

Edad y tasas de crecimiento en gorgonias  
(Cnidaria, Anthozoa, Octocorallia,  
Alcyonacea) del Océano Sur

---

Age and growth rates in Southern Ocean  
gorgonians (Cnidaria, Anthozoa,  
Octocorallia, Alcyonacea)

**Lucía Jiménez Álvarez**

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
Máster en Biología Marina: Biodiversidad y  
Conservación  
Universidad de La Laguna  
Septiembre 2021

## ÍNDICE

### RESUMEN

### ABSTRACT

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 Objetivo general</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>7</b>
<b>3. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	<b>7</b>
<b>3.1 Área de estudio</b> .....	<b>7</b>
<b>3.2 Materiales estudiados</b> .....	<b>7</b>
<b>3.3 Metodología</b> .....	<b>8</b>
<b>3.3.1 Conteo de anillos de crecimientos basales</b> .....	<b>9</b>
<b>3.3.2 Tasa de crecimiento axial y radial</b> .....	<b>10</b>
<b>3.3.3 Análisis radiométricos</b> .....	<b>11</b>
<b>3.3.3.1 Isótopo <sup>14</sup>C</b> .....	<b>12</b>
<b>3.3.3.2 Isótopo <sup>210</sup>Pb</b> .....	<b>13</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>19</b>
<b>4.1 Longitud de gorgonias y anillos basales</b> .....	<b>19</b>
<b>4.2 Tasa de crecimiento axial y radial</b> .....	<b>21</b>
<b>4.4 Análisis con isótopo <sup>14</sup>C</b> .....	<b>24</b>
<b>4.5 Análisis con Isótopos <sup>210</sup>Pb, <sup>238</sup>U y <sup>230</sup>Th</b> .....	<b>27</b>
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	<b>32</b>
<b>6. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>33</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>34</b>
<b>8. APÉNDICE</b> .....	<b>37</b>

## RESUMEN

Las prístinas aguas del océano austral albergan una extraordinaria variedad de organismos. La sorprendente longevidad es la característica principal de estos organismos. Sin embargo, las gorgonias son componentes claves en este ambiente antártico, y aun se sabe muy poco sobre la historia de su vida (ecología). En este estudio, se han estudiado cuatro colonias de dos especies diferentes, *Armadillologorgia cyathella* y *Aglaoprimnoa stefanii*, con el objetivo de saber un poco más sobre sus tasas de crecimiento y sus edades estimadas. Los radioisótopos utilizados en este estudio,  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{14}\text{C}$ , junto con el conteo de anillos de crecimiento nos han aportado diferente información sobre la edad de las gorgonias. La tasa de crecimiento axial recogida ha sido muy baja, ocurriendo lo contrario con la tasa de crecimiento radial. Se han observado irregularidades en los anillos de crecimiento, lo que indica diversas fluctuaciones ambientales en el ambiente antártico.

**Palabras claves:** *Aglaoprimnoa stefanii*, anillos de crecimiento, *Armadillologorgia cyathella*, edad estimada, gorgonias, longevidad, tasa de crecimiento, Océano Austral, radioisótopos.

## ABSTRACT

The pristine waters of the Southern Ocean are home to an extraordinary variety of organisms. The surprising longevity is the main characteristic of these organisms. However, gorgonians are key components in this Antarctic environment, and very little is yet known about their life history (ecology). In this study, four colonies of two different species had been studied, *Armadillologorgia cyathella* and *Aglaoprimnoa stefanii*, with the aim of knowing a little more about their growth rates and their estimated ages. The radioisotopes used in this study,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{14}\text{C}$ , together with the growth ring count, have provided us with different information on the age of the gorgonians. The collected axial growth rate has been very low, the opposite occurring with the radial growth rate. Growth ring irregularities have been observed, indicating various environmental fluctuations in the Antarctic environment.

**Keywords:** *Aglaoprimnoa stefanii*, *Armadillologorgia cyathella*, estimated age, gorgonians, growth rate, growth rings, longevity, radioisotopes, Southern Ocean.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Océano Sur comprende todas aquellas aguas limitadas al norte por la Convergencia Antártica (Aguilera y Larraín, 2018). La corriente impulsada principalmente por el viento que fluye alrededor de la península Antártica es la conocida Corriente Circumpolar Antártica. Esta corriente conecta las cuencas de los océanos Pacífico, Atlántico e Índico (Smith *et al.*, 2010). Por el sur, está limitado por el continente antártico. El área total del océano Austral comprende casi 34.8 millones de km<sup>2</sup>. Más del 50% de esta área se encuentra cubierto por hielo durante el invierno (Zapata Guardiola, 2014).

El ecosistema bentónico antártico se caracteriza por la presencia de comunidades muy diversas, compuestas por numerosas especies de esponjas, anémonas, ascidias, cnidarios, briozoos, poliquetos y equinodermos (Brandt *et al.*, 2007) convirtiendo al Océano Sur en una de las áreas más diversas del planeta Tierra. Por ejemplo, se han descrito más de 4000 especies de macroinvertebrados bentónicos en aguas Antárticas (Clarke, 2008). Sin embargo, algunas regiones de la antártica, como sus ambientes bentónicos profundos, aún no han sido bien explorados.

La alta biomasa bentónica del Océano Sur no sólo es consecuencia directa de las elevadas condiciones productivas presentes en la zona eufótica, sino más bien es el resultado de una combinación con varios factores como crecimiento lento, retardada madurez sexual, longevidad de la fauna y baja presión de depredación (Arntz *et al.*, 1992). Los ritmos de crecimiento lentos junto a los largos ciclos de vida de estos invertebrados antárticos les ha permitido crear comunidades maduras y altamente estructuradas (Martinez Dios *et al.*, 2016).

Diversos estudios ecológicos antárticos describieron las características generales del bentos: distribución irregular, predominio organismos suspensívoros, alta biodiversidad y biomasa, gigantismo, adaptación a bajas temperaturas y baja actividad metabólica (Gutt, 1991; Gutt y Piepenburg, 1991; Orejas *et al.*, 2001; Thatje *et al.*, 2005; Rogers, 2012; Peck *et al.*, 2014).

Uno de los componentes principales, en abundancia, diversidad y biomasa de las comunidades bentónicas del Océano Austral son los octocorales, siendo la familia

Primnoidae la más característica (Gili, 1998), ya que un estudio reciente ha reportado que la región Antártica es un punto clave para esta familia (Ambroso *et al.*, 2017).

La familia Primnoidae es una de las cinco familias de gorgonias que constituyen el suborden Calcaxonia (Cairns y Bayer, 2009).

Las gorgonias (Cnidaria: Anthozoa: Octocorallia: Primnoidae) son organismos que estabilizan el sustrato y además proporcionan hábitats para el asentamiento de otras especies, por la complejidad de sus estructuras tridimensionales (Arntz *et al.*, 1994). Las gorgonias son organismos modulares, como los octocorales en general, y crecen a través de la replicación repetida de módulos individuales para formar colonias (Martinez Dios *et al.* 2016). Otra característica frecuente en gorgonias es su reproducción sexual mediante la incubación y desarrollo de la larva lecitotrófica (no planctótrofa) en el interior del pólipo de la colonia hembra, hasta que es expulsada al medio (Orejas *et al.*, 2007). Las gorgonias muestran una distribución cosmopolita y se encuentran principalmente en aguas profundas (Cairns, 2012), pero se sugiere que su distribución es a parches, debido a que son suspensívoros, es decir, se alimentan de partículas (de distinto y variable tamaño) que caen al fondo. Esta disponibilidad de alimento está ligada a la dinámica del flujo del agua, y consecuentemente la distribución de las gorgonias (Rosenberg, 1995).

Especies de gorgonias de aguas profundas como *Paragorgia arborea* (Linnaeus, 1758) ubicadas en el Océano Sur, han sido estudiadas para la estimación de sus edades y tasas de crecimiento (Sherwood y Edinger, 2009). Concluyendo que las estimaciones de edad correspondientes de estas muestras alcanzan hasta 700 años y las tasas de crecimiento son muy lentas (Grigg, 1976; Risk *et al.*, 2002; Andrews *et al.*, 2002; Sherwood *et al.*, 2006; Sherwood y Edinger, 2009). Colonias pertenecientes al género *Thouarella* y al género *Fannyella* han sido estudiadas recientemente para estimar su edad, obteniendo como resultado una antigüedad de entre 650 y 1100 años (Martinez Dios *et al.*, 2016) concluyendo la alta longevidad y las tasas de crecimiento más lentas jamás registradas en gorgonias antárticas. Estas características se pueden considerar consecuencias de las condiciones ambientales antárticas.

Pero ha sido la taxonomía de estos octocorales la que ha recibido la principal atención (Cairns, 2012; Arntz, 1997). Con lo cual, actualmente hay un importante vacío de conocimiento sobre su biología básica (tasas de crecimiento, longevidad...) (Martínez Dios, 2014), incluida su ecología trófica (Elias-Piera *et al.*, 2012).

Las gorgonias son uno de los grupos menos estudiados de la fauna bentónica antártica, a pesar de pertenecer a la familia de gorgonias con mayor número de especies del Océano Sur (Martinez Dios *et al.*, 2016).

Según sugiere Figueroa (2014), estos organismos se enfrentan a amenazas que ponen en riesgo su éxito ecológico. Pueden sufrir amenazas por acciones directas como la pesca de arrastre y la contaminación; o de forma indirecta, así como amenazas por el cambio climático (acidificación del océano y aumento de la temperatura) (Figueroa, 2014). Además, estas comunidades son esenciales para el buen y correcto funcionamiento del ambiente marino, e incluso para poder recuperar la fauna perdida por consecuencias de la explotación comercial (Gili *et al.*, 2011). De ahí, la necesidad de conocer su biología para poder sustentar la conservación de estos animales.

Hasta la actualidad, según Juárez-de la Rosa (2002), la estimación de la edad, tasa de crecimiento y mortalidad tanto en organismos terrestres como en marinos, se ha realizado mediante la observación directa de las estructuras rígidas en sus esqueletos. El término anillo se encuentra generalizado en la literatura científica, pudiéndose hablar de marcas o bandas para la misma referencia, anillos de crecimiento (Juárez-de la Rosa, 2002). Estas bandas proporcionan información del crecimiento del organismo además de servir como fuente de información ambiental del hábitat donde se encuentran (Barnes y Lough, 1993). Los anillos de crecimiento de los corales siempre han sido descritos como análogos a los anillos de crecimiento de los árboles. En el caso de los corales, ha concluido que la periodicidad de la formación de sus bandas es anual (Grigg, 1974) y puede estar influenciada por la actividad reproductiva (Juárez-de la Rosa, 2002). Las bandas de los esqueletos constan de un pareado, una banda clara ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ , carbonato cálcico) y una oscura (proteína) que son depositadas de forma concéntrica (Sherwood *et al.*, 2005), rodeando un eje central. La periodicidad anual de estas bandas ha sido reportada por varios autores (Grigg 1974; Sherwood *et al.*, 2005; Sherwood y Edinger, 2009) en distintas especies de corales. La reiterada evidencia de la anualidad de los anillos impulsa esta herramienta como una forma útil de estimar la edad y patrones de crecimiento de los corales (gorgonias). En cambio, se han observado diferencias entre especies con esta estimación, con lo cual no es aplicable para todas las especies (Sherwood y Edinger, 2009). A esto se suma, la difícil observación de las bandas de crecimiento, ya que los anillos pueden aparecer con irregularidades (Andrews *et al.*, 2002).

Actualmente, la estimación en la datación de organismos extintos se lleva a cabo, entre otros métodos, mediante técnicas radioisotópicas. El uso de diferentes radioisótopos permite realizar la datación de muestras biológicas y geológicas con un cierto grado de precisión (Juárez-de la Rosa, 2002).

Por ejemplo, estudios más recientes han demostrado que la longevidad de algunas especies modernas encontradas en el Océano Sur (por ejemplo, *Primnoa resedaeformis*) puede ser estimada mediante el uso de técnicas radioisotópicas (Sherwood y Edinger, 2009). Los trazadores isotópicos que se usan en este tipo de estudios son el  $^{14}\text{C}$  y el  $^{210}\text{Pb}$ , ya que ambos isótopos se incorporan a la matriz esquelética del organismo a partir de sus estadios ontogenéticos más tempranos (Andrews *et al.*, 2002). Además, el isótopo  $^{14}\text{C}$  se utiliza para datar el contenido orgánico de los organismos (gorgonina en nuestro caso), para evitar cualquier tipo de contaminación por carbonatos (Pérez, 2009).

