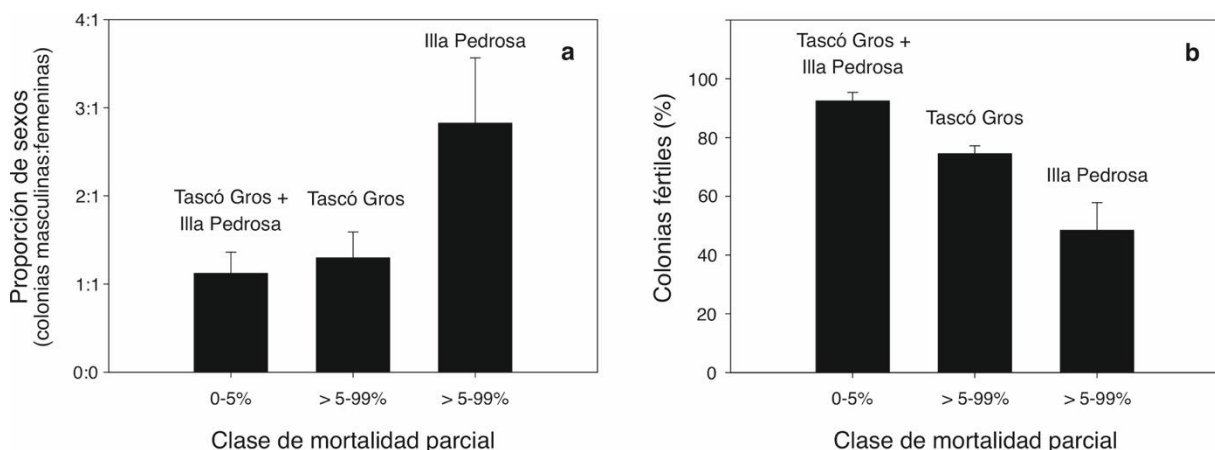


Figura 12. Proporción de sexos y porcentaje de colonias fértiles en las poblaciones de *Eunicella singularis* de Tascó Gros e Illa Pedrosa. a) Proporción de sexos (colonias masculinas:femeninas). b) Porcentaje de colonias fértiles. de las muestras control ($< 5\%$ MP), de la muestra de la localidad Tascó Gros ($> 5-99\%$ MP) y de la localidad de Illa Pedrosa ($> 5-99\%$ MP). Se distinguen 2 clases de incidencia de mortalidad parcial: colonias sanas (0-5% de mortalidad parcial) y colonias afectadas ($> 5-99\%$ de mortalidad parcial). Los valores son el promedio \pm SE (Error estándar).

Fertilidad

El porcentaje de colonias fértiles en las dos localidades examinadas mostró una pauta de disminución en las colonias afectadas por mortalidad parcial (Mortalidad, $> 5-99\%$) con respecto a las colonias no afectadas por mortalidad parcial (Control, 0-5%; Fig. 12b). El

porcentaje de colonias fértiles en las muestras Control de ambas localidades ($92 \pm 3\%$) no difirió significativamente del 100% (Chi-cuadrado = 2.25, $df = 2$, p -valor > 0.05 ; Fig. 12b). Sin embargo, el porcentaje de colonias fértiles de las colonias afectadas por mortalidad parcial mostró una disminución significativa respecto del 100% tanto en Tascó Gros, donde el porcentaje de colonias fértiles fue del $75 \pm 3\%$ del total de colonias (Chi cuadrado = 19.94, $df = 2$, p -valor < 0.0001), como en Illa Pedrosa, donde el porcentaje de colonias fértiles fue del $48 \pm 9\%$ del total de colonias (Chi cuadrado = 117.36, $df = 2$, p -valor < 0.0001 ; Fig. 12b).

Producción gonadal en función de la mortalidad parcial

Colonias Femeninas

El número de gónadas por pólipo en las colonias femeninas de *E. singularis* no mostró diferencias significativas entre las dos localidades estudiadas: promedio de 1.49 ± 0.08 gónadas pólipo⁻¹ ($n = 62$ colonias; ANOVA factorial. $F_{1,612} = 3.36$, p -valor > 0.05 ; Tabla 6a). En referencia a la variación del número de gónadas femeninas por pólipo con el porcentaje de mortalidad parcial de las colonias, ambas localidades mostraron diferencias significativas en el número de gónadas por pólipo entre las distintas clases de mortalidad parcial (ANOVA factorial. $F_{3,612} = 35.14$, p -valor < 0.0001 ; Tabla 6a).

En las colonias femeninas de Illa Pedrosa, el número de gónadas por pólipo muestra valores máximos en las clases de mortalidad parcial de 0-5% y > 5-33% (promedio de 1.94 ± 0.12 gónadas pólipo⁻¹), y disminuye progresivamente en las categorías de mortalidad parcial de >33-66% (1.07 ± 0.13 gónadas pólipo⁻¹) y > 66-99% (0.10 ± 0.10 gónadas pólipo⁻¹), un valor un 95% inferior al del grupo de 0-33% de mortalidad parcial (Post-hoc test, p -valor < 0.001 ; Fig. 13a). En Tascó Gros, el número de gónadas femeninas por pólipo decrece progresivamente al incrementar la mortalidad parcial de las colonias, con un valor máximo en la clase de 0-5% de mortalidad parcial (2.00 ± 0.11 gónadas pólipo⁻¹) y un valor mínimo en la clase de > 66-99% de mortalidad parcial (0.79 ± 0.10 gónadas pólipo⁻¹), un valor un 61% inferior al de la clase 0-5% de mortalidad parcial (Post-hoc test, p -valor < 0.01 ; Fig. 13a). El número de gónadas por pólipo mostró diferencias significativas entre ambas localidades según la clase de mortalidad parcial (ANOVA factorial. $F_{3,612} = 4.54$, p -valor = 0.0037; Tabla 6a), debido a que esta pauta de disminución fue más acusada en la localidad de Illa Pedrosa que en la localidad de Tascó Gros (Fig. 13a).

El volumen global gonadal por pólipo de las colonias femeninas de *E. singularis* no mostró diferencias significativas entre las dos localidades estudiadas (promedio de $0.17 \pm 0.01 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$, $n = 62$ colonias; ANOVA factorial, $F_{1,612} = 5.53$, $p\text{-valor} = 0.0190$; $p\text{-valor}$ significativo si es < 0.01 ; Tabla 6a).

En referencia a la variación del volumen gonadal por pólipo con el porcentaje de mortalidad parcial de las colonias femeninas, ambas localidades mostraron diferencias significativas en el volumen gonadal por pólipo entre las distintas clases de mortalidad parcial (ANOVA factorial, $F_{1,612} = 23.55$, $p\text{-valor} < 0.0001$; Tabla 6a). De esta forma, en las colonias femeninas de Illa Pedrosa, el volumen gonadal por pólipo muestra valores máximos en las clases de mortalidad parcial de 0-5% y > 5-33% (promedio de $0.21 \pm 0.02 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$), y disminuye progresivamente en las clases de mortalidad parcial de > 33-66% ($0.130 \pm 0.022 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$) y > 66-99% ($0.001 \pm 0.001 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$), un valor un 99% inferior al del grupo de 0-33% de mortalidad parcial ($0.209 \pm 0.015 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$; Post-hoc test, $p\text{-valor} < 0.01$; Fig. 13b). En Tascó Gros, el volumen gonadal por pólipo muestra valores máximos en las clases de mortalidad parcial de 0-5%, > 5-33% y > 33-66% (promedio $0.173 \pm 0.009 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$), y disminuye en la clase de mortalidad parcial de > 66-99% ($0.074 \pm 0.012 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$), un valor un 57% inferior al del grupo de 0-66% de mortalidad parcial ($0.173 \pm 0.009 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$; Post-hoc test, $p\text{-valor} < 0.01$; Fig. 13b). El volumen gonadal por pólipo no mostró diferencias significativas entre ambas localidades según la clase de mortalidad parcial (ANOVA factorial. $F_{3,612} = 3.59$, $p\text{-valor} < 0.01$; Tabla 6a; Fig. 13b).

Colonias Masculinas

El número de gónadas por pólipo en las colonias masculinas de *E. singularis* mostró diferencias significativas entre las dos localidades estudiadas: Illa Pedrosa (22.14 ± 0.85 gónadas pólipo⁻¹, $n = 35$ colonias) y Tascó Gros (17.11 ± 0.64 gónadas pólipo⁻¹, $n = 39$; ANOVA factorial. $F_{1,732} = 12.53$, $p\text{-valor} = 0.0004$; Tabla 6b). En referencia a la variación del número de gónadas masculinas por pólipo con el porcentaje de mortalidad parcial de las colonias, ambas localidades mostraron diferencias significativas en el número de gónadas por pólipo entre las distintas clases de mortalidad parcial (ANOVA factorial. $F_{3,732} = 90.59$, $p\text{-valor} < 0.0001$; Tabla 6b).

Tabla 6. Tabla ANOVA factorial de la producción gonadal. Número de gónadas por pólipo de las colonias femeninas de *Eunicella singularis* de las poblaciones de Illa Pedrosa y Tascó Gros, según la mortalidad parcial de la colonia. Volumen gonadal (mm³) por pólipo de las colonias femeninas de *Eunicella singularis* de las poblaciones de Illa Pedrosa y Tascó Gros, según la mortalidad parcial de la colonia. **a** Colonias femeninas. **b** Colonias masculinas. Para el análisis estadístico, los datos han sido transformados con raíz cuadrada, aunque no se logró cumplir una distribución normal, motivo por el cual el p-valor se considera significativo si es < 0.01 (Guidetti et al., 2004). Los valores significativos se resaltan en negrita.

a Colonias femeninas	Número de gónadas por pólipo					Volumen gonadal (mm ³)					
	Fuente	gl	SC	MC	F	p	gl	SC	MC	F	p
Localidad	1	1.36	1.36	3.36	0.0673		1	0.32	0.32	5.53	0.0190
Clase Mortalidad parcial	3	42.57	14.19	35.14	< 0.0001		3	4.15	1.38	23.55	< 0.0001
Localidad* Clase Mortalidad parcial	3	5.50	1.83	4.54	0.0037		3	0.63	0.21	3.59	0.0136
Error	612	247.14	0.40				612	35.94	0.06		

b Colonias masculinas	Número de gónadas por pólipo					Volumen gonadal (mm ³)					
	Fuente	Gl	SC	MC	F	P	Gl	SC	MC	F	p
Localidad	1	27.04	27.04	12.53	0.0004		1	0.81	0.81	31.12	< 0.0001
Clase Mortalidad parcial	3	586.58	195.53	90.59	< 0.0001		3	4.03	1.34	51.60	< 0.0001
Localidad* Clase Mortalidad parcial	3	53.90	17.97	8.33	< 0.0001		3	1.18	0.39	15.12	< 0.0001
Error	732	1579.87	2.16				732	19.06	0.03		

