



Caracterización de radionúclidos en los sedimentos marinos del monte submarino Orca, bahía Almirantazgo y ensenada Mackellar

Characterization of radionuclides in the marine sediments of Orca Seamount, Admiralty Bay, and Mackellar Cove

Víctor Raul Poma-Llantoy¹, Pablo Antonio Mendoza-Hidalgo¹ y Constanza Ricaurte-Villota^{2*}

0000-0003-2500-1301

0000-0002-6029-8705

0000-0003-1554-4994

1. Instituto Peruano de Energía Nuclear, Avenida Canadá 1470, San Borja, Lima, Perú. vpoma@ipen.gob.pe; pmendoza@ipen.gob.pe

2. Programa de Geociencias Marinas y Costeras, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" (Invemar), Calle 25 #2-55, Playa Salguero, Rodadero. Santa Marta, Colombia. constanza.ricaurte@invemar.org.co

* Autor de correspondencia.

RESUMEN

La contaminación por elementos radioactivos y su transferencia a través de la cadena trófica puede llegar a tener efectos nocivos en los ecosistemas y la salud humana siendo por ello importante su monitoreo continuo. El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar la concentración de radionúclidos de origen natural y antropogénico en sedimentos marinos de tres áreas en el noroccidente de la Antártica, monte submarino Orca, bahía Almirantazgo y ensenada Mackellar, con el fin de evaluar posibles niveles de riesgo, fuentes y rutas de transporte. Las mediciones se realizaron usando un espectrómetro Canberra de alta resolución y la precisión y exactitud metodológica fue evaluada mediante el análisis de materiales de referencia certificada del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), SOIL-6 y Moss SOIL-447. Los resultados mostraron una baja concentración de actividad del ¹³⁷Cs en los sedimentos marinos, disminuyendo hacia la zona profunda, validando la vía atmosférica como ruta principal de transporte de este radionúclido de origen antrópico. La concentración de actividad de los radionúclidos de origen natural ²²⁶Ra y ⁴⁰K, confirman el origen volcánico de la región, corroborando las etapas de evolución geológica del sector, y los cambios en la fuente de material al manto. Los índices de peligro de radiación calculados mostraron que las concentraciones de actividad actuales de los elementos radioactivos no representan un riesgo para la salud. Resulta importante a futuro mejorar el entendimiento de la relación del hidrotermalismo en la zona con la concentración de actividad de radionúclidos de origen natural.

PALABRAS CLAVE: ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, Antártica, contaminación radioactiva, vigilancia radiológica

ABSTRACT

Contamination by radioactive elements and their transfer through the trophic chain can have harmful effects on ecosystems and human health, therefore its continuous monitoring is important. The present study aimed to characterize the concentration of radionuclides of natural and anthropogenic origin in marine sediments from three areas in the northwest of Antarctica, Orca Seamount, Admiralty Bay and Mackellar Inlet, in order to evaluate possible risk levels, sources and transportation routes. Measurements were made using a high-resolution Canberra spectrometer and methodological precision and accuracy was assessed by analyzing reference materials certified by the International Atomic Energy Agency (IAEA), SOIL-6 and Moss SOIL-447. The results showed a low concentration of ¹³⁷Cs activity in the marine sediments, decreasing towards the deep zone, validating the atmospheric pathway as the main transport route for this radionuclide of anthropic origin. The activity concentration of radionuclides of natural origin ²²⁶Ra and ⁴⁰K, confirm the volcanic origin of the region, corroborating the geological evolution stages of the sector, and the changes in the source of material to the mantle. The calculated radiation hazard indexes showed that current activity concentrations of radioactive elements do not pose a health risk. It is important in the future to improve the understanding of the relationship between hydrothermalism in the area and the activity concentration of radionuclides of natural origin.

KEYWORDS: ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, Antarctic, Radioactive contamination, Radiation monitoring

DOI: <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.SuplEsp.960>

Publicado por INVEMAR

Este es un manuscrito de acceso abierto bajo la licencia CC

Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual

Published by INVEMAR

This is an open Access article under the CC BY-NC-SA

INTRODUCCIÓN

El continente Antártico ha sido considerado una de las regiones más prístinas y vírgenes del planeta, además de encontrarse geográficamente aislado de otros continentes (Cary *et al.*, 2010). A pesar de estar alejada de las mayores fuentes de elementos radioactivos como el hemisferio norte y el Pacífico occidental (Friedlander *et al.*, 2005), la atmósfera y el medio marino de la región polar ya ha sido afectado por las actividades humanas (Focardi *et al.*, 1993; Legrand y Mayewski, 1997; Bargagli, 2000). Adicionalmente, debido al aumento de las actividades del hombre en los continentes y al impacto del cambio climático, las condiciones ambientales en esta zona están cambiando apresuradamente, siendo las huellas antrópicas en la Antártica pequeñas en comparación al tamaño total del continente, sin embargo, los impactos no se distribuyen de manera uniforme (Bhardwaj *et al.*, 2018).