El  $^{14}\text{C}$  es un isótopo radiactivo natural del elemento del carbono (Francisco *et al.*, 2011). Este isótopo se forma en las capas superiores de la atmósfera cuando los neutrones presentes en los rayos cósmicos chocan con el isótopo  $^{14}\text{N}$ , dando lugar al  $^{14}\text{C}$  (Kotz *et al.*, 2014). Los isótopos que se crean de esta manera se denominan isótopos cosmogénicos. Este, al reaccionar con el oxígeno del aire forma dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que difunde en la atmósfera inferior y entra en la biosfera, donde se encuentra distribuye en equilibrio (Arévalo *et al.*, 2015) a través de la respiración vegetal principalmente. Así pasa a formar parte del llamado ciclo del carbono, que hace que circule por el mundo, a través de la atmósfera, los océanos y la biosfera. Posteriormente, mediante las redes tróficas llega hasta organismos superiores, incluido el hombre (Elices, 1995). Una vez el organismo muere, deja de incorporar compuestos carbonatados. La consecuencia de este suceso es que el  $^{14}\text{C}$  ya no se reemplaza, sino que comienza a desintegrarse y comienza a disminuir su concentración. Se denomina período de semidesintegración al tiempo que se necesita para que un número de átomos se reduzca a la mitad. El período de semidesintegración del  $^{14}\text{C}$  (Elices, 1995), o vida media (Francisco *et al.*, 2011) es de 5730 años. De esta forma, midiendo la concentración de  $^{14}\text{C}$  podemos saber cuánto tiempo hace que el animal murió, o lo que es lo mismo, dejó de incorporar  $^{14}\text{C}$  a su cuerpo (Arévalo *et al.*, 2015). Se estima que cada año se producen 7,5 kg de  $^{14}\text{C}$  a partir de la radiación cósmica (Farias, 2002).

No todos los organismos incorporamos el  $^{14}\text{C}$  de forma proporcional de la atmósfera. En el caso de las plantas, la fotosíntesis, favorece el isótopo más ligero ( $^{12}\text{C}$ ),

por lo que, los vegetales se empobrecen de  $^{14}\text{C}$  (Arévalo *et al.*, 2015). En cambio, en el medio marino, al no haber un equilibrio con la atmósfera, el  $^{14}\text{C}$  se encuentra en disolución en el agua del mar, por tanto, se favorece más el isótopo más pesado, que es el  $^{13}\text{C}$ . Por lo tanto, el mar se enriquece de  $^{14}\text{C}$  (López *et al.*, 2015). Producto de ello, es la necesidad de crear una igualdad para todas las matrices. Es preciso hacer una corrección para que distintos materiales de un mismo entorno coetáneos con distinta concentración de  $^{14}\text{C}$  tengan la misma. Para ello se normalizan los resultados obtenidos con la referencia  $\delta^{13}\text{C} = -25 \text{ ‰}$  que es el valor correspondiente a la madera. La idea de esta normalización es calcular la edad que mostraría una madera coetánea al material que se ha analizado.

De esta manera obtenemos los datos de las edades BP (edades ficticias, necesarias fundamentalmente porque la concentración de  $^{14}\text{C}$  en la atmósfera no ha sido constante), según los convenios:

- Se utiliza la semivida de Libby (5568 años)
- Las muestras están normalizadas  $\delta^{13}\text{C} = -25 \text{ ‰}$ .
- Se asume un valor constante de  $^{14}\text{C}$  en la atmósfera
- Se utiliza el ácido oxálico (I o II) como patrón.
- El año 1950 se convierte en el año de referencia.

Una vez obtenidas las edades BP, la calibración la convierte en una edad cronológica real, usando la curva de calibración para el medio marino (Marine20) (Heaton *et al.*, 2020). Esta curva se construye con muestras de edad cronológica conocida, a las que se le ha calculado la edad BP. Con lo cual, a una edad cronológica, sólo le corresponde una edad BP, pero a una edad BP, le puede corresponder varias edades cronológicas. Es importante tener en cuenta que la calibración no da una fecha exacta, solo proporciona unos rangos de fecha (López *et al.*, 2015).

Otro radioisótopo usado para la estimación de antigüedad de organismos marinos es el  $^{210}\text{Pb}$ . El  $^{210}\text{Pb}$  tiene dos orígenes, o bien proviene de la desintegración del  $^{226}\text{Ra}$  en la columna de agua o de la desintegración de  $^{222}\text{Rn}$  en la atmósfera (Raygoza *et al.*, 2014). El  $^{210}\text{Pb}$  atmosférico se deposita rápidamente en la superficie del océano (Druffel *et al.*, 1990).

Es desconocida la distribución de los isótopos  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{210}\text{Pb}$  en las fases del esqueleto del coral. Sin embargo, hay evidencias de que estos iones con carga positiva

(cationes) se encuentran dentro del carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), al igual que la materia orgánica y detrítica que se incorpora dentro del esqueleto (Druffel *et al.*, 1990).

El  $^{210}\text{Pb}$  es un radionúclido de origen natural perteneciente a la cadena radiactiva del  $^{238}\text{U}$  (figura 9) (Appleby *et al.*, 1986). Su periodo de semidesintegración es de  $T_{1/2} = 22.23$  años. Asumiendo que el  $^{210}\text{Pb}$  puede ser detectado hasta unas 5 veces su período de semidesintegración, podemos esperar que el  $^{210}\text{Pb}$  pueda proporcionar información útil durante los últimos 100-150 años aproximadamente, si bien esto depende de las técnicas analíticas utilizadas y la precisión del ensayo (Sanchez Cabeza *et al.*, 2012).

En el medio marino, el  $^{210}\text{Pb}$  puede tener fuentes de aporte diversas: En zonas costeras someras (<100 m), el flujo principal de  $^{210}\text{Pb}$  a los sedimentos es el procedente de la atmósfera (El-Daoushy, 1988), aunque los ríos y la escorrentía pueden ser fuentes adicionales de  $^{210}\text{Pb}$  a la columna de agua (Hötzl y Winkler, 1987). En aguas más profundas se debe tener en cuenta que una fracción del  $^{210}\text{Pb}$ , más importante cuanto mayor sea la profundidad, procede del  $^{226}\text{Ra}$  disuelto en el agua de mar (Cochran, 1992). Una vez el  $^{210}\text{Pb}$  se encuentra en el medio marino, se desintegra o se asocia a la materia en suspensión, que arrastra al  $^{210}\text{Pb}$  hacia el sedimento del fondo. Así, los sedimentos contienen  $^{210}\text{Pb}$  producido in situ por la desintegración del  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{210}\text{Pb}$  de base) y el que procede de columna de agua ( $^{210}\text{Pb}$  en exceso,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  en adelante, pudiéndose encontrar en inglés como Unsuported  $^{210}\text{Pb}$ ) que se deposita con las partículas que finalmente forman parte del sedimento consolidado (Sanchez Cabeza *et al.*, 2012).

La evaluación de la desintegración del  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  con la profundidad permite, en determinadas condiciones, estimar la fecha de formación de los sedimentos, que se convierten entonces en archivos naturales de las condiciones ambientales de la zona de estudio (Sanchez Cabeza *et al.*, 2012).

En la serie natural del  $^{238}\text{U}$ , el  $^{210}\text{Po}$  tras 2 años entre el muestreo y su medida, se encuentra en equilibrio secular con su predecesor, el  $^{210}\text{Pb}$ , por lo que podemos obtener el  $^{210}\text{Pb}$  midiendo su descendiente. El  $^{210}\text{Pb}$  tiene una semivida de 22,2 años y el  $^{210}\text{Po}$  de 138,4 días. Estos isótopos de origen natural son especialmente útiles en estudios de captación química en el mar, el proceso mediante el cual los elementos reactivos se eliminan del agua de mar por adsorción en superficies sólidas. Ambos nucleidos pueden determinarse mediante espectrometría de partículas alfa (Fleer y Bacon, 1984).

En el presente estudio se plantea utilizar distintos métodos utilizados en la literatura para estimar la edad (anillos y radioisótopos) y tasa de crecimiento (anillos de crecimiento) en dos especies de gorgonias de la familia Primnoidae colectadas en el Océano Sur, *Armadillologorgia cyathella* y *Aglaoprimnoa stefanii*. Esta nueva información podría aportar nuevos datos sobre la biología de estas especies, y podrá contribuir a alcanzar un mejor conocimiento sobre la historia evolutiva de estos organismos en ambientes de condiciones climáticas extremas.

## **2.OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Estimar la longevidad y la tasa de crecimiento de dos especies de gorgonias subantárticas.

### **2.2 Objetivos específicos**

Determinar la edad, la tasa de crecimiento axial y radial de los primnoidos *Armadillologorgia cyathella* y *Aglaoprimnoa stefanii*, colectadas en la Reserva Marina Burdwood Bank.

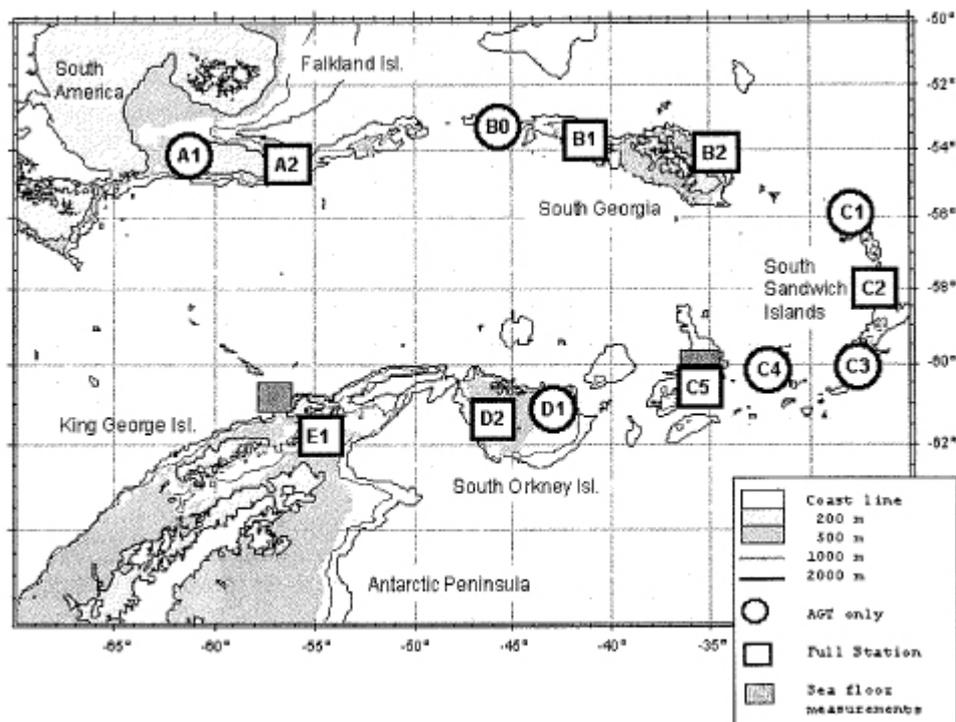
## **3. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **3.1 ÁREA DE ESTUDIO**

Los ejemplares de este estudio fueron colectados en Burdwood Bank, una meseta submarina ubicada a unos 200 km al sur de las Islas Malvinas (La Mesa, 2016) y a 150 km al este de la Isla de los Estados (Provincia de Tierra del Fuego, Argentina) (Bremec *et al.*, 2019). Esta meseta comprende un área intermedia entre América del Sur y la Península Antártica (Figura 1) y forma parte de las islas y la plataforma que constituyen el Arco de Scotia (Schejter *et al.*, 2016).

Su área es aproximadamente de 34.000 km<sup>2</sup>, con una profundidad de entre 50 y 200 metros, donde el fondo se rompe abruptamente en una pared que alcanza de 1100 a más de 3000 metros de profundidad en algunas regiones (Schejter *et al.*, 2016).

La meseta submarina está provista de un ecosistema altamente productivo. Además, es un importante destino de migración para una amplia variedad de aves y mamíferos marinos, motivos suficientes para su reciente declaración como santuario marino (Área Marina Protegida de Namuncura) (Schejter *et al.*, 2016).



**Figura 1.** Área de muestreo durante la campaña ANT XIX/5. A2 Isla Burdwood Bank.

### 3.2 MATERIALES ESTUDIADOS

Las colonias de *Aglaoprimnoa stefanii* y *Armadillorgorgia cyathella*, fueron colectadas durante la expedición LAMPOS a bordo del RV Polarstern (abril-mayo de 2002), durante la campaña ANT XIX/5. Las muestras fueron colectadas entre los 200 y 600 metros de profundidad, congeladas y posteriormente secadas al aire, para finalmente depositarlas en la colección de material antártico del laboratorio de Biodiversidad y Ecología Acuática (BECA) del departamento de Zoología, Facultad de Biología, Universidad de Sevilla. En este estudio se estudiaron cuatro ejemplares en total, dos de cada especie.

### 3.3 METODLOGÍA

La selección de las especies a estudiar se basó principalmente en una estructura tridimensional elevada y complejidad colonial simplificada (ramificación dicotómica con escasas ramas laterales). Para cada una de las colonias estudiadas se midió su longitud desde la base a la parte apical (Tabla 2).

Para cada una de las colonias se realizaron tres cortes en su parte basal. Un corte fue destinado al conteo de los anillos de crecimiento. El siguiente fragmento se utilizó

para el estudio del análisis radiométrico con plomo ( $^{210}\text{Pb}$ ), y, por último, el tercer fragmento fue utilizado para el análisis con carbono ( $^{14}\text{C}$ ).

Los cortes de la gorgonia se realizaron con una minimesa de corte YXEC (López Gonzalez, 2020) (Figura 2). El grosor de los cortes fue de aproximadamente de 1 cm de largo.