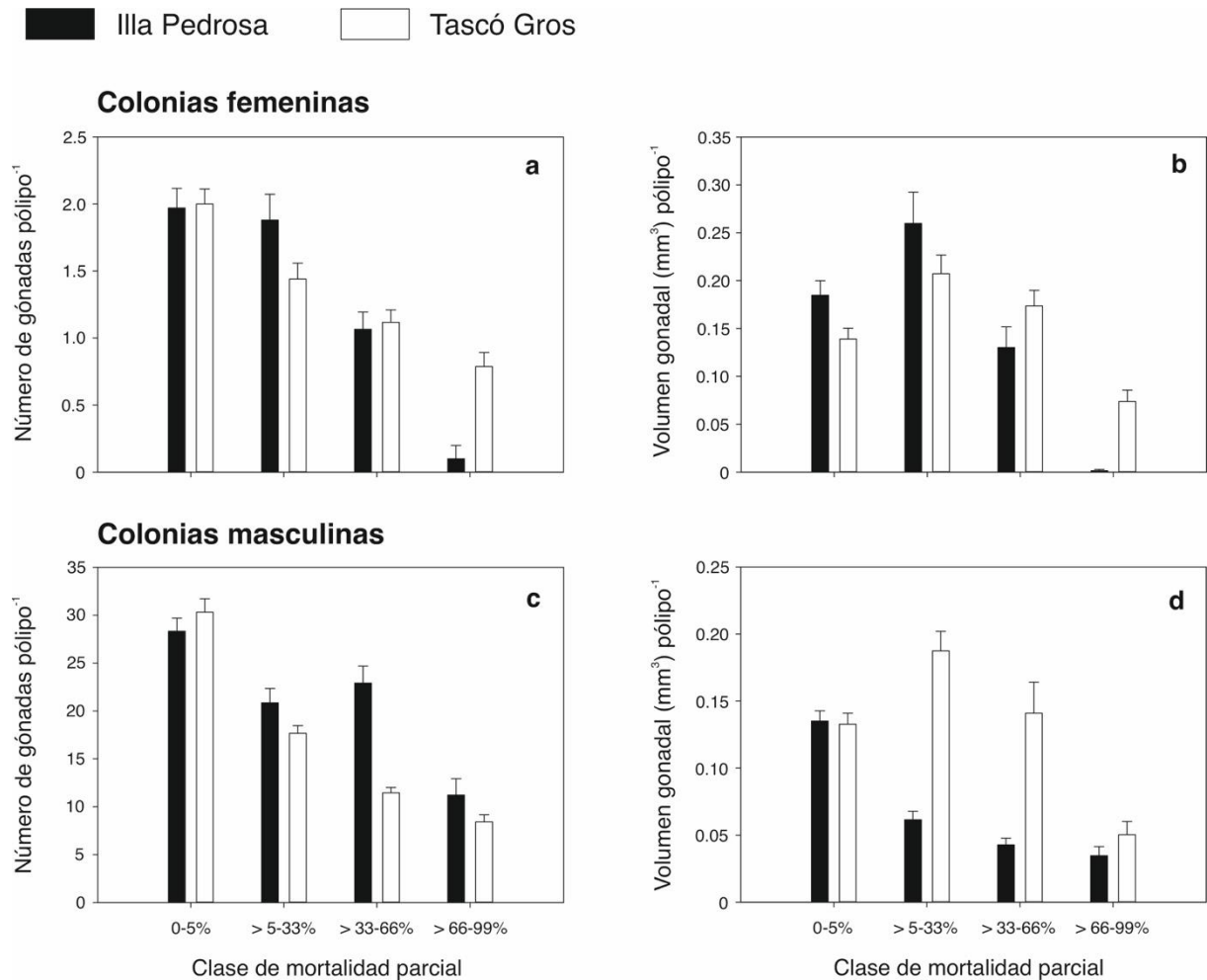


Figura 13. Producción gonadal de las colonias en las poblaciones de *Eunicella singularis* de Tascó Gros e Illa Pedrosa. Se distinguen 4 clases de incidencia de mortalidad parcial: > 0-5%, > 5-33%, > 33-66% y > 66-99%, según la clase de mortalidad parcial de cada colonia. Producción gonadal en las colonias femeninas: **a** Número de gónadas por pólipo y **b** Volumen gonadal (mm³) por pólipo; y en las colonias masculinas: **c** Número de gónadas por pólipo y **d** Volumen gonadal (mm³) por pólipo. Para el análisis estadístico, los datos han sido transformados con raíz cuadrada, aunque no se logró cumplir una distribución normal, motivo por el cual el p-valor se considera significativo si es < 0.01 (Guidetti et al., 2004). Los valores son el promedio ± SE (Error estándar).

En las colonias masculinas de Illa Pedrosa, el número de gónadas por pólipo muestra valores máximos en las clases de mortalidad parcial de 0-5% (28.33 ± 1.36 gónadas pólipo⁻¹), y disminuye progresivamente en las clases de mortalidad parcial hasta la clase de mortalidad parcial más afectada > 66-99% (11.22 ± 1.70 gónadas pólipo⁻¹), un valor un 60% inferior a la clase de mortalidad parcial 0-5 (Post-hoc test, p-valor < 0.001; Fig. 13c). En Tascó Gros, el número de gónadas masculinas por pólipo decrece progresivamente al incrementar la mortalidad parcial de las colonias, con un valor máximo en la clase de 0-5% de mortalidad parcial (30.32 ± 1.39 gónadas pólipo⁻¹) y un valor mínimo en la clase de > 66-99% de mortalidad parcial (8.42 ± 0.75 gónadas pólipo⁻¹) un valor un 72% inferior al de la clase 0-5% de mortalidad parcial (Post-hoc test, p-valor < 0.001; Fig. 13c). El número de gónadas por pólipo mostró

diferencias significativas entre ambas localidades según la clase de mortalidad parcial (ANOVA factorial. $F_{3, 732} = 8.33$, p-valor < 0.0001 ; Tabla 6b), debido a que esta pauta de disminución fue más acusada en la localidad del Tascó Gros que en la localidad Illa Pedrosa (Fig. 13c).

El volumen global gonadal por pólipo de las colonias masculinas de *E. singularis* mostró diferencias significativas entre las dos localidades estudiadas: Illa Pedrosa ($0.07 \pm 0.00 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$, $n = 35$ colonias) y Tascó Gros ($0.13 \pm 0.01 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$, $n = 39$; ANOVA factorial, $F_{1,732} = 31.12$, p-valor < 0.0001 ; Tabla 6b).

En referencia a la variación del volumen gonadal por pólipo con el porcentaje de mortalidad parcial de las colonias masculinas, ambas localidades mostraron diferencias significativas en el volumen gonadal por pólipo entre las distintas clases de mortalidad parcial (ANOVA factorial, $F_{1,732} = 51.60$, p-valor < 0.0001 ; Tabla 6b). De esta forma, en las colonias masculinas de Illa Pedrosa, el volumen gonadal por pólipo muestra valores máximos en la clase de mortalidad parcial de 0-5% ($0.14 \pm 0.01 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$), y disminuye progresivamente en las colonias más afectadas por mortalidad parcial ($> 5-33\%$, $> 33-66\%$ y $> 66-99\%$, promedio de $0.05 \pm 0.01 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$); un valor un 66% inferior a la clase de 0-5% de mortalidad parcial (Post-hoc test, p-valor < 0.001 ; Fig. 13d). En Tascó Gros, el volumen gonadal por pólipo muestra valores máximos en las clases de mortalidad parcial de 0-5% y $> 5-33\%$ (promedio de $0.16 \pm 0.1 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$), y disminuye en la clase de mortalidad parcial de $> 66-99\%$ ($0.05 \pm 0.01 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$), un valor un 69% inferior al del grupo de 0-33% de mortalidad parcial ($0.16 \pm 0.1 \text{ mm}^3 \text{ pólipo}^{-1}$); Post-hoc test, p-valor < 0.001 ; Fig. 13d). El volumen gonadal por pólipo mostró diferencias significativas entre ambas localidades según la clase de mortalidad parcial. Por lo tanto, en el Tascó Gros, el volumen gonadal por pólipo de las colonias masculinas de las clases de mortalidad parcial $> 5-33\%$ y $> 33-66\%$ fue superior al volumen gonadal de las mismas clases de mortalidad parcial de la localidad Illa Pedrosa en un 67% y un 70%, respectivamente (ANOVA factorial. $F_{3, 732} = 15.12$, p-valor < 0.0001 ; Tabla 6b; Fig. 13d).

Efecto de la poda sobre la producción gonadal

La actuación de poda de las colonias de *E. singularis* se realizó en la localidad de Illa Pedrosa, donde previamente se había caracterizado la variación de la producción gonadal (número de gónadas por pólipo y volumen gonadal por pólipo) en función del porcentaje de mortalidad parcial de las colonias femeninas y masculinas. Estos datos se han utilizado como referencia

para determinar el efecto de la actuación de poda sobre la producción gonadal de la especie. La actuación de poda conllevó la reducción de gran parte de las ramas muertas de las colonias.

Colonias femeninas

En primer lugar, para evaluar el efecto de la poda sobre la producción gonadal se han utilizado las colonias femeninas podadas (Poda) que antes de la poda tenían > 5-33% de mortalidad parcial y que después de la poda habían reducido su porcentaje de mortalidad parcial al 0-5%, y se han contrastado con el grupo de referencia de las colonias Control (no podadas) con 0-33% de mortalidad parcial (en la producción gonadal Control, las clases de mortalidad parcial 0-5% y > 5-33% no mostraron diferencias significativas entre sí; Fig. 13). El número de gónadas por pólipo de las colonias Poda 0-5% (Antes Poda > 5-33%: 1.43 ± 0.13 gónadas pólipo⁻¹) fue significativamente menor (un 26% inferior) al de las colonias Control 0-33% (1.94 ± 0.12 gónadas pólipo⁻¹; ANOVA anidada, $F_{1,221} = 14.07$, p-valor = 0.0011; Fig. 14a). De forma similar, el volumen gonadal por pólipo de las colonias Poda 0-5% (Antes Poda > 5-33%: 0.15 ± 0.02 mm³ pólipo⁻¹) fue significativamente menor (un 29% inferior) al de las colonias Control 0-33% (0.21 ± 0.02 mm³ pólipo⁻¹; ANOVA anidada $F_{1,221} = 7.40$, p-valor = 0.0070; Fig. 14b).

En segundo lugar, para evaluar el efecto de la poda sobre la producción gonadal también se han utilizado las colonias femeninas podadas (Poda) que antes de la poda tenían > 33-66% de mortalidad parcial y que después de la poda habían reducido su porcentaje de mortalidad parcial a > 5-33%, y se han contrastado con las clases de referencia de las colonias Control (no podadas) con 0-33% y con > 33-66% de mortalidad parcial (Fig. 13). El número de gónadas por pólipo de las colonias Poda > 5-33% (Antes Poda > 33-66%: 0.97 ± 0.18 gónadas pólipo⁻¹) fue significativamente menor (un 50% inferior) al de las colonias Control 0-33% (1.94 ± 0.12 gónadas pólipo⁻¹; ANOVA anidada, $F_{2,217} = 18.52$, p-valor < 0.0001; Fig. 14c). De forma similar, el volumen gonadal por pólipo de las colonias Poda > 5-33% (Antes Poda > 33-66%: 0.07 ± 0.02 mm³ pólipo⁻¹) fue significativamente menor (un 67% inferior) al de las colonias Control 0-33% (0.21 ± 0.02 mm³ pólipo⁻¹; ANOVA anidada, $F_{2,217} = 17.22$, p-valor < 0.0001; Fig. 14d). No obstante, no se apreciaron diferencias en el número de gónadas por pólipo entre las colonias Poda > 5-33% (Antes Poda > 33-66%) y las colonias Control > 33-66% (promedio de 1.02 ± 0.16 gónadas pólipo⁻¹; Post-hoc test, p-valor > 0.05; Fig. R14c). De igual forma, no se observaron diferencias significativas en el volumen gonadal por pólipo entre las colonias

Poda > 5-33% (Antes Poda > 33-66%) y las colonias Control > 33-66% (promedio de 0.14 ± 0.02 ; Post-hoc test, p-valor > 0.05; Fig. 14d).