A lo largo del mundo se han realizado grandes esfuerzos para la caracterización y monitoreo de elementos radioactivos (Friedlander *et al.*, 2005), debido a su impacto en los ecosistemas y en la salud humana, ya que estos pueden ser transferidos a través de la cadena trófica, resultando en una concentración generalmente más alta dentro de los organismos de los niveles superiores de la cadena, lo que es conocido como biomagnificación (Connell, 1989). Los radionúclidos pueden ser de origen natural como el ^{226}Ra , ^{214}Pb , ^{208}Tl , ^{214}Bi , ^{228}Ac y ^{40}K , pero también pueden proceder exclusivamente de procesos antropogénicos, principalmente derivados de explosiones nucleares, como el ^{137}Cs (Ferreira *et al.*, 2013). Aunque el cese de pruebas nucleares atmosféricas en la década de los 80s, y el decaimiento asociado a su periodo de semidesintegración y dilución, han producido una reducción en las concentraciones de ^{137}Cs en las últimas décadas (Friedlander *et al.*, 2005), aún existe la señal de este radionúclido en el ambiente marino. Adicionalmente, accidentes nucleares como los de Chernobyl y Fukushima, han liberado nuevamente grandes cantidades de radionúclidos al medio ambiente (Marzano y Triulzi, 1994; Matisoff *et al.*, 2011).

Para la región Antártica, islas Shetland del Sur y la bahía Almirantazgo, existen varios estudios de radionúclidos, los cuales se han enfocado en una variedad de matrices como material biológico terrestre y marino, suelos superficiales y sedimentos marinos (Ross *et al.*, 1994; Godoy *et al.*, 1998; Mietelski *et al.*, 2008; Sanders *et al.*, 2010; Ferreira *et al.*, 2013). La mayoría de los cuales se han

INTRODUCTION

The Antarctic continent has been considered one of the most pristine and unspoiled regions on the planet, in addition to being geographically isolated from other continents (Cary *et al.*, 2010). Despite being an area far from the major sources of radioactive elements such as the northern hemisphere and the western Pacific (Friedlander *et al.*, 2005), the atmosphere and the marine environment of the polar region have already been affected by human activities (Focardi *et al.*, 1993; Legrand and Mayewski, 1997; Bargagli, 2000). Additionally, due to the increase in human activities on the continents and the impact of climate change, the environmental conditions in this area are rapidly changing, with anthropic footprints in Antarctica being small compared to the total size of the continent, however, the impacts are not uniformly distributed (Bhardwaj *et al.*, 2018).

Throughout the world, great efforts have been made for the characterization and monitoring of radioactive elements (Friedlander *et al.*, 2005), due to their impact on ecosystems and human health, since these can be transferred through the trophic chain, resulting in a generally higher concentration within the higher levels organisms of the chain, which is known as Biomagnification (Connell, 1989). Radionuclides can be of natural origins such as ^{226}Ra , ^{214}Pb , ^{208}Tl , ^{214}Bi , ^{228}Ac , and ^{40}K , but they can also come exclusively from anthropogenic processes, mainly derived from nuclear explosions, such as ^{137}Cs (Ferreira *et al.*, 2013). Although the cessation of atmospheric nuclear tests in the 1980s, and the decay associated with its half-life and dilution, have produced a reduction in ^{137}Cs concentrations in recent decades (Friedlander *et al.*, 2005), the signal of this radionuclide still exist in the marine environment. Additionally, nuclear accidents like those of Chernobyl and Fukushima, have again released large amounts of radionuclides into the environment (Marzano and Triulzi, 1994; Matisoff *et al.*, 2011).

For the Antarctic region, in the South Shetland Islands and Admiralty Bay, there are several studies of radionuclides, which have focused on a variety of matrices such as terrestrial and marine biological material, surface soils, and marine sediments (Ross *et al.*, 1994; Godoy *et al.*, 1998; Mietelski *et al.*, 2008; Sanders *et al.*, 2010; Ferreira *et al.*, 2013). Most of which have focused on the concentration of radioactive elements and their spatial

enfocado en la concentración de elementos radioactivos y sus cambios espaciales y temporales, pero pocos trabajos se han enfocado en analizar el riesgo radiológico, con excepción de Godoy *et al.* (1998).