**Figura 2.** Imágenes correspondientes a los tres cortes de la parte basal, con el uso de la minimesa de corte YXEC.

### 3.3.1 Conteo de anillos basales

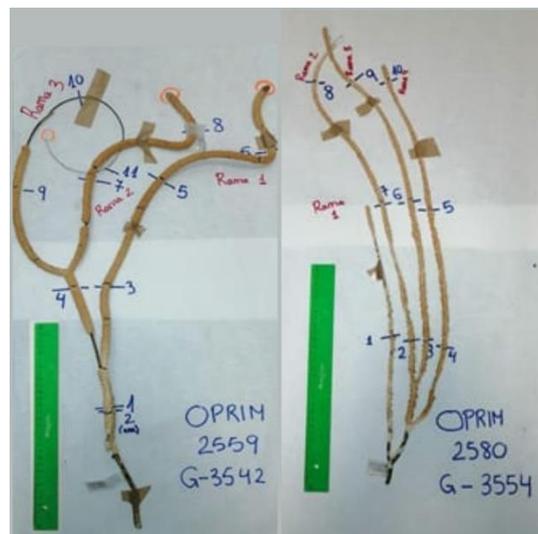
Este análisis consistió en observar la parte basal (previamente cortada) a la lupa MOTIC SMZ 168, con luz ultravioleta (SFA-UV Adaptador de microscopio estereoscópico NIGHTSEA) (Figura 3). Una vez enfocada la muestra, se dividió en secciones imaginarias, con el fin de montar las distintas partes en una sola foto. El programa usado en la unión de las imágenes fue el CorelDRAW X5. El conteo de anillos para la estimación de la tasa de crecimiento radial y axial se hizo de la misma forma.



**Figura 3.** Lupa MOTIC. Preparada con luz ultravioleta y muestra enfocada.

### 3.3.2 Tasa de crecimiento axial y radial

La tasa de crecimiento (radial y axial) se estimó en dos ejemplares OPRIM 2559 y ORPIM 2580, el primero perteneciente a la especie *A. cyathella* y el otro a *A. stefanii*. Para ello se contabilizaron los anillos formadores del esqueleto del animal a diferentes alturas, cada 20 cm aproximadamente desde la parte basal hasta la parte apical. Se realizaron los cortes numerados del 1 al 11, incluyendo el corte basal (Figura 4 A.B).



**Figura 4. A.** Imagen izquierda. Cortes numerados de *A. cyathella*. **5.B.** Imagen derecha. Cortes numerados de *A. stefanii*.

Una vez realizados los cortes, se procedió a pulir la cara que vamos a observar. Se usa una lija de grano medio, teniendo en cuenta la fragilidad de las muestras. Además, se usó una pasta de pulido WOLFCRAFT (para multimaterial) y así la superficie quedó totalmente lisa y brillante.

En este paso, fue justo cuando se midió el radio de cada corte, desde el centro al exterior. Se decidió medir el radio por la parte más ancha, ya que el crecimiento de los corales es asimétrico en cuanto a la formación de anillos (Risk *et al.*, 2002). Esta medida es necesaria para la estimación de la tasa de crecimiento radial (TCR o RGR, según sus siglas en inglés, Radial Growth Rate ( $\mu\text{m}/\text{años}$ )).

En cambio, para la tasa de crecimiento axial (TCA o AGR, de sus siglas en inglés Axial Growth Rate ( $\text{cm}/\text{años}$ )), se utilizó la altura del corte y el número de anillos (años-parejas) a esa altura.

Los cálculos realizados para la estimación de ambas tasas de crecimiento son los siguientes:

$\text{TCR} = \text{Radio } (\mu\text{m}) / \text{años}(\text{parejas})$	$\text{TCA} = \text{Altura } (\text{cm}) / \text{años } (\text{parejas})$
--	---

Una vez tenemos la imagen, se cuentan los anillos. La imagen se dividió en tres partes, por tanto, se contaron tres veces los anillos de cada imagen. Posteriormente se hizo una media. De cada corte a distintas alturas para obtener la altura del animal, los anillos presentes a esa altura y el diámetro de cada corte. Con estos datos, se calculó tanto la tasa de crecimiento radial ( $\text{mm}/\text{año}$ ) como la tasa de crecimiento axial ( $\text{cm}/\text{año}$ ).

### 3.3.3 ANÁLISIS RADIOMÉTRICOS

En este estudio se realizaron análisis radiométricos mediante espectrometría alfa, con el isótopo  $^{210}\text{Pb}$  y análisis de espectrometría de masas con el  $^{14}\text{C}$ . Estos trazadores isotópicos se usaron ya que ambos se incorporan a la matriz esquelética desde el momento de la formación (Martínez Dios, 2014).

En principio, el análisis radiométrico se realizó para plomo ( $^{210}\text{Pb}$ ), que está en equilibrio secular (ver apéndice) con su hijo el  $^{210}\text{Po}$  (pertenecientes a la serie radioactiva natural del  $^{238}\text{U}$ ), por lo que será este último, el isótopo de Po, el que va a ser medido para

datar por  $^{210}\text{Pb}$ . Adicionalmente, isótopos de U ( $^{238}\text{U}$  y  $^{234}\text{U}$ ) más isótopos de Th ( $^{230}\text{Th}$ ) fueron medidos en estas muestras pues pueden aportar información adicional sobre desequilibrios en las series naturales radioactivas. Estos análisis fueron realizados en la Facultad de Física de la Universidad de Sevilla. Por otro lado, el estudio del  $^{14}\text{C}$  se llevó a cabo en el Centro Nacional de Aceleradores (CNA), en Sevilla.

### 3.3.3.1 Isótopo $^{14}\text{C}$

#### Preparación de muestras para la datación con $^{14}\text{C}$

Las muestras usadas para este método de datación son correspondientes a los cortes consecutivos de los usados para la datación de  $^{210}\text{Pb}$ . Debido al alto costo de estos análisis, estudiaremos solamente en un espécimen de cada especie una *A. cyathella* (Oprim 2559) y una de *A. stefanii* (Oprim 2580), con sus correspondientes partes exterior y centro.

Para la datación con  $^{14}\text{C}$ , inicialmente cada muestra fue descalcificada con ácido clorhídrico al 5% (Sherwood *et al.*, 2005). Una vez descalcificadas, se pusieron durante dos días más en un frasco con ácido nuevo para asegurar que la reacción no cesara al no haber ácido reactivo. Para cada una de las muestras se separó la parte externa e interna (Centro). Estas fueron lavadas con agua Mili-Q durante 3 días, y se dejaron secar en una estufa a  $50^{\circ}\text{C}$ , durante 48 horas. Finalmente, por medio de una balanza de precisión se pesaron 1-3 mg de cada muestra, etiquetadas y llevadas al Centro Nacional de Aceleradores (CNA), donde se llevó a cabo la datación de  $^{14}\text{C}$ .

Es primordial evitar la contaminación con carbono externo en las muestras, ya que esto podría modificar los datos sensiblemente. Para ello hemos seguido unas pautas: (Alejandre, 2018):

- Las muestras tienen que estar alejadas del polvo, materiales que puedan adherirse y papel (no se aconseja envolverlas directamente)
- Las muestras, deben de ser manipuladas usando las normas básicas de laboratorio. Se aconseja usar guantes.
- Las muestras deben de ser guardadas en bolsas de plástico con autocierre, o bien en viales de vidrio o plástico. Otra opción es usar papel de aluminio. Es importante asegurar que el envoltorio no sufrirá ningún daño durante el traslado de muestras.

- Presentar la cantidad recomendada de material seco según la matriz. El fin es conseguir alrededor de 1 mg de C en el punto final de la preparación.

### 3.3.3.2 Isótopo $^{210}\text{Pb}$

#### Preparación de muestras para la datación con $^{210}\text{Pb}$

Para el estudio de Pb se utilizó el segundo fragmento consecutivo a la base de la muestra. Por medio de una Dremel, se extrajo la parte exterior (Ex) y el centro del corte (C), de las cuatro colonias (dos de cada especie) (8 muestras en total). Cada una de estas muestras fueron pesadas en una balanza analítica (con una resolución de 0.1 mg), con el objetivo de calcular la cantidad de trazador necesaria.

El análisis radiométrico de isótopos de U, Th y Po por espectrometría alfa consta de tres etapas (Mantero Cabrera, 2013):

#### a) Etapa de extracción o preconcentración.

En esta primera etapa se trata de eliminar ciertas sales y otros elementos que podrían interferir en nuestro objetivo de aislar los elementos de interés, además de reducir el volumen de la muestra. El primer paso de esta etapa es la calcinación, pero al estar interesados en medir el Po, que empieza a volatilizarse por encima de los  $105^\circ$ , este proceso no ha sido aplicado.

A continuación, realizamos el trazado con isótopos artificiales, no presentes en muestras naturales y que nos darán información sobre el rendimiento químico del proceso. Consiste en añadir una cantidad conocida de  $^{232}\text{U}$  y  $^{229}\text{Th}$ , y  $^{209}\text{Po}$ , denominados trazadores (Tabla 1). En este paso del proceso, es imprescindible conocer la concentración de actividad de los trazadores; son las siguientes:

#### CONCENTRACIÓN DE ACTIVIDAD DE LOS TRAZADORES

- ❖ Trazador para isótopos de  $^{232}\text{U}$ :  $98.12 \text{ m/Bq g} \pm 0.50$
- ❖ Trazador para isótopos de  $^{229}\text{Th}$ :  $74.60 \text{ m/Bq g} \pm 0.50$
- ❖ Trazador para isótopos de  $^{209}\text{Po}$ :  $196.02 \text{ m/Bq g} \pm 0.50$

La cantidad de cada reactivo que se añadió a la muestra fue calculada previamente (Tabla 1). Tras el trazado, se inicia un proceso de digestión de la muestra. Para ello, se aplica un protocolo con *agua regia* (mezcla de HNO<sub>3</sub> y HCl de 45 mL) usado en análisis de matrices inorgánicas y la muestra permaneció durante 4 horas (mínimo) agitándose a 50 °C tapada con vidrio de reloj. Después se aumentó la temperatura hasta 80-90°C, destapando el vaso para reducir el volumen (parte se evapora hasta los 30 mL), y en este punto se añade peróxido (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) en gotas. A continuación, se completa con HNO<sub>3</sub> (8M) hasta volver al volumen inicial (este proceso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + HNO<sub>3</sub> 8M se repite dos veces más).

La digestión termina agitando la muestra a temperatura ambiente durante 12 horas más. Luego se realizó el filtrado a 45µm de tamaño de poro. Se evapora el filtrado hasta unos 10 mL y añadimos agua destilada hasta un volumen de 50 ml. En este punto se procedió con la precipitación de actínidos (grupo de elementos cuyo número atómico Z se halla entre 89 y 103 (Jori *et al.*, 2017)) de la disolución. Para ello se adicionó portador hierro (Fe<sup>3+</sup>) a temperatura templada.

Fue necesario un cambio en el pH para conseguir la precipitación de los actínidos. Esto se obtiene con la adición de amoníaco, hasta llegar a un pH de 8.5. Posterior a este paso, trasvasamos el precipitado a un tubo de centrifuga, para separar completamente el precipitado del sobrenadante (que se deshecha). Dicho precipitado se centrifuga durante 10 minutos a 4500 rpm. Tras este proceso, se tiene en un tubo de centrifuga un precipitado en el fondo y una fracción líquida en el parte superior del mismo. Se elimina nuevamente el sobrenadante y se deja secar en un foco o estufa durante unas 12 horas aproximadamente la fracción sólida precipitada. Para finalizar la etapa de preconcentración el precipitado se disuelve en 10 ml de HNO<sub>3</sub> (8M).

**Tabla 1:** Masas y cantidades añadidas de trazador a cada muestra. La incertidumbre en la balanza de medida es de 0.1 mg en cada caso que se aplica a todas las medidas de la tabla.

	MUESTRAS	Masa Neta	<sup>232</sup> U	<sup>229</sup> Th	<sup>209</sup> Po
Centro de muestra (C)	Oprim 2554	5.8	83.1	41.4	96.5
	Oprim 2580	1.7	109.2	55.1	44.7
	Oprim 2546	7.5	137.0	210.7	108.3
	Oprim 2559	4.2	96.6	62.3	49.0
Anillo exterior (Ex)	Oprim 2554	15.5	72.0	98.4	52.4
	Oprim 2580	6.6	92.2	88.2	52.0
	Oprim 2546	17.1	114.5	205.4	107.0
	Oprim 2559	16.2	70.6	92.4	52.6

Una vez aplicada la primera etapa, ya tenemos los elementos que nos interesan (además de otros elementos interferentes como el Pb o el Ra), en una disolución de 10 mL en medio nítrico 8M.

### **b) Separación y purificación de los elementos químicos de interés**

La etapa de separación y purificación se ha realizado mediante extracción solvente líquido-líquido con Tributilfosfato (TBP) según indica Martínez, (1991). La solución anterior (10 mL en nítrico 8M) se trasvasa a un embudo de decantación y se le añaden 5 ml de TBP (Tributilfosfato: es un extractor orgánico que hace que se quede atrapado el uranio y el torio, pero no el polonio). Una vez añadido el TBP, agitamos durante 5 minutos, lo dejamos reposar, consiguiendo separar completamente las dos fases: una inorgánica que contiene polonio, y otra orgánica que contiene el uranio y torio y que se sitúa sobre la fase inorgánica. Esta última se separa abriendo el embudo de decantación, colectando así la fase que contiene el Po. Sobre la fase orgánica de TBP, se añaden otros 10 mL de HNO<sub>3</sub> 8M y se repite el proceso de agitación extrayendo de nuevo otra fracción de Po que se mezcla con la anterior. Este proceso se repite una tercera vez. Generamos así una disolución en medio nítrico de 30 mL que contiene el Po separado del U y el Th.