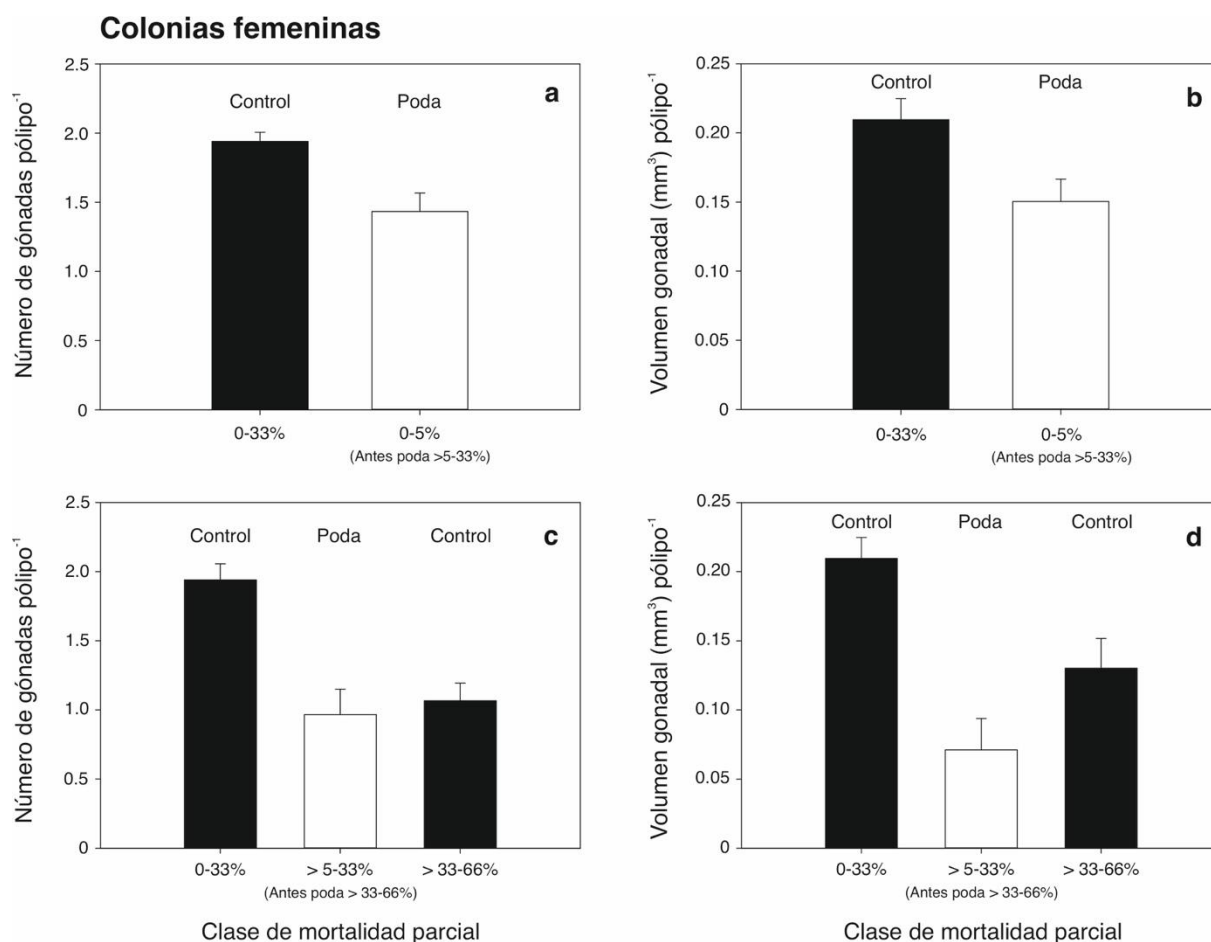


Figura 14. Efecto de la poda sobre la producción gonadal de las colonias femeninas de *Eunicella singularis* en la localidad de Illa Pedrosa. a Número de gónadas por pólipo y **b** Volumen gonadal (mm^3) por pólipo en los 2 grupos de colonias estudiados: Control con mortalidad parcial del 0-33% y Poda con mortalidad parcial del 0-5% (> 5-33% antes de la actuación de poda). **c** Número de gónadas por pólipo y **d** Volumen gonadal (mm^3) por pólipo en los 3 grupos de colonias estudiados: Control con mortalidad parcial del 0-33% y > 33-66%, y Poda con mortalidad parcial de >5-33% (> 33-66% antes de la actuación de poda). Los valores son el promedio \pm SE (Error estándar). Para el análisis estadístico, los datos han sido transformados con raíz cuadrada por qué no cumplían una distribución normal, motivo por el cual el p-valor se considera significativo si es < 0.01 (Guidetti et al., 2004).

Colonias masculinas

Para evaluar el efecto de la poda sobre la producción gonadal de las colonias masculinas se han utilizado las colonias podadas (Poda) que antes de la poda tenían > 5-33% de mortalidad parcial y que después de la poda habían reducido su porcentaje de mortalidad parcial al 0-5%, y se han contrastado con las clases de mortalidad parcial de las colonias Control (no podadas)

con 0-5% y con > 5-33% de mortalidad parcial. Las colonias Poda 0-5% (Antes Poda > 5-33%) presentaron un número de gónadas por pólipo significativamente menor que las colonias Control 0-5% (ANOVA anidada, $F_{2,360} = 69.78$, p-valor < 0.001; Post-hoc test, p-valor < 0.0001). Las colonias Poda 0-5% (Antes Poda > 5-33%) tenían 19.10 ± 1.15 gónadas pólipo⁻¹, mientras que las colonias Control 0-5% tenían 28.33 ± 1.36 gónadas pólipo⁻¹, un valor un 48% superior al de las colonias Poda (Fig. 15a). No obstante, las colonias Poda 0-5% (Antes Poda > 5-33%) no mostraron diferencias significativas respecto a las colonias Control > 5-33% (Post-hoc test, p-valor > 0.01; colonias Control > 5-33%: 20.86 ± 1.50 gónadas pólipo⁻¹). De forma similar, las colonias Poda 0-5% (Antes Poda > 5-33%) presentaron un volumen gonadal por pólipo significativamente menor que las colonias control de la clase de mortalidad parcial 0-5% (ANOVA anidada $F_{2,360} = 229.52$, p-valor < 0.001; Post-hoc test, p-valor < 0.001). Las colonias Poda 0-5% (Antes Poda > 5-33%) tenían un volumen gonadal de 0.06 ± 0.01 mm³ pólipo⁻¹, mientras que las colonias Control 0-5% tenían un volumen gonadal de 0.14 ± 0.01 mm³ pólipo⁻¹ (Fig. 15b), un valor un 56% inferior en las colonias podadas. No obstante, no mostraron diferencias significativas respecto a las colonias Control > 5-33% (0.06 ± 0.01 mm³ pólipo⁻¹; Post-hoc test, p-valor > 0.01; Fig. 15b).

Para evaluar el efecto de la poda sobre la producción gonadal también se utilizaron las colonias masculinas podadas (Poda) que antes de la poda tenían > 33-66% de mortalidad parcial y que después de la poda habían reducido su porcentaje de mortalidad parcial a > 5-33%, y se han contrastado con las clases de referencia de las colonias Control (no podadas) con > 5-33% y con > 33-66% (Fig. 15c). Las colonias Poda > 5-33% (Antes Poda > 33-66%) presentaron un número de gónadas por pólipo significativamente menor que las colonias Control > 5-33% y > 33-66% de mortalidad parcial (ANOVA anidada, $F_{2,234} = 33.86$, p-valor < 0.001; Post-hoc test, p-valor < 0.001). Las colonias Poda > 5-33% (Antes Poda > 33-66%) tenían 12.30 ± 1.39 gónadas pólipo⁻¹, mientras que las colonias Control tenían un promedio de 21.88 ± 1.64 gónadas pólipo⁻¹ (clases > 5-33% y > 33-66% de mortalidad parcial; Fig. 15d). De forma similar, las colonias Poda > 5-33% (Antes Poda > 33-66%) presentaron un volumen gonadal por pólipo significativamente menor que las colonias Control > 5-33% y > 33-66% de mortalidad parcial (ANOVA anidada, $F_{2,234} = 26.70$, p-valor < 0.001; Post-hoc test, p-valor < 0.001). Las colonias Poda > 5-33% (Antes Poda > 33-66%) tenían un volumen gonadal de 0.03 ± 0.01 mm³ pólipo⁻¹, mientras que las colonias Control > 5-33% y > 33-66% tenían un volumen gonadal de 0.06 ± 0.01 y de 0.04 ± 0.00 mm³ pólipo⁻¹, respectivamente (Fig. R15d).

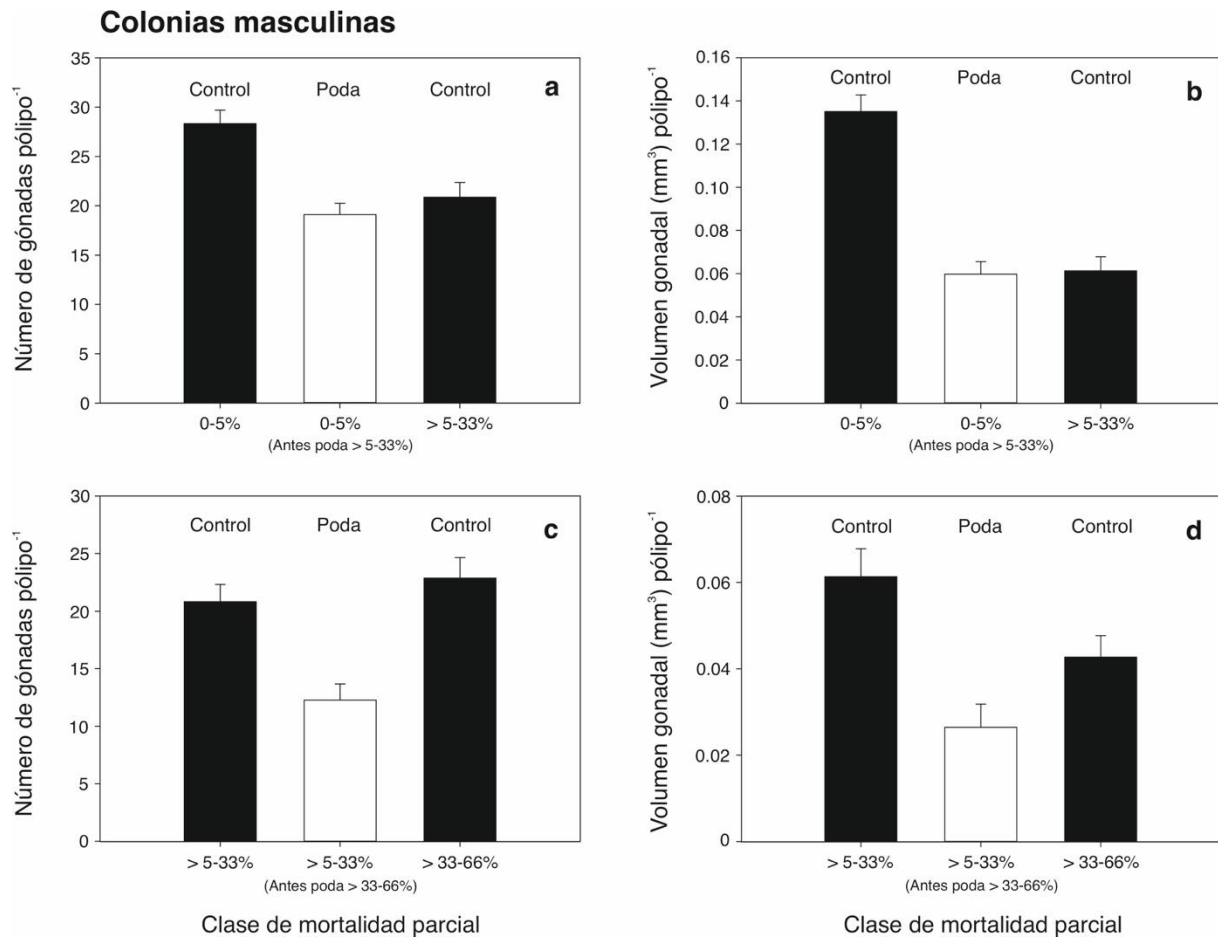


Figura 15. Efecto de la poda sobre la producción gonadal de las colonias masculinas de *Eunicella singularis* en la localidad de Illa Pedrosa. **a** Número de gónadas por pólipo y **b** Volumen gonadal (mm³) por pólipo en los 2 grupos de colonias estudiados: Control con mortalidad parcial del 0-33% y Poda con mortalidad parcial del 0-5% (> 5-33% antes de la actuación de poda). **c** Número de gónadas por pólipo y **d** Volumen gonadal (mm³) por pólipo en los 3 grupos de colonias estudiados: Control con mortalidad parcial del 0-33% y > 33-66%, y Poda con mortalidad parcial de > 5-33% (> 33-66% antes de la actuación de poda). Los valores son el promedio \pm SE (Error estándar). Para el análisis estadístico, los datos han sido transformados con raíz cuadrada por qué no cumplían una distribución normal, motivo por el cual el p-valor se considera significativo si es < 0.01 (Guidetti et al., 2004).