Por otro lado, de la fase orgánica, se extrae el torio mediante la adición de 20 ml de xileno y 15 ml de HCL 1.5 M. Esta solución se agita y separamos la fase inorgánica (que contiene el torio), de la fase orgánica (mezcla de TBP + xileno que retienen el U). Este proceso se repitió dos veces más. Se generan así 45mL en medio HCl que contiene al Th.

El último en ser separado en esta etapa es el uranio, presente en la fase orgánica remanente en el embudo de decantación. Para ello, añadimos 15 ml de agua destilada, y agitamos durante 5 minutos, separando la fase acuosa (donde permanece el uranio). Esta operación se repite dos veces, para extraer completamente el uranio. Se generan así 45mL de agua que contiene al U.

### **c) Preparación de la fuente a medir.**

Debido a la naturaleza de la radiación alfa, es necesario minimizar los efectos posibles de la autoabsorción que ocurrirían en la propia fuente radioactiva. Esto se consigue con el uso de un depósito radiactivo en la fuente con un espesor másico mínimo.

Por ello las fuentes conteniendo a los radionucleidos de U y de Th se obtendrán mediante el proceso de electrodeposición. El proceso que hemos empleado para la electrodeposición de uranio y del torio se basa en Hallstadius (1984):

Las fracciones de U y Th se evaporaron a sequedad. Se añadió 1 ml de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  cuando apenas quedaban 1-2 ml de líquido. Luego se adicionó 300 $\mu\text{l}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, además de 4 ml de agua destilada que redisolvieron la fracción desecada en el paso previo.

Se añadieron unas gotas de indicador azul de timol adquiriendo una coloración rosácea. La solución sufrió un cambio de pH mediante vapores de amoníaco, hasta llegar a un pH de 2.2 aproximadamente. La solución se trasvasa a la celda de electrodeposición.

El vaso fue lavado con 5 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 1% (repartidos en dos veces de 2,5mL cada una) para recoger los restos que pudieran quedar en el vaso. Se añadieron estos 5 ml a la celda volviendo a tomar color rosado, con lo cual, fue necesario volver a ajustar el pH con vapor de amoníaco.

El ánodo de platino fue colocado a la distancia adecuada para iniciar el proceso de electrodeposición a la intensidad y tiempos que se correspondan: 1,2 A y 60 minutos

para U y 120 minutos para Th. Un minuto antes de que terminara el tiempo marcado, se añadió 1 ml de amoníaco a la solución con el fin de evitar la redisolución de los isótopos al interrumpir la corriente.

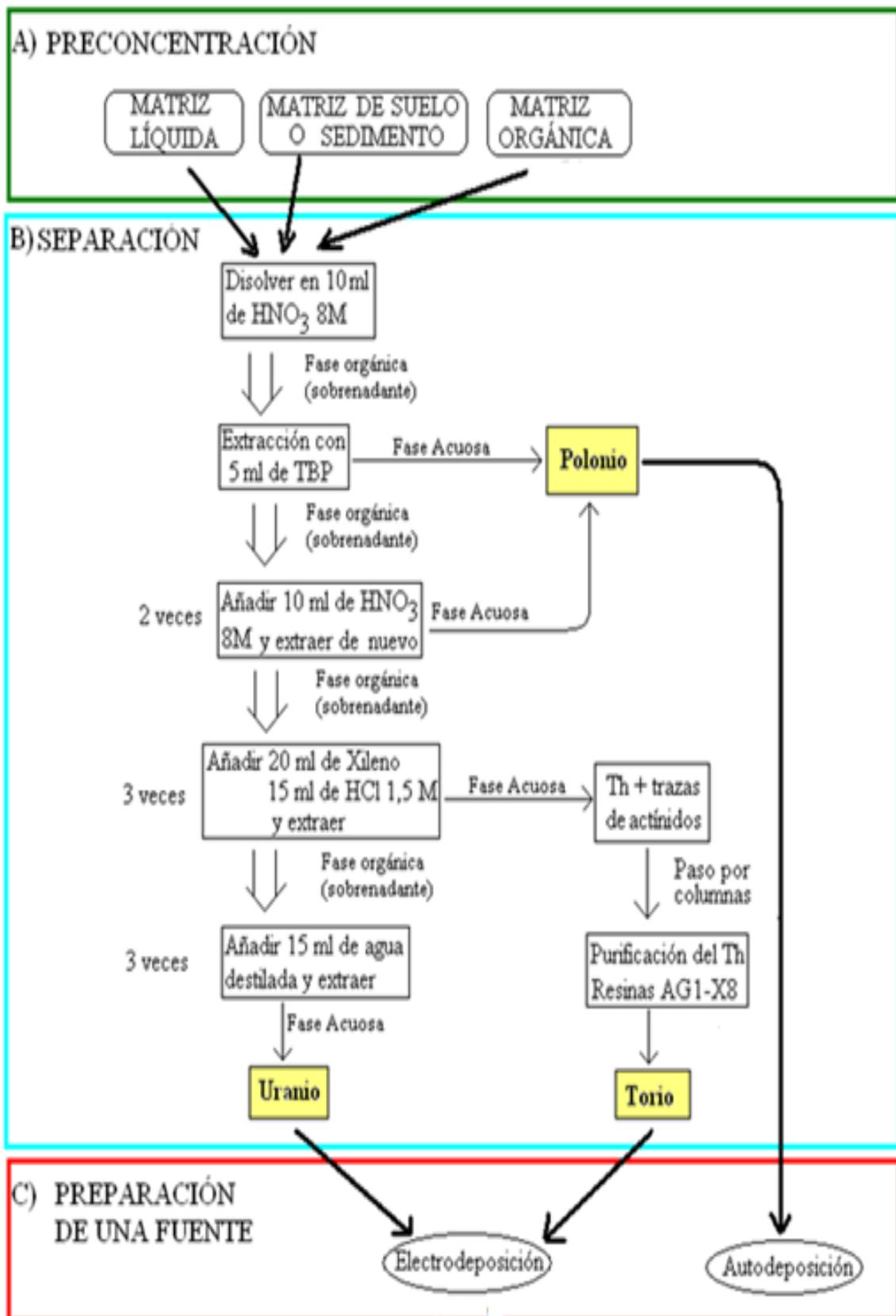
Diferente es la deposición del polonio, ya que tiene alta afinidad para autodepositarse cuantitativamente sobre ciertas superficies metálicas (Ag, Cu (en nuestro caso)) desde soluciones ácidas.

El proceso de autodeposición del polonio (Po), se basa en (García Orellana y García León, 2002):

Partimos de la disolución que contenía polonio en medio nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). La plancheta en la que se llevó a cabo la autodeposición es de cobre. El polonio en medio nítrico se evapora a sequedad, y se añadieron 20-30 ml de HCL 2M, llevándose de nuevo a sequedad.

Se añadió 30-40 ml de HCL 2M. Se sabe que el  $\text{Fe}^{+3}$  interfiere con los isótopos de Po, por tanto, para reducirlo, se añadió ácido ascórbico. La disolución es llevada a  $60^\circ\text{C}$  y se sitúa en el fondo la plancheta de Cu, con un imán agitador. La solución se agitó durante 4 horas, luego se dejó secar la plancheta.

En el siguiente esquema (figura 4) podemos observar de forma resumida y concisa las tres etapas del proceso radioquímico de obtención de uranio, torio y polonio



**Figura 4:** Descripción del proceso de radioquímica seguido en este trabajo mostrando en detalle la fase de separación mediante TBP (Mantero Cabrera, 2013).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Longitud de las gorgonias y anillos basales.

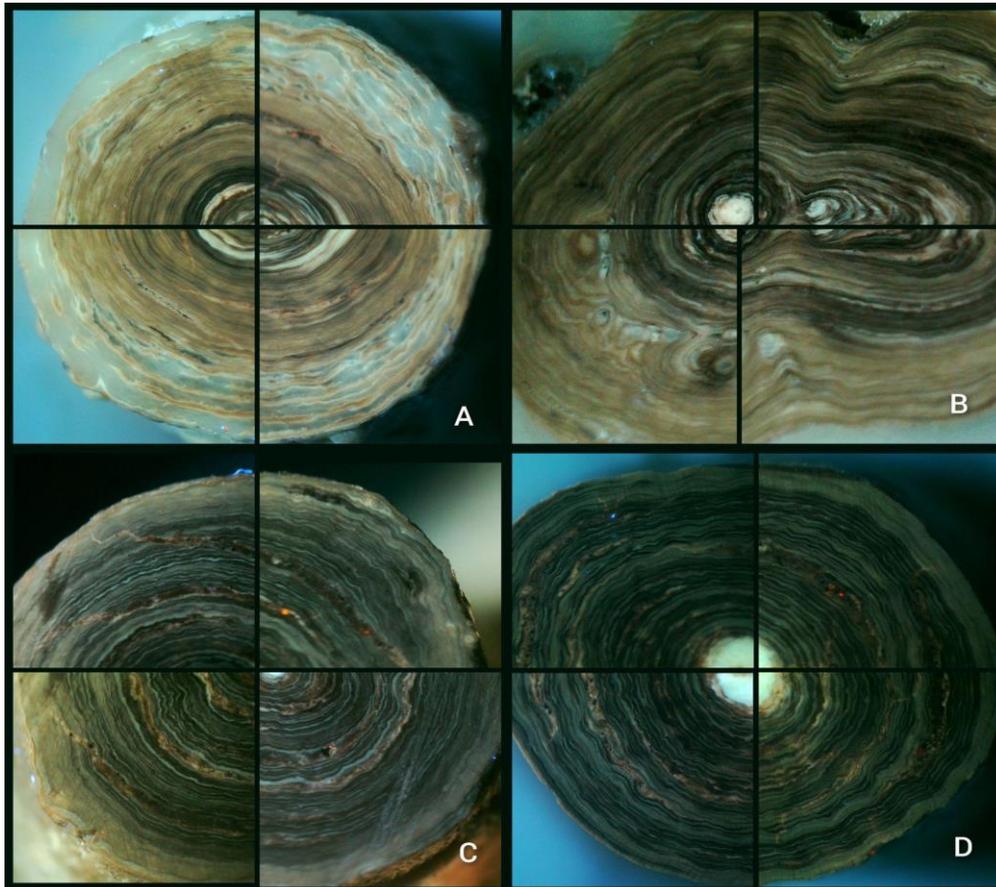
**Tabla 2:** Longitud total y número de anillos basales (pareja) de las especies *A. stefanii* y *A. cyathella*,

<b>Id</b>	<b>Especie</b>	<b>Longitud (cm)</b>	<b>Número de anillos (parejas)</b>
OPRIM 2580	<i>A. stefanii</i>	70	39
OPRIM 2554	<i>A. stefanii</i>	80	50
OPRIM 2546	<i>A. cyathella</i>	100	35/53
OPRIM 2559	<i>A. cyathella</i>	84	47

\* Las abreviaturas hacen referencia a: O: Subclase Octocoral; PRIM: Familia Primnoidae.

En la tabla anterior (2) encontramos la longitud de cada ejemplar medida desde la base hasta la parte apical, junto con los datos obtenidos del conteo de anillos basales. Los anillos se representan en pareja por la alternancia de capas.

En la tabla 2, podemos observar que la colonia más joven según el conteo de anillos es el ejemplar Oprim 2580 (*Aglaoprimnoa stefanii*).



**Figura 5:** Fotografías de cortes basales mostrando anillos de crecimiento A: *Armadilloorgia cyathella* (Oprim 2559). B: *Armadilloorgia cyathella* (Oprim 2546). C: *Aglaoprimnoa stefanii* (Oprim 2554). D: *Aglaoprimnoa stefanii* (Oprim 2580).

En la figura 5 se observa como son los anillos de estas gorgonias. Podemos ver que las fotografías A y B de la figura 5 presentan anillos más irregulares y muy asimétricos en cuanto a su agrupación concéntrica. Además, esta especie, *Armadilloorgia cyathella*, presenta los anillos muy difusos, ya que la alternancia de carbonato cálcico y gorgonina es minúscula, creando anillos muy finos y difíciles de observar.

Por otro lado, la especie *Aglaoprimnoa stefanii*, fotografías C y D de la figura 5, presenta anillos muy ordenados y más anchos, lo que facilita su observación. Los anillos de esta especie son más homogéneos que los de la anterior, y esto facilita el conteo de los mismos.

Según Juárez-de la Rosa (2002) la presencia de un espacio amplio entre los anillos representa la exposición a varios meses cálidos. Mientras que anillos cercanos entre ellos, como es el caso de nuestros ejemplares, representan la exposición a meses fríos. En

resumen, la estacionalidad climática, afecta de forma directa al esqueleto del animal modificando su ultraestructura química (Worbes *et al.*, 2003).

La periodicidad anual de los anillos en gorgonias es reportada desde hace varios años (Andrews *et al.*, 2002).