Discusión

Impacto del episodio de mortalidad en el año 2018

A lo largo de las dos localidades estudiadas en las Islas Medas y la Costa del Montgrí, la gorgonia blanca *Eunicella singularis* forma densas poblaciones que configuran unos extensos bosques marinos (Gori et al., 2007). Las colonias de *E. singularis* se hallan desde los 5 m hasta los 40 m de profundidad, con las densidades más altas alrededor de los 10 - 20 m. Las densidades de las dos poblaciones estudiadas (Illa Pedrosa y Tascó Gros) son muy similares y se encuentran a una cierta proximidad (~ 4 km). A finales del verano del 2018, las colonias de *E. singularis* exhibieron una rápida pérdida de tejido vivo a lo largo de toda la cuenca occidental del Mediterráneo (De la Linde-Rubio et al., 2018; Hereu et al., 2018; Turicchia et al., 2018). Las poblaciones de la gorgonia *E. singularis* en el Parc Natural del Montgrí, Illes Medes i Baix Ter se vieron afectadas severamente por el evento de mortalidad en masa de acaecido en verano del 2018 (Hereu et al., 2018; Serrano et al., 2019). La mortalidad parcial reciente observada en las localidades de estudio se caracterizó por la pérdida de tejido vivo y/o por la epibiosis de organismos pioneros tales como hidroideos. La mortalidad parcial de las colonias tiene su explicación en la afectación de la fisiología. Las altas temperaturas y la irradiación solar provocan una disminución de la actividad fotosintética (por la degradación o expulsión de los organismos simbioses) y no se lograría paliar la escasez de alimento del verano (debido a la estratificación y por lo tanto, el nulo aporte de nutrientes de las capas profundas, debajo de la termoclina estacional; Coma y Ribes, 2003), provocando una reducción de la tasa de calcificación de los tejidos e incluso produciendo necrosis en los tejidos con su posterior desprendimiento de los ejes de las colonias (Baker et al., 2008; Ezzat et al., 2013, Ferrier-Pagès et al. 2009). En poblaciones sanas la mortalidad parcial suele ser de aproximadamente un 15% (Linares et al., 2008a) mientras que la mortalidad parcial reciente observada fue de $43 \pm 3\%$ y $26 \pm 3\%$ en Illa Pedrosa y Tascó Gros, respectivamente, que indica que el impacto de este evento sobre las poblaciones de *E. singularis* fue relevante. La epibiosis por organismos como briozoos o algas filamentosas (mortalidad parcial antigua) de los esqueletos desnudos no fue significativa (5% del total de mortalidad parcial) sugiriendo que los efectos en la mortalidad parcial fueron causados por el episodio de mortalidad del verano de 2018 (Linares et al., 2005; Serrano et al., 2019; Turicchia et al., 2018). La presencia de los epibiontes no son la causa de la mortalidad parcial o total de las colonias sino la consecuencia de tener un espacio libre para la colonización de estos posterior a la muerte del tejido vivo de las gorgonias (Cerrano et al. 2000; Coma et al., 2006; Perez et al. 2000).

El estrés térmico juega un papel muy importante en la aparición de mortalidades en masa de gorgonias (Coma et al., 2009; Calvo et al., 2011; Rivetti et al., 2014; Rubio-Portillo et al., 2016). La estivación o letargo estival aparece como una característica predominante en las dinámicas estacionales de los organismos filtradores suspensívoros bentónicos del Mediterráneo, como es el caso de *E. singularis*, lo que indica que incluso en años con temperaturas estivales más normales provoca un estrés en los organismos (Coma y Ribes, 2003). Por lo tanto, la prolongación de periodos veraniegos extremadamente calurosos resulta en el incremento de anomalías positivas en la temperatura del agua, la fuerte estratificación de la columna de agua y el decrecimiento de oxígeno y nutrientes disponibles para los organismos bentónicos (Ezzat et al., 2013; Kersting et al., 2013). Estos factores estresores tienen un efecto directo en la salud de muchos organismos bentónicos incluyendo las gorgonias (Coma et al., 2009; Turicchia et al. 2018). La capacidad de resistencia de *E. singularis* a estos factores estresores puede durar durante varias semanas, sin llegar a producirse una necrosis de los tejidos y su posterior desprendimiento de los ejes (Ferrier-Pagès et al., 2009; Pey et al., 2011; Previati et al., 2010). Por lo tanto, los eventos de mortalidad en masa de colonias de *E. singularis* observados fueron debidos a una larga exposición a estos factores (Ezzat et al., 2013). Bajo condiciones de estrés, las gorgonias dan más prioridad a la redistribución de la energía hacía la recuperación de los tejidos afectados (Cupido et al., 2009). También, los tejidos en crecimiento poseen niveles significativamente más altos de inmunidad en comparación con los tejidos más viejos, esto puede explicar la mayor prevalencia a enfermedades y/o pérdida de tejido vivo en las colonias más grandes (Dube et al., 2002, Van de Water et al., 2018)) demostraron que las colonias pequeñas son químicamente más defensivas que las colonias más grandes cuando son atacadas por agentes patógenos (Cerrano et al., 2005). También se describió una susceptibilidad diferencial entre las clases de talla de corales afectados por blanqueamiento (Loya et al., 2001).

Estado de conservación de las poblaciones de *E. singularis*

El evento de mortalidad del año 2018 supuso un impacto severo en la población de *E. singularis* de Illa Pedrosa, con un promedio de mortalidad parcial (i.e., porcentaje de la superficie de las colonias afectada por mortalidad) del 48%. Diversos estudios de eventos de mortalidad en masa también encontraron valores similares, o incluso mayores, del porcentaje de colonias afectadas por mortalidad parcial de *E. singularis*; por ejemplo, entre el 65 y el 90% de colonias en el mar de Liguria el año 1999 (Cerrano et al., 2000), ~ 90% de colonias en el Mediterráneo noroccidental el año 1999 (Perez et al., 2000), el 59% de colonias en las Islas

Baleares (Coma et al., 2006). La gorgonia roja *Paramuricea clavata* también se ha visto severamente afectada por episodios de mortalidad en masa, por ejemplo, el 76% de colonias en Port-Cros (Francia) el año 1999 (Linares et al., 2005) o el 75% en el mar de Liguria en el año 2003 (Cupido et al., 2009).

Por otra parte, el porcentaje de colonias muertas de *E. singularis* de la localidad de Illa Pedrosa después del evento de mortalidad parcial del año 2018 fue del 27%. En diversos estudios se han observado valores similares o incluso menores del porcentaje de colonias muertas de gorgonias; por ejemplo, entre el 20 y el 25% de colonias de *E. singularis* en el mar de Liguria en el año 1999 (Cerrano et al., 2000) o el 9% de colonias de *P. clavata* en Port-Cros (Francia) el año 1999 (Linares et al., 2005). Por lo tanto, el evento de mortalidad en masa del año 2018 afectó de forma severa a las poblaciones de *E. singularis* de la localidad de Illa Pedrosa, con valores similares a los de otras localidades del Parc Natural del Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter; obtenidos en los estudios de seguimiento realizados durante los años 2018 y 2019 (Hereu et al., 2018, Serrano et al., 2019).

Si todas las colonias son consideradas (vivas y muertas), la incidencia de mortalidad parcial o porcentaje de la superficie de la colonia afectada por mortalidad resultó en un promedio del $48 \pm 4\%$, mientras que, si solo son consideradas las colonias vivas, la incidencia de mortalidad parcial fue de un promedio del $30 \pm 3\%$. Estos valores son consistentes con los valores generales proporcionados por los estudios anteriormente citados (Cerrano et al., 2000, Coma et al., 2006, Linares et al., 2005, Cupido et al., 2009).

Actuación de poda

La actuación de Poda permitió reducir de un $37 \pm 5\%$ a un $12 \pm 6\%$ de la mortalidad parcial de las colonias entre el inicio del experimento y después de la Poda. También permitió el incremento de las colonias sanas de $20 \pm 6\%$ a $72 \pm 5\%$ sin afectar a la densidad. Estudios previos indican que las gorgonias manifiestan un proceso de natural de reducción de la mortalidad parcial a través de la rotura de los fragmentos apicales recubiertos por epibiontes. Este proceso requiere de varios años, es por ello por lo que la poda podría ejercer un efecto parecido en una menor escala temporal (Cerrano et al., 2005, Linares et al., 2005, Cupido et al., 2008b). Según Cupido y colaboradores (2008) la mortalidad parcial disminuyó de un 57% a un 10% en un periodo de 4 años. También Linares y colaboradores (2005) observaron cómo hay un descenso de la mortalidad en los dos primeros años después del evento de mortalidad, pero aun así el porcentaje de mortalidad parcial sigue siendo alto ($> 30\%$). Cerrano y colaboradores

(2005) observaron como las clases de talla más pequeñas (< 10 cm de altura máxima) se recuperaron más rápido (entre el primer y el segundo año después del evento de mortalidad), mientras que las colonias más grandes observaron una recuperación parcial durante los 3 años del estudio. En este sentido, La variación temporal en el descriptor del porcentaje de mortalidad parcial podría ser debida a el proceso de fragmentación natural de las ramas muertas y futuros estudios deberían evaluar el cambio en biomasa viva como descriptor, a partir de fotografías. En base al conocimiento científico actual, la disminución de la mortalidad parcial de las colonias de gorgonias con la poda podría mejorar la viabilidad de sus poblaciones a través de disminuir la mortalidad por desprendimiento del sustrato. Así pues, las gorgonias con una elevada incidencia de mortalidad parcial (>50% de su superficie afectada) muestran una tasa de mortalidad mayor a largo plazo, en comparación con las gorgonias sanas o con menor incidencia de mortalidad parcial (Linares et al. 2005).

En este sentido, la actuación de poda podría agilizar la recuperación de las colonias (Serrano et al., 2019) y sobre todo de las colonias más grandes, que son más vulnerables a estos eventos de mortalidad en masa (Van de Water, 2018). En las gorgonias y corales duros, la regeneración de los tejidos ha de ser rápida para evitar la epibiosis (Cerrano et al., 2005), pero el proceso de regeneración puede afectar de forma negativa al crecimiento, la reproducción, la resistencia a patógenos y la competitividad por el espacio, de las colonias (Cupido et al., 2012, Van de Water et al., 2018). En corales, la regeneración depende de la especie en cuestión, aunque en todos los casos, se requiere una translocación de la energía para hacer frente a la pérdida de tejido y la posterior recuperación de éste (Cerrano et al., 2005). Aun así, diversos estudios sugieren que la capacidad de recuperación de las gorgonias como *E. singularis* y *Paramuricea clavata* proviene de la rotura de las ramas recubiertas por epibiontes (Cerrano et al., 2005, Coma et al., 2006, Cupido et al., 2008, Linares et al., 2005). Este proceso suele ser prolongado en el tiempo, por lo cual hace vulnerable a las gorgonias durante un tiempo más largo (Linares et al., 2005). En este sentido, la técnica de poda permitiría eliminar las fracciones recubiertas por epibiontes o mucho tiempo después del evento de mortalidad en masa, permitiendo a las colonias disminuir la redistribución de la energía y evitar en cierto grado la afectación de otros parámetros vitales como el crecimiento, la protección ante enfermedades o la inversión en reproducción (Cupido et al., 2012, Linares et al., 2008b). Por lo tanto, la actuación de poda podría agilizar la recuperación de las poblaciones como se observó en un estudio piloto previo sobre los beneficios de la técnica de poda en la gorgonia *Ellisella paraplexauroides* realizado en las Islas Chafarinas (mar de Alborán), con un número de colonias limitado (n = 9) donde los resultados

mostraron una mejora sustancial de las colonias (crecimiento de las colonias, producción de nuevas ramas y en general un aumento en el estado de salud de las colonias; Sánchez-Tocino et al., 2017).