Por tanto, las edades estimado para los ejemplares de *Armadillogorgia cyathella*, corresponden a 47 y 53 años, hasta el año 2002, que fue cuando se recolectaron. Por otro lado, los ejemplares de *Aglaoprimnoa stefanii*, presentaron unas edades estimadas de 39 y 50 años, hasta el año de su recogida, 2002.

#### 4.2 Tasa de crecimiento axial y radial

Los resultados obtenidos a partir del conteo de anillos y los cálculos realizados para la tasa de crecimiento axial y radial se muestran en la siguiente tabla:

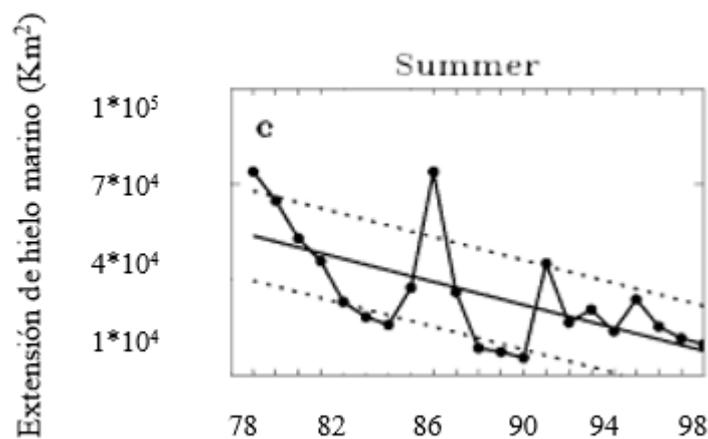
**Tabla 3:** Datos obtenidos del conteo de anillos con luz ultravioleta. Y cálculos a través de ellos.

ARMADILLOGORGIA CYATHELLA (Oprim 2559)						
CORTES	RADIO (μm)	LARGO (cm)	NÚMERO DE ANILLOS	PAREJAS	RGR (μm/año)	AGR (cm/año)
1	3037	20	80	40	75,93	0,50
2	2655	20	69	34,5	76,96	0,58
3	1769	40	41	20,5	86,29	1,95
4	2086	40	59	29,5	70,71	1,36
5	1258	60	33	16,5	76,24	3,64
6	1528	80	19	9,5	160,84	8,42
7	1185	60	38	19	62,37	3,16
8	538	80	11	5,5	97,82	14,55
9	1450	60	46	23	63,04	2,61
10	1487	80	50	25	59,48	3,20
11	678	100	16	8	84,75	12,50
Basal	4551	0	94	47	96,83	NO
AGLAOPRIMNOA STEFANII (Oprim 2580)						
CORTES	RADIO (μm)	LARGO (cm)	NÚMERO DE ANILLOS	PAREJAS	RGR (μm/año)	AGR (cm/año)
1	1558	20	51	25,5	61,10	0,78
2	1848	20	57	28,5	64,84	0,70
3	2011	20	49	24,5	82,08	0,82
4	1965	20	65	32,5	60,46	0,62
5	1374	40	27	13,5	101,78	2,96
6	1434	40	30	15	95,60	2,67
7	1479	40	41	20,5	72,15	1,95
8	839	60	NO	NO	NO	NO
9	803	60	NO	NO	NO	NO
10	864	60	NO	NO	NO	NO
Basal	3258	0	78	39	83,54	NO

En la tabla 3, podemos observar como el radio de cada corte de la gorgonia va disminuyendo conforme nos acercamos a la parte apical, la parte más joven. Lo mismo ocurre con el número de anillos, llegando a incluso no poder contarlos por no estar aún formados como tal. Esto ocurre en la parte apical del ejemplar estudiado para la especie *Aglaoprimnoa stefanii*. Otros datos que observamos en la tabla 3, son las tasas de crecimiento axial y radial, de las dos especies estudiadas. La tasa de crecimiento axial va creciendo conforme nos acercamos a la parte apical, ya que el animal va tomando altura. La tasa de crecimiento radial debería de ir disminuyendo conforme nos acercamos a la

parte apical del animal, pero sufre variaciones. Esto se puede deber a una absorción de alimento no constante, o en exceso en el momento de ese corte (esa altura).

En la tabla 3, podemos observar los resultados de ambas tasas. Los cortes que presentan mayor tasa de crecimiento radial en el ejemplar Oprim 2559 perteneciente a la especie *Armadillologorgia cyathella*, son los cortes 6,8. Ambos cortes son dos de los más apicales. La elevada tasa de crecimiento radial en la parte apical de la gorgonia puede deberse a que las condiciones ambientales en ese momento fueran favorables para su crecimiento. Estas condiciones podrían ser, abundancia de fitoplancton, una variación alta de luz incidente y una temperatura más elevada por la presencia del verano (Peck *et al.*, 2006), como ya sugerían Smith y Stammerjohn (2001). En la figura 6, se representa la disminución de la extensión de hielo marino antártico consecuencia del aumento de la temperatura ambiental durante los meses de verano.



**Figura 6:** Extensión del hielo (Km<sup>2</sup>) en la región Antártica en los meses de verano desde el año 1978 hasta 1998.

Estos animales, se han adaptado a lugares con temperaturas extremadamente bajas (Peck y Brockington, 2013), de ahí que tengan un crecimiento tan lento por lo general, como ya reportaron Parker y Bowden (2010). Por tanto, es probable que este aumento en su tasa de crecimiento radial en estas partes tan concretas de la gorgonia se deba a lo mencionado anteriormente.

En cambio, el corte 10 de *Aglaoprimnoa cyathella* es de los que presenta menor tasa de crecimiento radial, y esto puede ser consecuencia de que pertenece a una de las ramas últimas en formarse. De ahí, que el radio sea más pequeño que el de los otros cortes.

Como era de esperar, en las bases de ambas gorgonias, obtenemos una tasa de crecimiento radial elevada, ya que es el comienzo de la formación del coral, por lo que el metabolismo del animal gasta la mayor parte de su energía en crear una base sólida y consistente.

En otro estudio, se ha observado las tasas de crecimiento radial más lentas jamás registradas (Martinez Dios *et al.*, 2016) desde 5.8-51  $\mu\text{m}/\text{años}$ . Por tanto, las obtenidas en este estudio, son hasta 10 veces superiores.

Justo lo contrario ocurre si hablamos de la tasa de crecimiento axial. Esta tasa es mínima en las dos gorgonias en la parte basal porque el animal aún no ha tomado altura suficiente.

Si nos fijamos en la columna AGR (cm/año), de la tabla 3, observamos el crecimiento axial del ejemplar oprim 2559 perteneciente a la especie *Armadillologorgia cyathella*. Esto ha sido analizado a diferentes alturas, al igual que con la tasa de crecimiento radial. Los cortes 6,8 y 11 son los que tienen mayor tasa de crecimiento axial. Estos puntos pertenecen a la parte más apical de la gorgonia.

Un estudio reciente (Schejter *et al.*, 2020), muestra los resultados obtenidos con especies del mismo género, aportando resultados muy diferentes. El primnoide antártico *Primnoella scotiae* ha presentado una tasa de crecimiento axial en un rango de 0.096-5.53 cm/año. En este caso, el rango de la especie *Armadillologorgia cyathella* se encuentra entre 0.50-14.55 cm/año. Mucho menor es el rango de la tasa de crecimiento axial de la especie *Aglaoprinoia stefanii* (Oprim 2580), que se encuentra entre 0.62-2.67 cm/año. Los cortes que se van acercando a la zona apical de la gorgonia tienen mayor tasa de crecimiento axial.

Según Peck, y Brockington, (2013), la tasa de crecimiento axial de *Primnoella scotiae* es alta, por tanto, la de la especie *Armadillologorgia cyathella* es mucho mayor si las comparamos, aunque esto difiere significativamente según la estación del año, la localización y los años de muestreo. Por lo tanto, este estudio confirma que el crecimiento de las gorgonias antárticas puede ser aproximadamente 10 veces más lento que sus contrapartes templadas, como sugieren Peck y Borrington (2013).

### 4.3 Análisis radiométrico con $^{14}\text{C}$ .

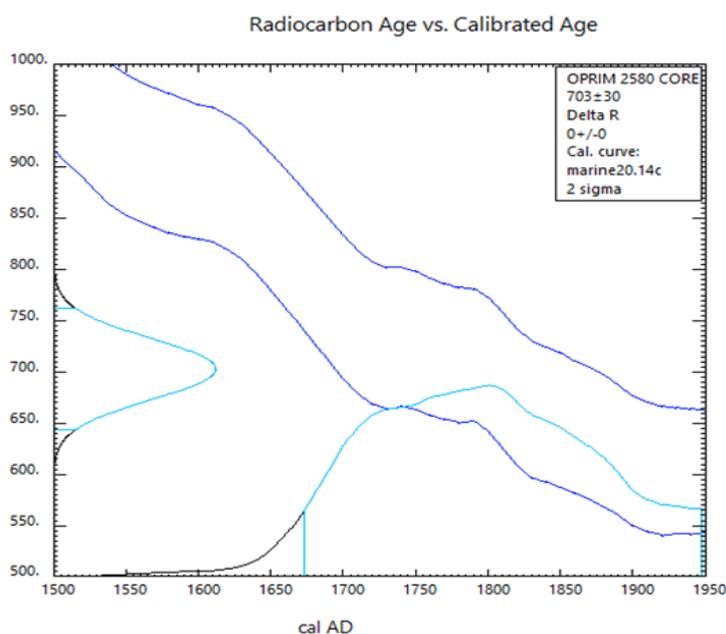
Los resultados obtenidos a partir del análisis con el radiocarbono se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 4:** Datos obtenidos en el Centro Nacional de Aceleradores de la Universidad de Sevilla. pMC: % de carbono moderno.  $\delta^{13}\text{C}$  (‰): es un indicador de la relación que hay entre los isótopos estable  $^{13}\text{C}$  y  $^{12}\text{C}$ , y se usa para la normalización de resultados correspondiente a la madera.

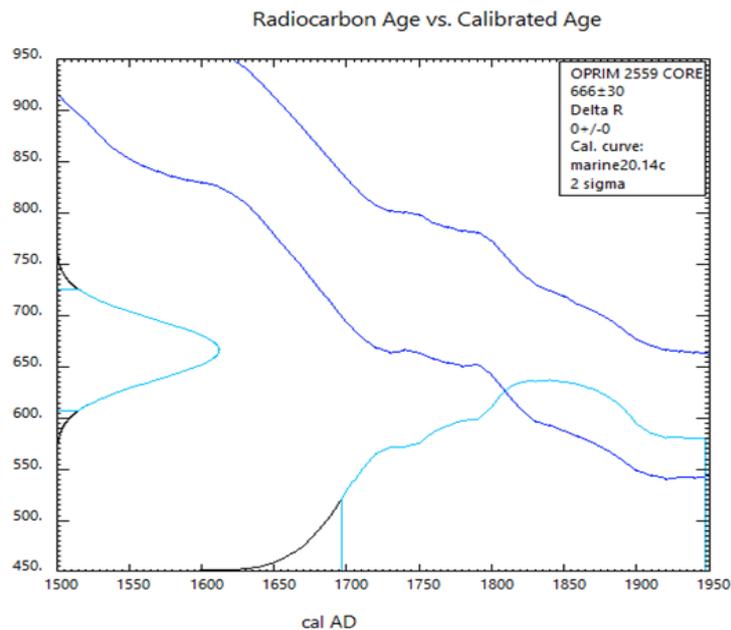
MUESTRAS	pMC	Error	Edad BP (y)	$\pm$ (y)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
Oprim 2580	91.62	0.34	703	30	-18.6
Oprim 2580	103.11	0.38	-246	29	-21.4
Oprim 2559	92.04	0.34	666	30	-18.30
Oprim 2559	103.36	0.38	-266	29	-21.4

Las edades obtenidas con el estudio de  $^{14}\text{C}$ , representadas en la tabla 4 no son reales, ya que aún no han sido calibradas. Ambas especies, tienen una edad BP (antes de ser calibradas) de en torno a 700 años BP. Esto indica, la posibilidad de que ambas especies se empezaran a formar en el mismo año, o en años muy cercanos.

**Figura 7:** Relación entre la curva de calibración (Marine 20) y la edad BP obtenida en el ejemplar Oprim 2580 (*Aglaoprimnoa stefanii*).



**Figura 8:** Relación entre la curva de calibración (Marine 20) y la edad BP obtenida en el ejemplar Oprim 2559 (*Armadillogorgia cyathella*).



La calibración de las edades ficticias (BP), se realiza con una curva modelo, en este caso Marine 20, como vemos en las figuras 3 y 4. Las líneas representadas en azul marino indican la curva de calibración, y las líneas turquesas representan las edades BP obtenidas de las muestras de este estudio. Por tanto, debemos llevar la línea turquesa de forma horizontal hasta el cruce con la línea azul marino. Obteniendo en ambas especies el mismo resultado aproximadamente. El rango de antigüedad en el que ambas especies empezaron a crearse comprende 1663 hasta 1950 (edad de referencia por el aumento del  $^{14}\text{C}$  tras las pruebas nucleares). Se puede apreciar que la especie *Aglaoprimnoa stefanii* (figura 7) tuvo su inicio un poco después que *Armadillogorgia cyathella* (figura 8), por 1715 aproximadamente.