Seguimiento al cabo de 1 año

En el seguimiento al cabo de un año la mortalidad parcial de las colonias podadas era de un 18%, lo cual indicaría que la actuación de poda logró reducir aproximadamente a la mitad la mortalidad parcial de las colonias. Estos resultados son muy positivos dado que en estudios anteriores han mostrado cómo en poblaciones de gorgonias sanas, la mortalidad parcial suele ser de aproximadamente un 15% (Linares et al., 2008a). Entonces, con la actuación de poda se observó cómo en poco tiempo, una población de gorgonias afectada puede volver al estado anterior al evento de mortalidad en masa, en referencia a la mortalidad parcial de las colonias. Así pues, la actuación de poda permitiría reducir el tiempo de recuperación de las colonias respecto al tiempo que se esperaría en condiciones naturales. Debido a que en anteriores estudios se observó cómo en los primeros meses e incluso el primer año, la mortalidad parcial puede seguir aumentando, aunque es cierto que la mayoría de la mortalidad parcial se observa en los primeros meses después del evento de mortalidad en masa (Cerrano et al., 2005, Coma et al., 2006, Cupido et al., 2008, Linares et al., 2005). Por otra parte, es interesante hacer referencia a que en las colonias control puede haberse observado cierta disminución de la mortalidad parcial dado que estudios anteriores, mostraron cómo la recuperación natural de las colonias se da mediante la regeneración de tejido y la fragmentación natural de ramas con elevado recubrimiento de epibiontes (Coma et al., 2006, Linares et al., 2005).

En referencia al porcentaje de colonias según la clase de mortalidad parcial, se observó cómo la actuación de poda al cabo de un año había permitido incrementar el porcentaje de colonias sanas en las parcelas de poda, mientras que en las parcelas control, el porcentaje de colonias sanas se había mantenido igual. Es por ello, por lo que la actuación de poda permitiría tener colonias sanas en un breve tiempo, mientras que, de forma natural, la recuperación de las colonias se observaría en un espacio de tiempo mucho mayor. Coma y colaboradores (2006), mostraron como el porcentaje de colonias afectadas de *E. singularis* puede seguir siendo muy elevado (59% de las colonias afectadas) 4 años después del evento de mortalidad en masa. Por este motivo, con la actuación de poda se logró incrementar 2.4 veces el porcentaje de colonias sanas (de un 20 a un 48%). Aunque, el porcentaje de colonias afectadas al cabo de un año sigue siendo bastante elevado (52%).

En cuanto a la tasa de mortalidad anual también se observa cómo las colonias podadas muestran una tasa de mortalidad mayor que las colonias control. En este sentido es importante destacar que la gran mayoría de las colonias, una vez podadas se incluyeron en la clase de mortalidad parcial de 0-5%, por lo tanto, el número de colonias con porcentajes de mortalidad parcial superiores al 5% fue muy bajo, por lo cual, es difícil de extraer una respuesta fiable. Considerando solo las colonias Poda 0-5% de mortalidad parcial después Poda (> 5-33% Antes Poda), se observa que tienen una tasa de mortalidad anual un 62% más baja que las colonias Control de la clase 0-5% de mortalidad parcial. Esto indicaría que las colonias podadas han sobrevivido más que las colonias control de esta misma clase de mortalidad parcial, lo cual es de gran importancia como medida de actuación para la conservación de la especie. Otros autores han observado un incremento en la mortalidad parcial al año siguiente después de un evento de mortalidad, lo cual, implica que hay unos efectos retardados en las colonias de *E. singularis* como ha sucedido en dichos estudios (Cerrano et al., 2005, Cupido et al., 2008).

Reproducción

El estudio de las consecuencias del evento de mortalidad en masa del año 2018 sobre la reproducción sexual de la gorgonia *Eunicella singularis* es un paso crucial para entender la capacidad de recuperación de las poblaciones de la especie ante perturbaciones de gran magnitud. Los posibles efectos negativos sobre la reproducción de las gorgonias pueden tener importantes implicaciones a largo plazo en la recuperación y conservación de las poblaciones afectadas (Airi et al., 2016, Linares et al., 2008b). Este hecho es especialmente relevante en las dos especies de gorgonias más abundantes en la zona de estudio (Parque Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter): *E. singularis* y *P. clavata*, en las que la reproducción asexual es cuantitativamente irrelevante, siendo la reproducción sexual la fuente principal de reclutamiento de nuevas colonias en las poblaciones (Coma et al., 1995b, Ribes et al., 2007, Rafel Coma, CEAB-CSIC, datos no publicados).

Proporción de sexos y fertilidad

Estudios anteriores han mostrado cómo la reproducción se ve afectada dependiendo de la severidad de la perturbación (Michalek-Wagner y Willis, 2001a). En el presente estudio se han estudiado las diferencias en la producción gonadal entre dos localidades de la gorgonia *E.*

singularis (Illa Pedrosa y Tascó Gros) que se vieron afectadas en diferente grado por el evento de mortalidad en masa del año 2018, siendo Illa Pedrosa la localidad más afectada (promedio del 48% de mortalidad parcial) respecto el Tascó Gros (promedio del 32% mortalidad parcial; Rafel Coma, CEAB-CSIC, datos no publicados). En este sentido, solo las colonias de *E. singularis* afectadas por mortalidad parcial (> 5-99%) de la localidad de Illa Pedrosa mostraron un sesgo en la proporción de sexos (más colonias masculinas que femeninas). La proporción de sexos de 1:1 observada en este estudio en las colonias no afectadas por mortalidad parcial (0-5%) es consistente con los estudios previos en los que se ha observado que esta especie se caracteriza por tener una proporción de sexos 1:1 en poblaciones sanas a lo largo del litoral mediterráneo español (Gori et al., 2007, Ribes et al., 2007). Este hecho es coherente con la interpretación de que el sesgo hacia las colonias masculinas observado en la proporción de sexos en las colonias afectadas por mortalidad parcial en Illa Pedrosa es muy probablemente atribuible a un efecto diferencial del evento de mortalidad en ambos sexos. De forma similar a la observada en este estudio, Cerrano y colaboradores (2005) documentaron un sesgo en la proporción de sexos de la especie *P. clavata* después de un evento de mortalidad, e interpretaron que las colonias femeninas se habían visto más afectadas que las masculinas (Cerrano et al., 2005). Estos autores sugirieron que el sesgo en la proporción de sexos hacia las colonias masculinas podría ayudar al incremento de la fecundación. Dado que la fecundación puede representar un paso limitante en la dinámica poblacional de algunas especies de gorgonias (Lasker et al., 1996).

En referencia a la fertilidad de *E. singularis*, en este estudio se observó cómo la fertilidad decrece según aumenta la afectación por mortalidad parcial de las colonias. Así pues, el porcentaje de colonias fértiles fue similar al 100% en las colonias no afectadas por mortalidad parcial (92%), mientras que en las colonias afectadas por mortalidad parcial (> 5-99%) el porcentaje de colonias fértiles se redujo al 75% en la localidad del Tascó Gros y al 48% en Illa Pedrosa, la localidad más afectada por el evento de mortalidad. Estos resultados concuerdan con estudios anteriores en los cuales la fertilidad de los pólipos de las colonias se ve afectada según el incremento de la incidencia de mortalidad parcial (Airi et al., 2014, Baird y Marshall, 2002, Cupido et al., 2012, Linares et al., 2008b).

Producción gonadal en función de la mortalidad parcial

En este estudio se han utilizado dos descriptores de la producción gonadal de *Eunicella singularis*, el número de gónadas por pólipo y el volumen gonadal por pólipo. Estos descriptores han sido utilizados en estudios anteriores sobre la reproducción en corales y gorgonias (Baird y Marshall, 2002, Beiring y Lasker, 2000, Hagedorn et al., 2016, Linares et al., 2008b). Ambos indicadores han permitido determinar el efecto de la perturbación del año 2018 sobre la reproducción sexual de las colonias, así como evaluar las consecuencias de la actuación de poda en las mismas.

Entre las dos localidades no hubo diferencias en el número de gónadas por pólipo de las colonias femeninas, pero sí que se observaron diferencias en las colonias masculinas. Esto podría ser debido a que las colonias femeninas fueron más susceptibles que las colonias masculinas a los efectos negativos de la mortalidad parcial, al verse más afectadas en cuanto a su producción gonadal. En este supuesto, el grado de afectación en las colonias femeninas, por menor que fuese, ya tendría suficientes repercusiones en el balance energético, incluyendo la inversión en reproducción, aunque el grado de afectación de las localidades fuese distinto, mientras que las colonias masculinas son más resistentes y solo a partir de un cierto grado de afectación, se vería perjudicada su producción gonadal (Cerrano et al., 2005, Linares et al., 2008b).

En este sentido, el número de gónadas por pólipo (tanto en colonias femeninas como masculinas) se redujo progresivamente en las dos localidades a medida que el porcentaje de mortalidad parcial de las colonias aumentó. La existencia de diferencias significativas entre las localidades según la clase de mortalidad parcial parece estar relacionada en primer lugar con las diferencias en el grado de afectación del evento de mortalidad del año 2018 entre ambas localidades, y en segundo lugar con la variabilidad espacial (entre poblaciones) de la especie (Gori et al., 2007).

La reducción del número de gónadas por pólipo es una consecuencia del daño producido en las colonias, dado que la necesidad de cerrar las heridas, que representan tener una parte de la colonia muerta y recubierta por otros organismos, exigen una gran inversión energética para la creación de nuevo tejido vivo de las colonias. Por lo tanto, la persistencia de la mortalidad parcial en las colonias perjudica gravemente la inversión de energía en la reproducción (Linares et al., 2008b). De forma parecida, se observó que, durante el evento de blanqueamiento de corales de 1998 en la Gran Barrera de Coral australiana, muchas especies redujeron su

producción gonadal el año posterior al evento (Ward et al., 2002). También se han descrito efectos negativos de los episodios de mortalidad en la reproducción sexual de distintas especies de corales en el Caribe, como en el caso de *Acropora palmata* a lo largo de todo su ciclo reproductivo (Randall y Szmant, 2009). La principal hipótesis planteada sobre la relación causal entre el aumento de la mortalidad parcial y la reducción de la fecundidad es la inversión prioritaria de la energía de que disponen las gorgonias y corales en la regeneración del tejido vivo de las partes afectadas por mortalidad parcial, para contribuir así a favorecer la supervivencia de las colonias (Linares et al., 2008b, Michalek-Wagner y Wallis, 2001a, Fisch et al., 2019, Henry y Hart, 2005, Szmant y Gassman, 1990). La mayor afectación en las colonias femeninas en cuanto a fecundidad y fertilidad podría estar relacionada con un requerimiento de más recursos energéticos tales como lípidos, carotenoides, proteínas y entre otros metabolitos para el desarrollo de las gónadas femeninas (Michalek-Wagner y Willis, 2001b, Fisch et al., 2019).

De igual forma, el volumen gonadal se vio reducido al incrementar el porcentaje de mortalidad parcial de las colonias en ambas localidades de estudio. Por lo tanto, el evento de mortalidad parcial no solamente afecta a la producción de gónadas, sino que también tiene efectos negativos en el desarrollo de las gónadas femeninas y masculinas. Esta reducción en el volumen gonadal por pólipo en las colonias afectadas por mortalidad parcial también se ha observado en otros estudios producidos anteriormente y con otras especies. Por ejemplo, Linares y colaboradores (2008b) observaron que la biomasa gonadal en colonias masculinas de *P. clavata* se vio reducida entre un 49 y un 64% en las colonias afectadas de > 5% de mortalidad parcial. De manera similar, Hagedorn y colaboradores (2016) describieron que el volumen gonadal de las colonias femeninas del coral *Fungia scutaria* se vio reducido en un 51% después del evento de blanqueamiento del año 2014. Estudios anteriores también muestran como las colonias, a pesar de la redistribución de los recursos energéticos hacia la recuperación de los tejidos vivos, aseguran que algunas gónadas puedan alcanzar la madurez, siendo la disminución en el volumen gonadal debida a una reducción en el número de gónadas (Linares et al., 2008b).

Por lo tanto, la disminución de la producción gonadal (número de gónadas y volumen gonadal por pólipo) observado en *E. singularis* en el presente estudio daría soporte a la hipótesis de que, después de un evento de mortalidad, los organismos de vida longeva dan prioridad a la distribución de los recursos energéticos para la regeneración de las partes afectadas de las colonias logrando favorecer su supervivencia, a cambio de una disminución temporal de la inversión en reproducción (Cox, 2007, Fisch et al., 2019, Linares et al., 2008b).

Efecto de la poda sobre la producción gonadal

Los resultados obtenidos en el presente estudio del efecto de la poda sobre la producción gonadal, en general, no han mostrado una mejora respecto a las colonias de su misma clase de mortalidad parcial antes de la actuación de poda. Es decir, la actuación de poda no ha conseguido mejorar la producción gonadal en el primer año de reproducción después del evento de mortalidad en masa. Así pues, el número de gónadas por pólipo de las colonias podadas con 0-5% de mortalidad parcial (> 5-33% antes de la poda), tanto en colonias femeninas como masculinas, se mantuvo igual que en las colonias control de > 5-33% de mortalidad parcial. Sin embargo, las colonias femeninas podadas con 0-5% de mortalidad parcial (> 5-33% antes de la poda) vieron reducido su volumen gonadal por pólipo respecto a las colonias control > 5-33%. En cambio, en las colonias masculinas podadas con 0-5% de mortalidad parcial (> 5-33% antes de la poda), el volumen gonadal no fue distinto a las colonias control > 5-33% mortalidad parcial.

Siguiendo con las colonias podadas con > 5-33% de mortalidad parcial (> 33-66% antes de la poda). Las colonias femeninas podadas no mostraron diferencias significativas en cuanto al número de gónadas o el volumen gonadal respecto a las colonias control > 33-66%. Por lo tanto, la poda no tuvo efectos positivos en la producción gonadal. Si bien, es cierto, que el proceso de desarrollo del estudio fue en un periodo de tiempo muy limitado (mortalidad acaecida a finales de verano-otoño 2018, actuación de poda en enero 2019 y muestreo de reproducción a finales de mayo del 2019, unos 20 días antes del episodio de liberación de los espermatozoides a la columna de agua y la fecundación interna de las gónadas femeninas; Ribes et al., 2007). Este periodo de tiempo de ~ 5 meses podría ser demasiado breve para poder detectar el efecto beneficioso esperado de la actuación de poda. Por lo tanto, se requeriría del estudio del efecto de la actuación de poda en episodios de reproducción posteriores, al menos el episodio del segundo año después de la poda, para que se manifiesten los efectos conceptualmente beneficiosos de la actuación de poda a largo plazo.

Varios estudios anteriores, tanto de corales como de gorgonias, han estudiado la evolución temporal de los eventos de mortalidad en masa sobre la reproducción de las gorgonias y corales, y han observado cómo la producción gonadal puede verse afectada durante periodos prolongados en el tiempo, siendo la recuperación total al cabo de varios años después del evento. En Linares y colaboradores (2008b), los efectos en la inversión en reproducción de la gorgonia *P. clavata* aun estaban presentes en la segunda reproducción después del evento de

mortalidad parcial. También Michalek-Wagner y Willis, (2001a), mostraron cómo en la especie *Lobophytum compactum* la inversión en reproducción se vio afectada negativamente durante los siguientes 20 meses después del evento de blanqueamiento de coral. De igual forma, en la especie caribeña de coral *Orbicella* sp. la reducción en la reproducción se vio afectada durante los siguientes 4-5 años posteriores al evento de blanqueamiento observado en el 2005 (Levitan et al., 2014).

Por lo tanto, la técnica de poda no ha mostrado beneficios en la producción gonadal de la gorgonia *E. singularis* en el primer episodio de reproducción después del evento de mortalidad, aunque futuros estudios a largo plazo podrían mostrar beneficios en la recuperación de la producción gonadal de los siguientes años. Esta teoría, se basaría en que la poda ha permitido la supervivencia de la mayoría de las colonias, reduciendo la mortalidad parcial antes de la poda, por lo tanto, la redistribución de los recursos energéticos para afrontar la recuperación de los tejidos afectados por mortalidad parcial se vería reducida. Por consiguiente, la distribución de los recursos energéticos podría volver rápidamente al estado antes del evento de mortalidad en masa y favorecer una rápida recuperación de la inversión energética en reproducción.

En este sentido, es necesario el seguimiento de estas poblaciones durante los años posteriores a dicho evento de mortalidad en masa para poder demostrar los posibles efectos positivos en la conservación y mejora del estado reproductivo de gorgonias de la especie *E. singularis* mediante esta novedosa técnica de poda de las ramas apicales con mortalidad parcial. Si fuera así, sería importante validar esta técnica en otras especies de gorgonias que han sido afectadas por eventos de mortalidad en masa.

Dada la importancia crucial de la reproducción en la recuperación de las especies, debido a que la reproducción no solo asegura la necesaria descendencia para mantener las poblaciones, sino que además proporciona la recombinación genética para hacer frente al cambio climático (Airi et al., 2016, Ribes et al., 2007), es por lo que este trabajo pretende proponer el seguimiento del estado reproductivo y también del reclutamiento de nuevas colonias como herramienta para futuros planes de gestión de los bosques de gorgonias del Mediterráneo (Tsounis et al., 2006). De igual forma, es necesario remarcar la importancia de tener en cuenta la variabilidad espacial en las características biológicas de las especies para una mejor conservación.

Conclusiones

- El evento de mortalidad en masa del año 2018 afectó más gravemente la población de *Eunicella singularis* de Illa Pedrosa que a la población del Tascó Gros, tanto a nivel de la incidencia de mortalidad parcial como a nivel de la producción gonadal.
- La actuación de poda permitió reducir la mortalidad parcial de las colonias podadas en aproximadamente un 69% entre antes y después de la actuación de poda (T0-A y T0-D, respectivamente). Asimismo, permitió incrementar el porcentaje de colonias sanas en un 72%. Entre el seguimiento inicial (T0-D) y el realizado al cabo de un año (T1), las colonias podadas han aumentado en un 10% el porcentaje de mortalidad parcial. Aun así, los resultados muestran cómo al cabo de un año (T1), la actuación de poda ha logrado reducir en un 40% la mortalidad parcial con respecto a T0-A, mientras que las colonias control han permanecido con el mismo porcentaje de mortalidad entre T0 y T1. Es por ello por lo que la actuación de poda ha resultado beneficiosa.
- En cuanto a la producción gonadal (número de gónadas y volumen gonadal por pólipo) de *E. singularis* después del evento de mortalidad en masa del año 2018, se ha observado una reducción general en las colonias femeninas y masculinas con una mayor incidencia de mortalidad parcial (> 33-99%).
- La actuación de poda no ha logrado incrementar la producción gonadal de las colonias podadas (tanto femeninas como masculinas) de *E. singularis* de la población de Illa Pedrosa. Sin embargo, la redistribución de los recursos energéticos hacia la recuperación de las colonias puede conllevar largos periodos de tiempo, por lo cual se esperaría observar unos resultados más favorables en los próximos periodos reproductivos.
- El presente trabajo final de máster ha conseguido estudiar los efectos de un evento de mortalidad en masa en la supervivencia y en la producción gonadal de una de las especies de gorgonia más características del mar Mediterráneo. Además, se han evaluado los posibles beneficios de la novedosa técnica de poda de ramas muertas de las gorgonias como herramienta de gestión para mejorar su estado de conservación ante un episodio de mortalidad en masa.
- Como conclusión general, se podría decir que un evento de mortalidad en masa afecta gravemente las poblaciones de la gorgonia blanca *E. singularis*. Es por ello por lo que, a la luz de los resultados obtenidos, se requieren más estudios a largo plazo para observar la capacidad de recuperación de estas poblaciones de crecimiento lento, así como para evaluar si la actuación de poda es beneficiosa, o no, a nivel de la producción gonadal.

Agradecimientos

El autor agradece la colaboración del Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter, Departament de Territori i Sostenibilitat, Generalitat de Catalunya. El presente trabajo final de máster forma parte de los objetivos del proyecto “*PODAGORG. Conservación de los bosques de gorgonias frente al cambio climático: la poda de las ramas muertas como herramienta de gestión*”, que organiza la entidad sin ánimo de lucro BIOSFERA Associació d’Educació Ambiental; con el apoyo de la Fundación Biodiversidad, del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico; y con la colaboración del proyecto BECALM (RTI2018-094187-B-100, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Gobierno de España) del Centro de Estudios Avanzados de Blanes - Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CEAB-CSIC).

A nivel personal y, en primer lugar, me gustaría agradecer a la persona que confió en mí para este trabajo, Rafel Coma, mi tutor externo, que me dio esta gran oportunidad para empezar a desarrollarme en la investigación, algo que no olvidaré nunca. Además, el trato que me ha dispensado siempre, con su humanidad y talante, ha hecho que esta experiencia científica fuera un placer. Su capacidad para enseñarme y guiarme en este camino ha sido nada más y nada menos que espectacular. También me gustaría agradecer a Manel Bolivar, técnico de submarinismo del CEAB, su amistad, buen rollo y sus bromas. También me gustaría darle las gracias por “enseñarme” a bucear (los FEDAS molan), por sus enseñanzas en relación con la identificación de especies y sobre todo por las largas conversaciones llenas de risas. En segundo lugar, dar gracias a Eduard Serrano, primero por su ayuda en las revisiones de la memoria, segundo por ofrecerme poder obtener mi primer trabajo científico, un sueño de mi vida cumplido. También me gustaría agradecerle su trato tan cercano, su bondad y su confianza, ha sido un excelente mentor y jefe a la vez. Las historias vividas durante las campañas las recordaré como anécdotas de esas que te hacen sacar siempre una sonrisa. Durante el año y medio que he dedicado a la realización de este trabajo, he participado en todo el proceso del estudio de campo: la instalación de las parcelas de seguimiento de las gorgonias y su seguimiento periódico, así como el trabajo de laboratorio y el posterior análisis e interpretación de los resultados, muchas gracias por vuestro apoyo Rafel, Manel y Eduard. También me gustaría dar las gracias a gente con la que me he encontrado en el CEAB durante mi estancia. Personas con una humanidad fuera de lo normal, en este grupo destacan personas como Pol, Katerina y sobre todo Víctor, con el cual hemos establecido una gran amistad.

Por otra parte, me gustaría dar las gracias a todas esas personas que conocí en la Universidad de La Laguna y a las cuales sigo teniendo mucho aprecio. También, dar las gracias a mi tutora académica, Covadonga Rodríguez. Una persona a la que definiría como una de esas profesoras que, por su forma de ser, todo lo que te cuenta es un aprendizaje. Su ayuda y su preocupación por mí no me dejan más que darle las gracias. De igual forma, me gustaría dar las gracias a Sabrina Clemente, profesora del máster, por sus consejos, y el esfuerzo e interés en la revisión del presente trabajo.