En el caso del ejemplar de la especie *Aglaoprimnoa stefanii* (Oprim 2580) cuya edad BP es de 703 años, podemos observar que al aplicar la curva de calibración obtenemos un rango de edad desde 1673 hasta 1950 (edad de referencia por el suceso de las pruebas nucleares realizadas en aquella década). Esto significa que la colonia analizada tiene una edad de hasta 329 años. Por otro lado, obtuvimos que la edad de la parte externa de la gorgonia estuvo incorporando  $^{14}\text{C}$  después de la edad de referencia (año 1950), por eso sale la edad negativa en la tabla 4. Las gorgonias fueron colectadas

en el año 2002, y permanecían vivas. Con lo cual, hasta el año 2002, estuvieron incorporando  $^{14}\text{C}$  hasta su recolecta.

En el caso del ejemplar de la especie *Armadillologorgia cyathella* (Oprim 2559), ocurre algo parecido a la especie explicada anteriormente. La edad BP obtenida de este animal es de 666 años BP, si hablamos del centro (core). Al aplicar la calibración, podemos observar en la figura 4, que la edad cronológica real de la formación de la gorgonia es del mismo rango que la especie *Aglaoprimnoa stefanii*. Ocurre lo mismo si nos referimos a la parte externa del animal. El animal estuvo incorporando  $\text{C}^{14}$  después del año 1950.

El rango de edad obtenido mediante el radiocarbono puede ser más preciso si aplicamos la corrección local  $\Delta\text{R}$  (Arévalo *et al.*, 2015). Este dato se localiza en una base de datos, y consiste en la diferencia de edad BP obtenida y la edad BP que muestra el modelo de la curva de calibración marina. En este estudio, no podemos aplicar la corrección local, ya que los  $\Delta\text{R}$  que encontramos en la base de datos se encuentran muy alejados del Burdwood Bank, nuestra zona de estudio. Con lo cual, los datos obtenidos son edades ficticias, y poco precisas.

Comparamos los resultados de este estudio con los datos obtenidos en otros análisis (Martinez Dios *et al.*, 2016), realizados con especies de gorgonias antárticas, *Fannyella rossii*, *Thouarella variabilis*, y *Fannyella abies*. Estas gorgonias fueron recogidas año arriba o año abajo igual que las muestras de este estudio. Dataron con  $^{14}\text{C}$  y analizaron el interior (core) y el exterior (exterior). Obtuvieron, con la parte interna (ya que la parte exterior había sido afectada por las bombas nucleares), que las gorgonias tenían un rango de inicio de formación de entre 1425–1529 en el caso de *Fannyella rossii*. La otra especie *Fannyella abies* tenía su periodo de formación entre 1541–1777. Estos resultados indican que estas especies son más antiguas que las analizadas en este estudio. Por otro lado, la especie *Thouarella variabilis* presenta un período de formación mucho más anterior al de las demás 785–1010.

#### 4.4 Análisis radiométricos con $^{210}\text{Pb}$ , $^{238}\text{U}$ , y $^{230}\text{Th}$ .

**Tabla 5:** Datos másicos de cada ejemplary de rendimiento químico de cada isótopo (%). Tiempo de medida de cada muestra (s).

Muestra	M (g)	Yield (%)			Tiempo de medida (s)		
		U	Th	Po	U	Th	Po
0_C	0.0017	3.2	20	27	952499	951897	599332
0_E	0.0066	9.6		55	1986625		721717
4_C	0.0058	1.4	19	44	614911	1986639	599202
4_E	0.0155	8.2		53	4331564		1019863
6_C	0.0075	35	48	63	968516	966706	967959
6_E	0.0171	55	44	64	58364	58434	968147
9_C	0.0042	1.0	14	33	952540	517828	599143
9_E	0.0162	11		52	4826119		1019907

Debido a la poca cantidad de muestra disponible, el tiempo de medida se ha extendido desde una semana hasta varias semanas. Normalmente, la medida de radionucleidos naturales en muestras ambientales (en suelos o sedimentos donde se parte de 1g, o en aguas donde se parte de 1 litro) es de 48h aproximadamente para tener resultados por encima del límite de detección (AMD) de esta técnica.

**Tabla 6:** Resultados del análisis radiométrico con isótopos  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ , y  $^{230}\text{Th}$  medidos en Bq/ kg. Nombre de las muestras: 0 y 4: Oprim 2580 y Oprim 2554\_Core y Exterior: *Aglaoprimnoa stefanii*. 6 y 9: Oprim 2546 y Oprim 2559\_Core y Exterior: *Armadillologorgia cyathella*. NM: No Muestreado

Especie	Muestra	Serie del $^{238}\text{U}$			
		$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$^{210}\text{Po}$
<i>Armadillologorgia cyathella</i>	Oprim 2580 C	<1070	<2130	<480	1058±144
	Oprim 2580 E	<70	33±6	NM	218±29
	Oprim 2554 C	<2100	<2700	<67	252±38
	Oprim 2554 E	35±15	40±14	NM	130±13
<i>Aglaoprimnoa setfanii</i>	Oprim 2546 C	67±11	74±10	<46	188±18
	Oprim 2546 E	23±13	29±13	<900	57±5
	Oprim 2559 C	<2600	<4000	<600	803±98
	Oprim 2559 E	6.6±3.0	24±4	NM	158±14

En la tabla 6 podemos observar los datos másicos de cada ejemplar y el rendimiento químico de cada isótopo usado. Las masas son del orden mg. El rendimiento químico es la cantidad de trazador que se recoge al final del proceso con respecto al que hemos echado inicialmente. Lo normal es que se recoja más de un 20 % por tanto, los rendimientos químicos del U no son buenos en general, si bien los del Th y Po son aceptables.

Los rendimientos químicos del Po nos indican que se puede confiar en el proceso de análisis y además que este “comportamiento anómalo” se ha obtenido en las 4 muestras siendo todas ellas diferentes entre sí. Esta anomalía consiste en que cabría esperar que el  $^{210}\text{Po}$  (o lo que es lo mismo, el  $^{210}\text{Pb}$ ) fuese más elevado en el exterior que en el interior (por ser el centro más antiguo y, por lo tanto, se habría desintegrado gran parte del  $^{210}\text{Pb}$ ). Sin embargo, llama la atención que, en las 4 muestras, la concentración de actividad del  $^{210}\text{Pb}$  es mayor en el centro que en la capa más exterior (que sería más joven y, por lo tanto, con mayor cantidad de  $^{210}\text{Pb}$ ).

Este comportamiento anómalo repercute en AMD (Actividad Mínima Detectable). La actividad mínima detectable se conoce por ser la actividad mínima que puede ser detectada con un 95 % de fiabilidad. La AMD se define como:

$$AMD \left( \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right) = \frac{2.71 + 3.29 \sqrt{N_B + \frac{N_B t_B}{t_T}}}{I \cdot \varepsilon \cdot t_T \cdot m \cdot Y}$$

I: intensidad de emisión del isótopo estudiado (en nuestro caso 100%,1). T<sub>B</sub>: es el tiempo de medida de la muestra, y T<sub>T</sub>: es el tiempo total de la muestra. m: masa de partida (mg), con lo cual la AMD será \*10<sup>-6</sup>. Y: rendimiento químico del proceso. ε: eficiencia de detección, es decir, distancia entre la fuente y el detector (en nuestro caso es de un 25%, 0.25).

La AMD es muy alta en ciertos casos. Por eso se ha intentado medir casi una semana de tiempo por muestra para intentar reducir esos valores de AMD. En la fórmula anterior, es necesario corregir el tiempo, ya que estas muestras se han estado midiendo mucho más tiempo que cualquier otra. Esta corrección se hace con un cociente de tiempo (T<sub>B</sub>/T<sub>T</sub>), donde T<sub>B</sub>: es el tiempo de medida del fondo (medido sin muestra alguna, el

blanco), y  $T_T$ : es el tiempo total de la muestra. Por tanto, si aumentamos  $T_T$  disminuimos la AMD.

Por otro lado, en la tabla 6, podemos encontrar los resultados obtenidos de los diferentes isótopos ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ , y  $^{230}\text{Th}$ ). Como vemos en la Serie Natural de  $^{238}\text{U}$  (Figura 9), e indica su propio nombre, el padre de la serie es el  $^{238}\text{U}$ .

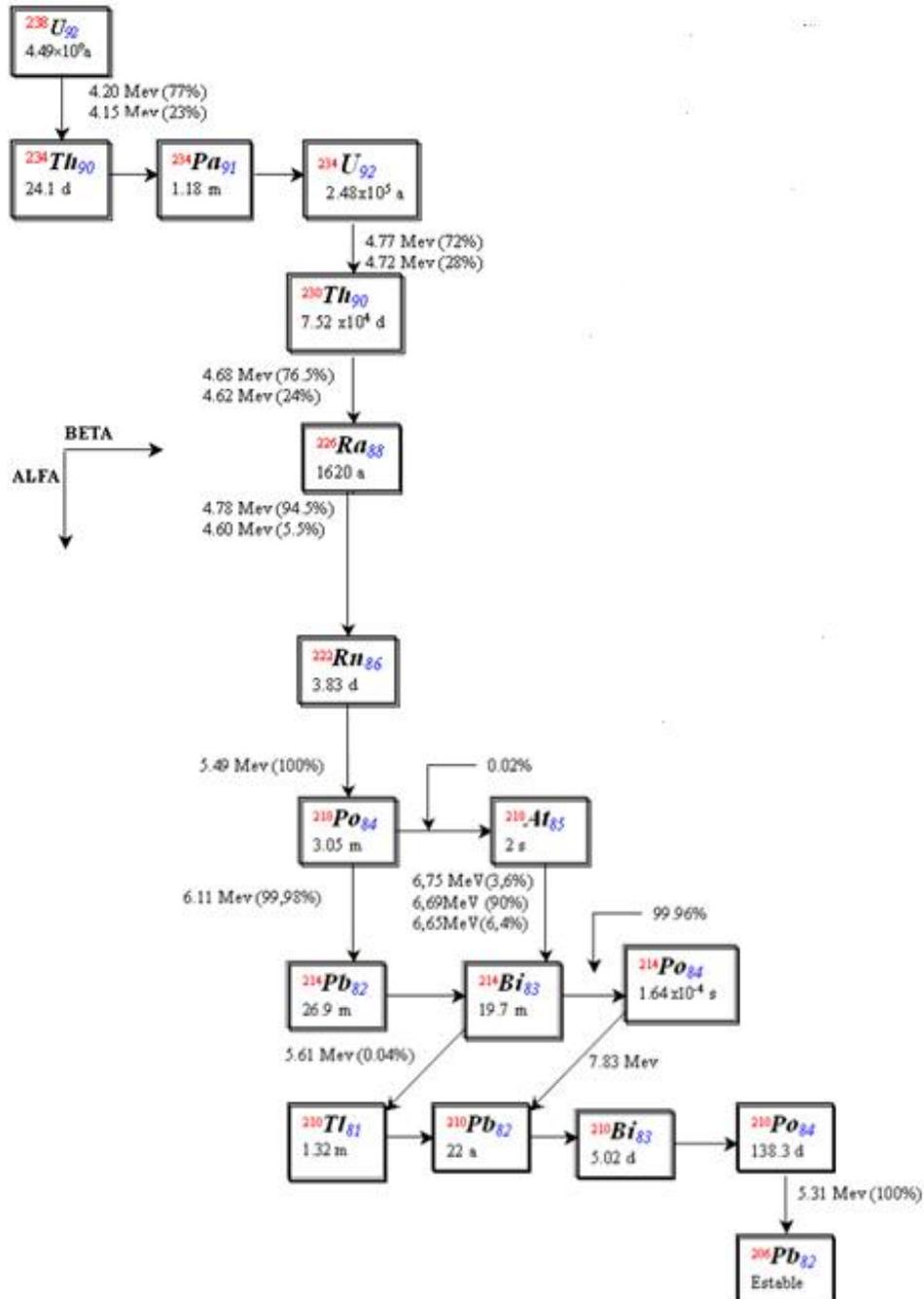


Figura 9: Serie Natural de  $^{238}\text{U}$

Para entender el equilibrio secular de la serie natural, ver apéndice.

En primer lugar, es resaltante los resultados de los especímenes Oprim 2580 y 2554 al medir la parte central de las gorgonias. Al tener el símbolo < delante del dato, indica que el resultado está por debajo del límite de detección. No es sorprendente este resultado, ya que sabíamos que las muestras de este estudio eran muy poco radioactivas, al tener que duplicar o triplicar el tiempo de medida si comparamos con otras muestras. A esto se suma, la poca masa que teníamos del animal.

En segundo lugar, podemos observar que los datos del padre ( $^{238}\text{U}$ ) y el hijo ( $^{210}\text{Po}$ ) no son siquiera similares. Esto indica que hay un desequilibrio de la serie radiactiva natural. Es decir, no hay la misma concentración de actividad de  $^{238}\text{U}$  que de  $^{210}\text{Po}$ . Este desequilibrio llega a ocurrir por procesos geoquímicos y otras perturbaciones, tales como reacciones de disolución y precipitación, difusión gaseosa, lixiviación y retroceso alfa (Benítez Hernández, 1993), de tal manera que las actividades de los descendientes serán diferentes de las actividades de los precursores (López Guerrero, 2018).