Igualmente, me gustaría dar las gracias a la gente que me ha apoyado durante todo este trayecto. Amigos de todas partes que siempre están ahí, dándome el apoyo necesario para no decaer. Personas a las que tengo una confianza impresionante y que, sin ellas, me hubiese derrumbado a las primeras de cambio. En este gran grupo destacan: Alba, Judit, Marina P., Javi, Laia, Lluís, Marina S., Cristian, Judith, Joan y Jorge.

Por último, no por ello menos importante, más bien lo contrario, me gustaría agradecerle a mi familia todo su apoyo incondicional. A mis dos hermanos (Sergi y Mireia) y a mis padres que han sido fundamentales para seguir adelante en este gran proyecto.

¡Muchas gracias a todos por confiar en mí y darme vuestro apoyo incondicional!

Gerard Mas, en Torelló a 2 de julio de 2020.

Bibliografía

- Airi V, Gizzi F, Falini G, Levy O, Dubinsky Z, Goffredo S (2014). Reproductive efficiency of a Mediterranean endemic zooxanthellate coral decreases with increasing temperature along a wide latitudinal gradient. *PLoS One*, 9(3), e91792.
- Airi, V., Gizzi, F., Marchini, C., y Goffredo, S. 2016. Sexual reproduction of Mediterranean scleractinian corals. *The Cnidaria, Past, Present and Future* (pp. 269-278). Springer, Cham.
- Baker, A. C., Glynn, P. W., y Riegl, B. 2008. Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuarine, coastal and shelf science*, 80(4), 435-471.
- Ballesteros, E., y Karim, B. M. 2003. The coralligenous in the Mediterranean Sea. *RAC/SPA*, 87.
- Ballesteros, E. 2006. Mediterranean coralligenous assemblages: a synthesis of present knowledge. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 44, 123-195.
- Baird, A. H., y Marshall, P. A. 2002. Mortality, growth and reproduction in scleractinian corals following bleaching on the Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series*, 237, 133-141.
- Bavestrello, G., Bertone, S., Cattaneo-Vietti, R., Cerrano, C., Gaino, E., y Zanzi, D. 1994. Mass mortality of *Paramuricea clavata* (Anthozoa, Cnidaria) on Portofino Promontory cliffs, Ligurian Sea, Mediterranean Sea. *Mar. Life*, 4(1), 15-19.
- Beiring, E. A., y Lasker, H. R. 2000. Egg production by colonies of a gorgonian coral. *Marine Ecology Progress Series*, 196, 169-177.
- Bonhomme, D., Garrabou, J., Pérez, T., Sartoretto, S., y Harmelin, J. G. 2003. Impact and recovery from a mass mortality event of the gorgonian *Paramuricea clavata* populations on the French Mediterranean coasts. *In EGS-AGU-EUG Joint Assembly*.
- Calvo, E., Simó, R., Coma, R., Ribes, M., Pascual, J., Sabatés, A., ... y Pelejero, C. 2011. Effects of climate change on Mediterranean marine ecosystems: the case of the Catalan Sea. *Climate Research*, 50(1), 1-29.
- Cerrano, C., Arillo, A., Azzini, F., Calcinai, B., Castellano, L., Muti, C., ... y Bavestrello, G. 2005. Gorgonian population recovery after a mass mortality event. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 15(2), 147-157.
- Cerrano, C., y Bavestrello, G. 2008. Medium-term effects of die-off of rocky benthos in the Ligurian Sea. What can we learn from gorgonians? *Chemistry and Ecology*, 24(S1), 73-82.
- Cerrano, C., Bavestrello, G., Bianchi, C. N., Cattaneo-vietti, R., Bava, S., Morganti, C., ... y Siccardi, A. 2000. A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North-western Mediterranean), summer 1999. *Ecology letters*, 3(4), 284-293.
- Clemente, S., Rodríguez, A., Brito, A., Ramos, A., Monterroso, Ó., y Hernández, J. C. 2011. On the occurrence of the hydrocoral *Millepora* (Hydrozoa: Milleporidae) in the subtropical eastern Atlantic (Canary Islands): is the colonization related to climatic events? *Coral Reefs*, 30(1), 237-240.
- Cocito, S., Ferrier-Pagès, C., Cupido, R., Rottier, C., Meier-Augenstein, W., Kemp, H., ... y Peirano, A. 2013. Nutrient acquisition in four Mediterranean gorgonian species. *Marine Ecology Progress Series*, 473, 179-188.
- Coma, R., Linares, C., Ribes, M., Diaz, D., Garrabou, J., y Ballesteros, E. 2006. Consequences of a mass mortality in populations of *Eunicella singularis* (Cnidaria: Octocorallia) in Menorca (NW Mediterranean). *Marine Ecology Progress Series*, 327, 51-60.
- Coma, R., Llorente-Llurba, E., Serrano, E., Gili, J. M., y Ribes, M. 2015. Natural heterotrophic feeding by a temperate octocoral with symbiotic zooxanthellae: a contribution to understanding the mechanisms of die-off events. *Coral Reefs*, 34(2), 549-560.
- Coma, R., Pola, E., Ribes, M., y Zabala, M. 2004. Long-term assessment of temperate octocoral mortality patterns, protected vs. unprotected areas. *Ecological Applications*, 14(5), 1466-1478.
- Coma, R., y Ribes, M. 2003. Seasonal energetic constraints in Mediterranean benthic suspension feeders: effects at different levels of ecological organization. *Oikos*, 101(1), 205-215.

- Coma, R., Ribes, M., Serrano, E., Jiménez, E., Salat, J., y Pascual, J. 2009. Global warming-enhanced stratification and mass mortality events in the Mediterranean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(15), 6176-6181.
- Coma, R., Ribes, M., Gili, J. M., y Zabala, M. 1998a. An energetic approach to the study of life-history traits of two modular colonial benthic invertebrates. *Marine Ecology Progress Series*, 162, 89-103.
- Coma, R., Ribes, M., Gili, J. M., y Zabala, M. 2000. Seasonality in coastal benthic ecosystems. *Trends in ecology & evolution*, 15(11), 448-453.
- Coma, R., Ribes, M., Zabala, M., y Gili, J. M. 1995a. Reproduction and cycle of gonadal development in the Mediterranean gorgonian *Paramuricea clavata*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 117, 173-183.
- Coma, R., Ribes, M., Zabala, M., y Gili, J. M. 1998b. Growth in a modular colonial marine invertebrate. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47(4), 459-470.
- Coma, R., Serrano, E., Linares, C., Zabala, M., y Ribes, M. 2012. Effect of a severe storm event on the mortality rate of the gorgonian *Paramuricea clavata* on the Medes Islands Marine Reserve and the nearby Montgrí coast. Assessment of the ecological impact of the extreme storm of Sant Esteve's Day (26 December 2008) on the littoral ecosystems of the north Mediterranean Spanish coasts: *Centre d'Estudis Avançats de Blanes, Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, 67-78.
- Coma, R., Zabala, M., y Gili, J. M. 1995. Sexual reproductive effort in the Mediterranean gorgonian *Paramuricea clavata*. *Marine Ecology Progress Series*, 185-192.
- Cox, E. F. 2007. Continuation of sexual reproduction in *Montipora capitata* following bleaching. *Coral Reefs*, 26(3), 721-724.
- Cupido, R., Cocito, S., Barsanti, M., Sgorbini, S., Peirano, A., y Santangelo, G. 2009. Unexpected long-term population dynamics in a canopy-forming gorgonian coral following mass mortality. *Marine Ecology Progress Series*, 394, 195-200.
- Cupido, R., Cocito, S., Manno, V., Ferrando, S., Peirano, A., Iannelli, M., ... y Santangelo, G. 2012. Sexual structure of a highly reproductive, recovering gorgonian population: quantifying reproductive output. *Marine Ecology Progress Series*, 469, 25-36.
- Cupido, R., Cocito, S., Sgorbini, S., Bordone, A., y Santangelo, G. 2008. Response of a gorgonian (*Paramuricea clavata*) population to mortality events: recovery or loss? *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(6), 984-992.
- De la Linde-Rubio, A., Tierno de Figueroa, J. M., López-Rodríguez, M. J., y Sánchez-Tocino, L. 2018. Mass mortality of *Eunicella singularis* (Anthozoa: Octocorallia) in the Chafarinas Islands (North Africa, Western Mediterranean Sea). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 53(2), 285-290.
- Dube, D., Kim, K., Alker, A. P., y Harvell, C. D. 2002. Size structure and geographic variation in chemical resistance of sea fan corals *Gorgonia ventalina* to a fungal pathogen. *Marine Ecology Progress Series*, 231, 139-150.
- Ezzat, L., Merle, P. L., Furla, P., Buttler, A., y Ferrier-Pages, C. 2013. The response of the Mediterranean gorgonian *Eunicella singularis* to thermal stress is independent of its nutritional regime. *PLoS One*, 8(5). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 53(2), 285-290.
- Ferrier-Pagès, C., Tambutté, E., Zamoum, T., Segonds, N., Merle, P. L., Bensoussan, N., ... y Tambutté, S. 2009. Physiological response of the symbiotic gorgonian *Eunicella singularis* to a long-term temperature increase. *Journal of Experimental Biology*, 212(18), 3007-3015.
- Fisch, J., Drury, C., Towle, E. K., Winter, R. N., y Miller, M. W. 2019. Physiological and reproductive repercussions of consecutive summer bleaching events of the threatened Caribbean coral *Orbicella faveolata*. *Coral Reefs*, 38(4), 863-876.
- Gambi, M.C. y Barbier, F. 2012. Population structure of the gorgonian *Eunicella cavolinii* in the "Grotta Azzurra" cave off Palinuro, after the mass mortality event in 2008. *Biol. Mar. Mediterr.*, 19(1), 174-175.
- Garrabou, J., Coma, R., Bensoussan, N., Bally, M., Chevaldonné, P., Cigliano, M., ... y Ledoux, J. B. 2009. Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave. *Global change biology*, 15(5), 1090-1103.

- Gili, J. M., y Coma, R. 1998. Benthic suspension feeders: their paramount role in littoral marine food webs. *Trends in ecology & evolution*, 13(8), 316-321.
- Girard, D., Clemente, S., Toledo-Guedes, K., Brito, A., y Hernández, J. C. 2012. A mass mortality of subtropical intertidal populations of the sea urchin *Paracentrotus lividus*: analysis of potential links with environmental conditions. *Marine Ecology*, 33(3), 377-385.
- Gori, A., Bramanti, L., López-González, P., Thoma, J. N., Gili, J. M., Grinyó, J., ... y Rossi, S. 2012a. Characterization of the zooxanthellate and azooxanthellate morphotypes of the Mediterranean gorgonian *Eunicella singularis*. *Marine biology*, 159(7), 1485-1496.
- Gori, A., Linares, C., Rossi, S., Coma, R., y Gili, J. M. 2007. Spatial variability in reproductive cycle of the gorgonians *Paramuricea clavata* and *Eunicella singularis* (Anthozoa, Octocorallia) in the Western Mediterranean Sea. *Marine Biology*, 151(4), 1571-1584.
- Gori, A., Rossi, S., Berganzo, E., Pretus, J. L., Dale, M. R., y Gili, J. M. 2011a. Spatial distribution patterns of the gorgonians *Eunicella singularis*, *Paramuricea clavata*, and *Leptogorgia sarmentosa* (Cape of Creus, Northwestern Mediterranean Sea). *Marine biology*, 158(1), 143-158.
- Gori, A., Rossi, S., Linares, C., Berganzo, E., Orejas, C., Dale, M. R., y Gili, J. M. 2011b. Size and spatial structure in deep versus shallow populations of the Mediterranean gorgonian *Eunicella singularis* (Cap de Creus, northwestern Mediterranean Sea). *Marine biology*, 158(8), 1721-1732. B
- Gori, A., Viladrich, N., Gili, J. M., Kotta, M., Cucio, C., Magni, L., ... y Rossi, S. 2012b. Reproductive cycle and trophic ecology in deep versus shallow populations of the Mediterranean gorgonian *Eunicella singularis* (Cap de Creus, northwestern Mediterranean Sea). *Coral Reefs*, 31(3), 823-837.
- Guidetti, P., Terlizzi, A., y Boero, F. 2004. Effects of the edible sea urchin, *Paracentrotus lividus*, fishery along the Apulian rocky coast (SE Italy, Mediterranean Sea). *Fisheries Research*, 66(2-3), 287-297.
- Hagedorn, M., Carter, V. L., Lager, C., Ciani, J. F. C., Dygert, A. N., Schleiger, R. D., y Henley, E. M. 2016. Potential bleaching effects on coral reproduction. *Reproduction, Fertility and Development*, 28(8), 1061-1071.
- Harmelin, J. G., y Marinopoulos, J. 1994. Population structure and partial mortality of the gorgonian *Paramuricea clavata* (Risso) in the north-western Mediterranean (France, Port-Cros Island). *Marine life*, 4(1), 5-13.
- Henry, L. A., y Hart, M. 2005. Regeneration from injury and resource allocation in sponges and corals—a review. *International Review of Hydrobiology: A Journal Covering all Aspects of Limnology and Marine Biology*, 90(2), 125-158.
- Hereu Fina, B., Aspillaga Cuevas, E., Boada García, J., Capdevila Lanzaco, P., Linares Prats, C., Medrano Cuevas, A., ... y Sostenibilitat, C. D. D. T. 2018. Seguiment del medi marí al Parc Natural de Cap de Creus i al Parc Natural del Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter. *Memòria 2018*.
- Huete-Stauffer, C., Vielmini, I., Palma, M., Navone, A., Panzalis, P., Vezzulli, L., ... y Cerrano, C. 2011. *Paramuricea clavata* (Anthozoa, Octocorallia) loss in the Marine Protected Area of Tavolara (Sardinia, Italy) due to a mass mortality event. *Marine Ecology*, 32, 107-116.
- IPCC. 2007 Climate change 2007: the physical science basis. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al., (eds.) Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press
- Kersting, D. K., Bensoussan, N., y Linares, C. 2013. Long-term responses of the endemic reef-builder *Cladocora caespitosa* to Mediterranean warming. *PLoS One*, 8(8).
- Lasker, H. R., Brazeau, D. A., Calderon, J., Coffroth, M. A., Coma, R., y Kim, K. 1996. In situ rates of fertilization among broadcast spawning gorgonian corals. *The Biological Bulletin*, 190(1), 45-55.
- Levitán, D. R., Boudreau, W., Jara, J., y Knowlton, N. 2014. Long-term reduced spawning in *Orbicella* coral species due to temperature stress. *Marine Ecology Progress Series*, 515, 1-10.
- Linares, C., Coma, R., Diaz, D., Zabala, M., Hereu, B., y Dantart, L. 2005. Immediate and delayed effects of a mass mortality event on gorgonian population dynamics and benthic community structure in the NW Mediterranean Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 305, 127-137.

- Linares, C., Coma, R., Garrabou, J., Díaz, D., y Zabala, M. 2008a. Size distribution, density and disturbance in two Mediterranean gorgonians: *Paramuricea clavata* and *Eunicella singularis*. *Journal of Applied Ecology*, 45(2), 688-699.
- Linares, C., y Doak, D. F. 2010. Forecasting the combined effects of disparate disturbances on the persistence of long-lived gorgonians: a case study of *Paramuricea clavata*. *Marine Ecology Progress Series*, 402, 59-68.
- Linares, C., Doak, D. F., Coma, R., Díaz, D., y Zabala, M. 2007. Life history and viability of a long-lived marine invertebrate: The octocoral *Paramuricea clavata*. *Ecology*, 88(4), 918-928.
- Linares, C., Coma, R., y Zabala, M. 2008b. Effects of a mass mortality event on gorgonian reproduction. *Coral reefs*, 27(1), 27-34.
- Linares, C., Zabala, M., Garrabou, J., Coma, R., Díaz, D., Hereu, B., y Dantart, L. 2010. Assessing the impact of diving in coralligenous communities: the usefulness of demographic studies of red gorgonian populations. *Sci Rep Port-Cros Natl Park*, 24, 161-184.
- Loya, Y., Sakai, K., Yamazato, K., Nakano, Y., Sambali, H., y Van Woesik, R. 2001. Coral bleaching: the winners and the losers. *Ecology letters*, 4(2), 122-131.
- Michalek-Wagner, K., y Willis, B. L. 2001a. Impacts of bleaching on the soft coral *Lobophytum compactum*. I. Fecundity, fertilization and offspring viability. *Coral Reefs*, 19(3), 231-239.
- Michalek-Wagner, K., y Willis, B. L. 2001b. Impacts of bleaching on the soft coral *Lobophytum compactum*. II. Biochemical changes in adults and their eggs. *Coral Reefs*, 19(3), 240-246.
- Perez, T., Garrabou, J., Sartoretto, S., Harmelin, J. G., Francour, P., y Vacelet, J. 2000. Massive mortality of marine invertebrates: an unprecedented event in northwestern Mediterranean. *Comptes rendus de l'Academie des sciences. Serie III, Sciences de la vie*, 323(10), 853-865.
- Pey, A., Zamoum, T., Allemand, D., Furla, P., y Merle, P. L. 2011. Depth-dependant thermotolerance of the symbiotic Mediterranean gorgonian *Eunicella singularis*: evidence from cellular stress markers. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 404(1-2), 73-78.
- Pilczynska, J., Cocito, S., Boavida, J., Serrão, E., y Queiroga, H. 2016. Genetic diversity and local connectivity in the mediterranean red gorgonian coral after mass mortality events. *PloS one*, 11(3).
- Ponti, M., Grech, D., Mori, M., Perlini, R. A., Ventra, V., Panzalis, P. A., y Cerrano, C. 2016. The role of gorgonians on the diversity of vagile benthic fauna in Mediterranean rocky habitats. *Marine biology*, 163(5), 120.
- Previati, M., Scinto, A., Cerrano, C., y Osinga, R. 2010. Oxygen consumption in Mediterranean octocorals under different temperatures. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 390(1), 39-48.
- Randall, C. J., y Szmant, A. M. 2009. Elevated temperature reduces survivorship and settlement of the larvae of the Caribbean scleractinian coral, *Favia fragum* (Esper). *Coral Reefs*, 28(2), 537-545.
- Ribes, M., Coma, R., y Gili, J. M. 1999. Heterogeneous feeding in benthic suspension feeders: the natural diet and grazing rate of the temperate gorgonian *Paramuricea clavata* (Cnidaria: Octocorallia) over a year cycle. *Marine Ecology Progress Series*, 183, 125-137.
- Ribes, M., Coma, R., Rossi, S., y Micheli, M. 2007. Cycle of gonadal development in *Eunicella singularis* (Cnidaria: Octocorallia): trends in sexual reproduction in gorgonians. *Invertebrate Biology*, 126(4), 307-317.
- Rivetti, I., Frascchetti, S., Lionello, P., Zambianchi, E., y Boero, F. 2014. Global warming and mass mortalities of benthic invertebrates in the Mediterranean Sea. *PloS one*, 9(12).
- Rossi, S., Gili, J. M., Coma, R., Linares, C., Gori, A., y Vert, N. 2006. Temporal variation in protein, carbohydrate, and lipid concentrations in *Paramuricea clavata* (Anthozoa, Octocorallia): evidence for summer–autumn feeding constraints. *Marine Biology*, 149(3), 643-651.
- Rubio-Portillo, E., Izquierdo-Muñoz, A., Gago, J. F., Rosselló-Mora, R., Antón, J., y Ramos-Esplá, A. A. 2016. Effects of the 2015 heat wave on benthic invertebrates in the Tabarca Marine Protected Area (southeast Spain). *Marine environmental research*, 122, 135-142.

- Sangil, C., Sansón, M., Afonso-Carrillo, J., Herrera, R., Rodríguez, A., Martín-García, L., y Díaz-Villa, T. 2012. Changes in subtidal assemblages in a scenario of warming: proliferations of ephemeral benthic algae in the Canary Islands (eastern Atlantic Ocean). *Marine environmental research*, 77, 120-128.
- Sanchez-Tocino, L., De La Linde, A., Lizana, M. S., Pérez, T., Tierno de Figueroa, J. M. 2017. Pruning treatment: A possible method for improving the conservation status of *Ellisella paraplexauroides* Stiasny, 1936 (Anthozoa, Alcyonacea) population in the Chafarinas Islands? *Mediterranean Marine Science*, 18(3), 479-485.
- Serrano, E., Coma, R., Ribes, M., Weitzmann, B., García, M., y Ballesteros, E. 2013. Rapid northward spread of a zooxanthellate coral enhanced by artificial structures and sea warming in the western Mediterranean. *PLoS One*, 8(1), e52739.
- Serrano E, Mas G, Bolivar M, Coma R. 2019. Seguimiento de las poblaciones de la gorgonia roja (*Paramuricea clavata*) y de la gorgonia blanca (*Eunicella singularis*) en el Parc Natural de El Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter, *Memoria 2019. BIOSFERA Associació d'Educació Ambiental. Fundació Biodiversidad - Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Centro de Estudios Avanzados de Blanes - Consejo Superior de Investigaciones Científicas*. 24 pp.
- Szmant, A., y Gassman, N. J. 1990. The effects of prolonged “bleaching” on the tissue biomass and reproduction of the reef coral *Montastrea annularis*. *Coral reefs*, 8(4), 217-224.
- Tsounis, G., Rossi, S., Aranguren, M., Gili, J. M., y Arntz, W. 2006. Effects of spatial variability and colony size on the reproductive output and gonadal development cycle of the Mediterranean red coral (*Corallium rubrum* L.). *Marine Biology*, 148(3), 513-527.
- Turicchia, E., Abbiati, M., Sweet, M., y Ponti, M. 2018. Mass mortality hits gorgonian forests at Montecristo Island. *Diseases of aquatic organisms*, 131(1), 79-85.
- Van de Water, J. A., Voolstra, C. R., Rottier, C., Cocito, S., Peirano, A., Allemand, D., y Ferrier-Pagès, C. 2018. Seasonal stability in the microbiomes of temperate gorgonians and the red coral *Corallium rubrum* across the Mediterranean Sea. *Microbial ecology*, 75(1), 274-288.
- Verdura, J., Linares, C., Ballesteros, E., Coma, R., Uriz, M. J., Bensoussan, N., y Cebrian, E. 2019. Biodiversity loss in a Mediterranean ecosystem due to an extreme warming event unveil the role of an engineering gorgonian species. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, p. art. 5911.
- Viladrich, N., Gori, A., y Gili, J. M. 2018. Fast growth rate in a young colony of the Mediterranean gorgonian *Eunicella singularis*. *Marine Biodiversity*, 48(2), 951-952.
- Ward, S., Harrison, P., y Hoegh-Guldberg, O. 2002. Coral bleaching reduces reproduction of scleractinian corals and increases susceptibility to future stress. In *Proceedings of the Ninth International Coral Reef Symposium, Bali, 23-27 October 2000*, (Vol. 2, pp. 1123-1128).
- Weinbauer, M. G., y Velimirov, B. 1995. Biomass and secondary production of the temperate gorgonian coral *Eunicella cavolini* (Coelenterata: Octocorallia). *Marine Ecology Progress Series*, 121, 211-216.
- Weinberg, S. 1979. The light-dependent behaviour of planula larvae of *Eunicella singularis* and *Corallium rubrum* and its implication for octocorallian ecology. *Bijdragen tot de Dierkunde*, 49(1), 16-30.
- Weinberg, S., y Weinberg, F. 1979. The life cycle of a gorgonian: *Eunicella singularis* (Esper, 1794). *Bijdragen tot de Dierkunde*, 48(2), 127-140.