En la columna de la tabla 6 donde se encuentra el isótopo  $^{230}\text{Th}$ , vemos que los resultados han salido por debajo del límite de detección, con lo cual, decidimos no muestrear las partes externas, tras ver los resultados de los centros. Así se evitaron pérdidas de tiempo y económicas.

En la última columna tenemos los datos obtenidos del  $^{210}\text{Po}$ , o lo que es lo mismo,  $^{210}\text{Pb}$ . La semivida del  $^{210}\text{Po}$  es de 138.3 días. Esto significa, que nuestra muestra es reciente, ya que en los centros nos sale una cantidad (en Bq/kg) elevada de  $^{210}\text{Po}$ .

La hipótesis de partida es que el  $^{210}\text{Pb}$  se va añadiendo al coral de forma constante en el tiempo. El  $^{210}\text{Pb}$  decae con unos 22 años de semivida con lo que cabría esperar mucho más Pb en el exterior (E) que en el interior (C) del coral por el hecho de ser más joven la parte exterior. Por tanto, en este sentido, los resultados obtenidos a partir del  $^{210}\text{Po}$  no son nada coherentes.

Esta anomalía de la mayor cantidad de  $^{210}\text{Pb}$  en el exterior que en el interior podría tener una explicación científica. Durante el verano austral de 2001-2002, las condiciones ambientales produjeron la desintegración de la barrera de hielo que había perdurado por más de 10000 años en la Bahía Larsen B (Domack *et al.*, 2005). Temperaturas

atmosféricas más cálidas de lo normal causaron fisuras en la barrera de hielo y derretieron la superficie. El agua penetró por las fisuras, extendiéndose, hasta llegar a la base, rompiendo así la masa de hielo (Vernet y Cape, 2019).

Los sedimentos debajo de una plataforma de hielo se acumulan lentamente, por lo que el exceso de actividad de  $^{210}\text{Pb}$  penetra en el lecho marino fundamentalmente a través de la mezcla biológica de partículas (es decir, bioturbación), con una contribución insignificante en la acumulación de sedimentos (Taylor, 2018).

Las tasas de acumulación de sedimentos (SAR, del inglés, Sediment Accumulation Rates) se determinan normalmente usando  $^{210}\text{Pb}$ , cuando la intensidad de la bioturbación (es decir, mezcla biológica de partículas) es baja y las tasas de acumulación son relativamente altas (mm / año a cm / año) (Harden *et al.*, 1992). Los procesos sedimentarios son muy diferentes cuando la plataforma de hielo colapsa (es decir, SAR muy bajos y una intensidad de bioturbación relativamente alta).

Cuando una plataforma de hielo colapsa, la materia orgánica fresca de la zona eufótica recién creada se deposita a través de la columna de agua, las partículas biogénicas capturan el  $^{210}\text{Pb}$  disuelto (producido a partir de su progenitor,  $^{226}\text{Ra}$ ) y lo transportan al lecho marino.

El flujo de partículas debajo de la plataforma de hielo antes del colapso era muy bajo, por tanto, la cantidad de  $^{210}\text{Pb}$  en exceso que llegaba al lecho marino era insignificante (Brachfeld *et al.*, 2003). Pero después del colapso de la plataforma de hielo, el flujo de las partículas biogénicas que transportan el exceso de  $^{210}\text{Pb}$  al fondo marino fue mejorando. Esto causó una evolución en los perfiles verticales del fondo marino, ya que representan el efecto acumulativo del  $^{210}\text{Pb}$  del transporte vertical (sedimentación de partículas) y lateral. Antes de la retirada de la plataforma de hielo, el componente vertical del flujo de partículas era muy bajo, eliminando los pocos  $^{210}\text{Pb}$  producidos dentro de la columna de agua. Se cree que el transporte lateral es una fuente intrascendente de  $^{210}\text{Pb}$  y partículas en el lecho marino, por lo que se supone que el exceso de actividades de  $^{210}\text{Pb}$  en el lecho marino antes del colapso estuvo cerca o por debajo de los límites de detección (Taylor, 2018).

## 5. CONCLUSIONES

- Los cuatro ejemplares de las especies *Aglaoprimnoa stefanii* y *Armadilloorgia cyathella* tienen una edad aproximada a la mitad de siglo. Se estima una edad aproximada a los 50 años según el conteo de anillos.
- La datación con el isótopo  $^{210}\text{Pb}$  es inviable para la estimación de edad de estas gorgonias, debido a la baja radiactividad de las muestras y al supuesto aporte discontinuo de  $^{210}\text{Pb}$  en la columna de agua en la zona antártica.
- La datación con  $^{14}\text{C}$  nos ofrece información de la edad de las gorgonias en un rango de antigüedad en el que se formaron, entre 1700-1950.
- Las tasas de crecimiento tanto axial como radial van en aumento conforme nos acercamos a la parte apical del animal. Ocurre lo contrario si hablamos de números de anillos y radio desde el eje al exterior.
- Las distintas técnicas usadas en este estudio nos dan informaciones diferentes sobre las edades de las gorgonias analizadas.
- La geoquímica de los esqueletos, demuestran una vez más, el potencial de las gorgonias antárticas para representar la historia ambiental del ambiente antártico.

## 6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Para precisar el rango de edad obtenida con el radiocarbono, sería interesante realizar estudios con corales de diferentes especies en la zona del Burwood Bank. De este modo, se podría aplicar la corrección local, y obtener un rango de edad de formación de las gorgonias mucho más preciso.

Desde el punto de vista radiométrico, sería interesante:

- Poder acceder a una o varias capas intermedias, situadas entre el interior y exterior de la muestra. Con estas nuevas muestras, podríamos verificar si el comportamiento anómalo se sigue cumpliendo o no.
- Poder medir el  $^{226}\text{Ra}$ , con mayor precisión, (como por centelleo líquido) a fin de saber cuánto  $^{210}\text{Pb}$  hay en la muestra de forma natural y cuánto se ha añadido de forma extrínseca proveniente de otras fuentes.

Por motivos de la pandemia y la falta de tiempo, no hemos podido medir el  $^{226}\text{Ra}$ , con mayor precisión, hemos supuesto el aporte constante en la columna de agua de  $^{234}\text{U}$ , asumiendo que será el representante del  $^{226}\text{Ra}$ .

- Tras la realización de este estudio, se ha comprobado la baja radiactividad de las muestras marinas (gorgonias en este caso). Con lo cual, se podría aplicar los mismos métodos a diferentes especies de gorgonias y ver si realmente ocurre lo mismo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, J. M., & Larraín, F. (2018). *Laboratorios Naturales para Chile: Ciencia e innovación con ventaja*. Ediciones UC.
- Alejandro Sánchez, F. J. (2018). Consideraciones sobre la datación de morteros de cal mediante  $^{14}\text{C}$ . PH: *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 26 (93), 122-140.
- Ambroso, S., Salazar, J., Zapata-Guardiola, R., Federwisch, L., Richter, C., Gili, J. M., & Teixidó, N. (2017). Pristine populations of habitat-forming gorgonian species on the Antarctic continental shelf. *Scientific reports*, 7(1), 1-11.
- Andrews, A. H., Cordes, E. E., Mahoney, M. M., Munk, K., Coale, K. H., Cailliet, G. M., & Heifetz, J. (2002). Age, growth and radiometric age validation of a deep-sea, habitat-forming gorgonian (*Primnoa resedaeformis*) from the Gulf of Alaska. *Hydrobiologia*, 471(1), 101-110.
- Appleby, P. G., Nolan, P. J., Gifford, D. W., Godfrey, M. J., Oldfield, F. J. A. N., Anderson, N. J., & Battarbee, R. W. (1986).  $^{210}\text{Pb}$  dating by low background gamma counting. *Hydrobiologia*, 143(1), 21-27.
- Arévalo, F. J. S., García, L. A., Ferrari, A. D., & Martínez, I. G. (2015). Datación radiocarbónica y arqueología: la experiencia del Centro Nacional de Aceleradores (Sevilla). *Menga: Revista de prehistoria de Andalucía*, (6), 95-111
- Amtz, W. (1997). Investigación antártica en biología marina situación actual, proyectos internacionales y perspectivas= Marine biological research in the Antarctic present situation, international projects, and perspectives. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica* 93(1), 13-44.
- Amtz, W., Brey, T., & Gallardo, V. (1994). Oceanography and marine biology, annual reviews. *Antarctic Zoobenthos*, 32, 241-304.
- Amtz, W., Brey, T., Gerdes, D., Gorny, M., Gutt, J., Hain, S., & Klages, M. (1992). Patterns of life history and population dynamics of benthic invertebrates under the high Antarctic conditions of the Weddell Sea. In Colombo, G., Ferrari, I., Ceccherelli, VU, Rossi, R.(eds). *Marine eutrophication and population dynamics: Proc 25th European Marine Biology Symposium*. Olsen & Olsen, Fredensborg, Denmark (pp. 221-230).
- Barnes, D. J., & Lough, J. M. (1993). On the nature and causes of density banding in massive coral skeletons. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 167(1), 91-108.
- Benítez, A. H. (1993). Caracterización de rellenos fisurales por disequilibrios isotópicos de series radiactivas naturales. El caso del batolito granítico de El Berrocal. *Estudios Geológicos*, 49(3-4), 165-174.
- Brachfeld, S., Domack, E., Kissel, C., Laj, C., Leventer, A., Ishman, S., ... & Eglinton, L. B. (2003). Holocene history of the Larsen-A Ice Shelf constrained by geomagnetic paleointensity dating. *Geology*, 31(9), 749-752.

- Brandt, A., De Broyer, C., De Mesel, I., Ellingsen, K. E., Gooday, A. J., Hilbig, B., ... & Tyler, P. A. (2007). The biodiversity of the deep Southern Ocean benthos. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1477), 39-66.
- Bremec, C., Elías, R., Calla, S., Genzano, G., Puente-Tapia, A., & Schejter, L. (2019). Polychaetes from Burdwood Bank: "Namuncurá I" Marine Protected Area and slope, SW Atlantic Ocean. *Revista de Biología Tropical*, 67, 119-135.
- Cairns, S. D. (2012). New primnoid genus and species (Alcyonacea: Primnoidae) from the southwestern Atlantic. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 125(2), 180-188.
- Cairns, S. D., & Bayer, F. M. (2009). A generic revision and phylogenetic analysis of the Primnoidae (Cnidaria: Octocorallia). *Smithsonian Contributions to Zoology*.
- Clarke, A. (2008). Antarctic marine benthic diversity: patterns and processes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 366(1-2), 48-55.
- Cochran, J. K. (1992). The oceanic chemistry of the uranium-and thorium-series nuclides. In *Uranium-series disequilibrium: applications to earth, marine, and environmental sciences*. 2. ed.
- Domack, E., Duran, D., Leventer, A., Ishman, S., Doane, S., McCallum, S., ... & Prentice, M. (2005). Stability of the Larsen B ice shelf on the Antarctic Peninsula during the Holocene epoch. *Nature*, 436(7051), 681-685.
- Druffel, E. R., King, L. L., Belostock, R. A., & Buesseler, K. O. (1990). Growth rate of a deep-sea coral using <sup>210</sup>Pb and other isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(5), 1493-1499.
- El-Daoushy, F. (1988). A summary on the lead-210 cycle in nature and related applications in Scandinavia. *Environment International*, 14(4), 305-319.
- Elias-Piera, F., Rossi, S., Gili, J. M., & Orejas, C. (2012). Trophic ecology of seven Antarctic gorgonians through stable isotope analysis and biochemical balance.
- Elices Calafat, M. (1995). Discurso de investidura como Doctor Honoris Causa del Profesor Doctor Manuel Elices Calafat.
- Farias, Robison Fernandes. (2002). A química do tempo: carbono 14. QNESC, v.16, 6-8.
- Figuroa-Guzmán, J. (2014). Jardines de gorgonias en la consta de Manabí, Ecuador.. *Revista N°4/septiembre*, 52(55), 52.
- Fleer, A. P., & Bacon, M. P. (1984). Determination of <sup>210</sup>Pb and <sup>210</sup>Po in sea water and marine particulate matter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 223(2-3), 243-249.
- Francisco, J. A. S., Lima, A. A., & Arçari, D. P. (2011). Datação por carbono-14. *The Carbon-14*.
- García-Orellana, I., & García-León, M. (2002). An easy method to determine <sup>210</sup>Po and <sup>210</sup>Pb by alpha spectrometry in marine environmental samples. *Applied Radiation and Isotopes*, 56(4), 633-636.
- Gili, JM (1998). Trophic ecology of some species of sessile benthic suspensivores in the Weddel Sea. A CS-EASIZ program.
- Gili, J. M., Madurell, T., Requena, S., Orejas, C., Gori, A., Purroy, A., ... & Grinyó, J. (2011). Caracterización física y ecológica del área marina del Cap de Creus: Informe final área LIFE+ INDEMARES (LIFE07/NAT/E/000732).
- Grigg, R. W. (1974). Growth rings: annual periodicity in two gorgonian corals. *Ecology*, 55(4), 876-881.
- Grigg, R. W. (1976). Fishery management of precious and stony corals in Hawaii. *Contribution-Hawaii. Institute of Marine Biology (USA)*.
- Gutt, J. (1991). Are Weddell sea holothurians typical representatives of the Antarctic benthos? A comparative study with new results. *Meeresforschung (Hamburg)*, 33(4), 312-329.
- Gutt, J., & Piepenburg, D. (1991). Dense aggregations of three deep-sea holothurians in the southern Weddell Sea, Antarctica. *Marine Ecology Progress Series*, 277-285.

- Hallstadius, L. (1984). A method for the electrodeposition of actinides. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*.
- Harden, S. L., DeMaster, D. J., & Nittrouer, C. A. (1992). Developing sediment geochronologies for high-latitude continental shelf deposits: a radiochemical approach. *Marine Geology*, 103(1-3), 69-97.
- Heaton, T. J., Köhler, P., Butzin, M., Bard, E., Reimer, R. W., Austin, W. E., ... & Skinner, L. C. (2020). Marine20—the marine radiocarbon age calibration curve (0–55,000 cal BP). *Radiocarbon*, 62(4), 779-820.
- Hötzl, H., & Winkler, R. (1987). Activity concentrations of <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb, <sup>40</sup>K and <sup>7</sup>Be and their temporal variations in surface air. *Journal of Environmental Radioactivity*, 5(6), 445-458.
- Jori, N., Ferreyra, L. L., & Capparelli, A. L. (2017). Actínidos y más allá. *Industria & Química*.
- Juárez-de la Rosa, B. A. (2002). Caracterización y análisis del patrón de anillos de crecimiento en dos especies de coral negro (Cnidaria: Antipatharia). (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México).
- Kotz, J. C., Treichel, P. M., Townsend, J., & Treichel, D. (2014). Chemistry & chemical reactivity. Cengage Learning.
- La Mesa, M., Riginella, E., Melli, V., Bartolini, F., & Mazzoldi, C. (2016). Biological traits of a sub-Antarctic nototheniid, *Patagonotothen ramsayi*, from the Burdwood Bank. *Polar Biology*, 39(1), 103-111.
- López-González, P. J. (2020). A new calceonian genus and family for *Trichogorgia utinomii* Cordeiro, 2019 (Octocorallia, Alcyonacea): new records of a scleriteless gorgonian species from Antarctica. *Marine Biodiversity*, 50(6), 1-13.
- López González, P. J., Gili, J. M., & Orejas, C. (2002). A new primnoid genus (Anthozoa: Octocorallia) from the Southern Ocean. *Scientia Marina*, 66 (4), 383-397.
- López Guerrero, L. (2018). Estudio de las Relaciones de Equilibrio y Desequilibrio de la Actividad Gamma Ambiental.
- López, J. A. B., Esquivel, F. J., & Guerrero, J. A. E. (2015). Nuevas aportaciones al estudio métrico y geométrico del dolmen de Viera (Antequera, Andalucía). *Menga: Revista de prehistoria de Andalucía*, (6), 201-208.
- Martínez-Aguirre, A. (1991). Radiactividad natural en diversos compartimentos naturales de Andalucía. (Tesis Doctoral Inédita). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Mantero Cabrera, J. (2013). Avances en Espectrometría Alfa y Gamma para su Aplicación en la Evaluación del Impacto Radiactivo de una Industria NORM (Doctoral dissertation). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Martínez-Dios, A. (2014). New insights about Antarctic gorgonians (Octocorallia, Primnoidae) age, growth and their potential as paleorecords.
- Martínez-Dios, A., Dominguez-Carrió, C., Zapata-Guardiola, R., & Gili, J. M. (2016). New insights on Antarctic gorgonians' age, growth and their potential as paleorecords. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 112, 57-67.
- Orejas, C., Gili, J., López-González, P. J., & Arntz, W. (2001). Feeding strategies and diet composition of four Antarctic cnidarian species. *Polar Biology*, 24(8), 620-627.
- Orejas, C., Gili, J. M., López-González, P. J., Hasemann, C., & Arntz, W. E. (2007). Reproduction patterns of four Antarctic octocorals in the Weddell Sea: an inter-specific, shape, and latitudinal comparison. *Marine Biology*, 150(4), 551-563.
- Parker, S. J., & Bowden, D. A. (2010). Identifying taxonomic groups vulnerable to bottom longline fishing gear in the Ross Sea region. *CCAMLR Science*, 17, 105-127.
- Peck, L. S., & Brockington, S. (2013). Growth of the Antarctic octocoral *Primnoella scotiae* and predation by the anemone *Dactylanthus antarcticus*. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 92, 73-78.

- Peck, L. S., Convey, P., & Barnes, D. K. (2006). Environmental constraints on life histories in Antarctic ecosystems: tempos, timings and predictability. *Biological reviews*, *81*(1), 75-109.
- Peck, L. S., Morley, S. A., Richard, J., & Clark, M. S. (2014). Acclimation and thermal tolerance in Antarctic marine ectotherms. *Journal of Experimental Biology*, *217*(1), 16-22.
- Pérez, A. R. (2009). Límites de la geocronología en el estudio de yacimientos de época histórica. *Monográfico: Dataciones radiocarbónicas de yacimientos de época histórica. Introducción*, *60*, 331-347.
- Raygoza-Viera, J. R., Ruiz-Fernández, A. C., Ruelas-Inzunza, J., Alonso-Hernández, C., Pérez-Bernal, L. H., & Páez-Osuna, F. (2014). Accumulation and distribution of Hg and 210 Pb in superficial sediments from a coastal lagoon in the SE Gulf of California associated with urban-industrial and port activities. *Environmental Earth Sciences*, *72*(8), 2729-2739.
- Risk, M. J., Heikoop, J. M., Snow, M. G. & Beukens, R. (2002). Lifespans and growth patterns of two deep-sea corals: *Primnoa resedaeformis* and *Desmophyllum cristagalli*. *Hydrobiologia*, *471*(1), 125-131.
- Rogers, A. D. (2012). Evolution and biodiversity of Antarctic organisms: a molecular perspective. *Antarctic ecosystems: An extreme environment in a changing world*, 417-467.
- Rosenberg, R. (1995). Benthic marine fauna structured by hydrodynamic processes and food availability. *Netherlands Journal of Sea Research*, *34*(4), 303-317.
- Sanchez-Cabeza, J. A., Díaz-Asencio, M., & Ruiz-Fernández, A. C. (2012). Radiocronología de sedimentos costeros utilizando 210Pb: modelos, validación y aplicaciones. *Vienna: IAEA*.
- Schejter, L., Genzano, G., Gaitán, E., Perez, C. D., & Bremec, C. S. (2020). Benthic communities in the Southwest Atlantic Ocean: Conservation value of animal forests at the Burdwood Bank slope. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *30*(3), 426-439.
- Schejter, L., Rimondino, C., Chiesa, I., De Astarloa, J. M. D., Doti, B., Elías, R., ... & Bremec, C. S. (2016). Namuncurá Marine Protected Area: an oceanic hot spot of benthic biodiversity at Burdwood Bank, Argentina. *Polar Biology*, *39*(12), 2373-2386.
- Sherwood, O. A., & Edinger, E. N. (2009). Ages and growth rates of some deep-sea gorgonian and antipatharian corals of Newfoundland and Labrador. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *66*(1), 142-152.
- Sherwood, O. A., Scott, D. B., & Risk, M. J. (2006). Late Holocene radiocarbon and aspartic acid racemization dating of deep-sea octocorals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *70*(11), 2806-2814.
- Sherwood, O. A., Scott, D. B., Risk, M. J., & Guilderson, T. P. (2005). Radiocarbon evidence for annual growth rings in the deep-sea octocoral *Primnoa resedaeformis*. *Marine Ecology Progress Series*, *301*, 129-134.
- Smith, I. J., Stevens, D. P., Heywood, K. J., & Meredith, M. P. (2010). The flow of the Antarctic Circumpolar Current over the North Scotia Ridge. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *57*(1), 14-28.
- Smith, R. C., & Stammerjohn, S. E. (2001). Variations of surface air temperature and sea-ice extent in the western Antarctic Peninsula region. *Annals of Glaciology*, *33*, 493-500.
- Taylor, R. (2018). Quantifying Labile Organic Carbon Dynamics in Antarctic Peninsula Sediments: A Radiocarbon Approach.
- Thatje, S., Anger, K., Calcagno, J. A., Lovrich, G. A., Pörtner, H. O., & Arntz, W. E. (2005). Challenging the cold: crabs reconquer the Antarctic. *Ecology*, *86*(3), 619-625.
- Vernet, M., & Cape, M. R. (2019). Ecosistemas marinos antárticos después del rompimiento de barreras de hielo. *Cuadernos de Investigación UNED*, *11*(1), 36-43.
- Worbes, M., Staschel, R., Roloff, A., & Junk, W. J. (2003). Tree ring analysis reveals age structure, dynamics and wood production of a natural forest stand in Cameroon. *Forest Ecology and Management*, *173*(1-3), 105-123.

Zapata-Guardiola, R. (2014). Diversity and Evolution of Antarctic gorgonians (Octocorallia, Primnoidae), Distribution, Growth and Reproductive patterns (Doctoral dissertation, PhD Thesis. Universidad de Sevilla, Sevilla).

## 8. APÉNDICE

El equilibrio secular se da cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- Cuando el hijo tiene una probabilidad de desintegración mucho mayor que la del padre, o lo que es lo mismo, la semivida del padre es mucho mayor que la del hijo y su nieto.
- El tiempo transcurrido desde la recogida de la muestra hasta su estudio en el laboratorio debe de ser varias veces mayor que la semivida de la descendencia.
- En general, la condición de equilibrio secular se cumple cuando han transcurrido como mínimo 5 períodos de semidesintegración de la descendencia.

Las ecuaciones que gobiernan el equilibrio secular son las siguientes:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1(t)}{dt} &= -\lambda_1 N_1(t) \\ \frac{dN_2(t)}{dt} &= \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t) \end{aligned}$$

Donde  $N_i(t)$  es el número de átomos del radionucleido en el instante  $t$ , y  $\lambda$  su densidad de probabilidad de desintegración por unidad de tiempo (relacionada inversamente con su período de semidesintegración).

Si Observamos la parte inferior de la serie del  $^{238}\text{U}$  que nos interesa (parte inferior de la Figura 9). El  $^{210}\text{Pb}$  decae vía  $^{210}\text{Bi}$  hasta  $^{210}\text{Po}$ . El padre posee una semivida de 22 años, muy superior a la de su descendencia., tanto del  $^{210}\text{Bi}$  como del  $^{210}\text{Po}$ , por lo que una de las condiciones ya se está cumpliendo.

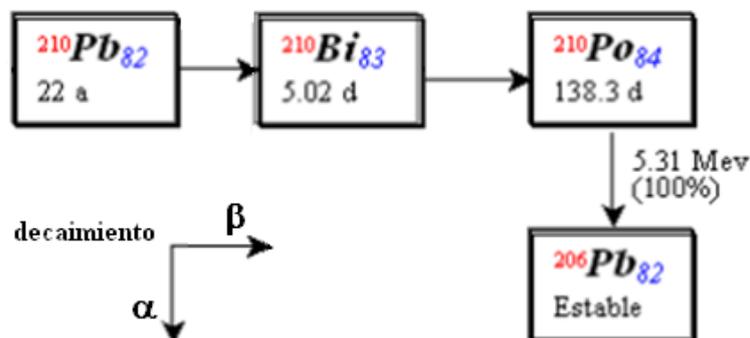


Figura A.1 Final de la serie radiactiva del  $^{238}\text{U}$ .

Para que se cumpla otra de las condiciones habrá que esperar que pasen varias semividas en la descendencia, y el que marca la pauta en este sentido es el  $^{210}\text{Po}$  (por ser el de mayor semivida).

Con la siguiente expresión  $[\text{T}_{1/2}]_1 \gg [\text{T}_{1/2}]_2, [\text{T}_{1/2}]_3$  podemos demostrar que tras 2 años aproximadamente, ya ha transcurrido el tiempo necesario para considerar que estamos en situación de equilibrio secular en esa cadena, pudiendo aplicar la expresión:

$$A_1(\text{Bq}) \sim A_2(\text{Bq}) \sim A_3(\text{Bq})$$

Este hecho será utilizado en la cuantificación del  $^{210}\text{Pb}$ , asumiendo equilibrio secular entre el padre ( $^{210}\text{Pb}$ ) y el hijo ( $^{210}\text{Po}$ ) puesto que el tiempo transcurrido antes de medir las muestras así lo garantiza.

Ambas expresiones vienen determinadas de las ecuaciones gobernantes, al aplicarles:

- Para resolver esas ecuaciones diferenciales necesitaremos unas condiciones de contorno. En nuestro caso, para el instante  $t = 0$  impondremos que no exista ningún núcleo hijo,  $N_2(0) = 0$ .
- Tras resolverlo, las soluciones adoptan la forma dada por

$$N_1(t) = N_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2(t) = N_1(0) \cdot (\lambda_1 / \lambda_2 - \lambda_1) \cdot (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t})$$

- Examimando dichas expresiones, vemos que si se cumple la condición de que  $(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot t \gg 1$
- se podría despreciar el término exponencial de  $N_2(t)$  en quedando entonces como:

$$N_2(t) = N_1(0) \cdot (\lambda_1 / \lambda_2 - \lambda_1)$$

- Y como la actividad es proporcional al número de átomos de la forma:  $A_i = \lambda_i N_i$  la expresión [2.6] quedaría como:

$$A_2(t) / A_1(t) = \lambda_2 / \lambda_2 - \lambda_1$$