Aunque parece ser claro que la principal fuente de transporte de los radionúclidos de origen antrópico, como el ^{137}Cs , es a través de la circulación atmosférica (Godoy *et al.*, 1998), poco se conoce de su transporte hacia las zonas profundas del océano. Así mismo, existe menos conocimiento de las fuentes y principales rutas de transporte de los radionúclidos de origen natural. Teniendo en cuenta que los sedimentos marinos registran materiales provenientes de las zonas continentales adyacentes, las cuencas oceánicas, así como elementos transportados por las corrientes o depositados en la superficie del mar y posteriormente llevados al fondo del océano, estos pueden ser útiles en el estudio de la concentración de radionúclidos.

Este estudio tuvo como objetivo caracterizar la concentración de radionúclidos de origen natural y antropogénico en sedimentos marinos de localidades con influencias contrastantes, en la isla Rey Jorge y estrecho de Bransfield (Antártica), con el fin de establecer una línea base para definir el nivel de riesgo radiológico para el ambiente y la salud humana en las zonas de muestreo. De igual manera, a partir de la distribución de las concentraciones definir las posibles fuentes y rutas de transporte de los elementos radioactivos estudiados.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la zona noroccidental del continente antártico, en donde se visitaron tres localidades, el monte Submarino Orca (estrecho de Bransfield), la bahía Almirantazgo y la ensenada MacKellar (islas Shetland del Sur) (figura 1). El monte submarino Orca, ubicado aproximadamente entre la latitud 62,20 a 62,30° S y la longitud 58,14 a 58,42° W, corresponde a un emplazamiento volcánico directamente asociado a la depresión tectónica de la zona de rift en un ambiente de trasarco, resultado de procesos de subducción entre las placas Fenix y Antártica (Lawver *et al.*, 1996). Aún se desconoce si es un área con actividad hidrotermal, pero en el área del estrecho de Bransfield si se ha identificado hidrotermalismo activo, asociado a la presencia de centros volcánicos, siendo el más importante el que se encuentra en isla Decepción. Las profundidades en Orca van entre 600 m en la cúspide de las paredes del monte y 1600 m en los fondos externos adyacentes a la falda del mismo.

and temporal changes, but few works have focused on analyzing radiological risk, except for Godoy *et al.* (1998).

Although it seems to be clear that the main source of transport of radionuclides of anthropic origin, such as ^{137}Cs , is through atmospheric circulation (Godoy *et al.*, 1998), little is known about their transport to the deep areas of the ocean. Likewise, there is less knowledge of the sources and main transport routes of radionuclides of natural origin. Taking into account that marine sediments record materials from adjacent continental areas, ocean basins, as well as elements transported by currents or deposited on the sea surface and subsequently carried to the ocean floor, these can be useful in the study of the concentration of radionuclides.

This study aimed to characterize the concentration of radionuclides of natural and anthropogenic origin in marine sediments from localities with contrasting influences, on King George Island and Bransfield Strait (Antarctica), to establish a baseline to define the level of radiological risk for the environment and human health in the sampling areas. In the same way, from the distribution of the concentrations, the possible sources and transport routes of the radioactive elements studied were defined.

STUDY AREA

The study area corresponds to the northwestern part of the Antarctic continent, where 3 locations were visited, the Orca Submarine Mount (Bransfield Strait), Admiralty Bay, and MacKellar Inlet (South Shetland Islands) (figure 1). Mount Submarine Orca, located approximately between Latitude 62.20 to 62.30° S and Longitude 58.14 to 58.42° W, which corresponds to a volcanic site directly associated with the tectonic depression of the rift zone in a post-arc environment, the result of subduction processes between the Fenix and Antarctic plates (Lawver *et al.*, 1996). It is still unknown if it is an area with hydrothermal activity, but in the Bransfield Strait area, active hydrothermalism has been identified, associated with the presence of volcanic centers, the most important being the one on Deception Island. The depths in Orca range between 600 m at the top of the mountain walls and 1600 m at the external bottoms adjacent to the slope of the mountain.

Admiralty Bay is located on King George Island, being the largest bay in the South Shetland Islands (Ferreira *et al.*, 2012). The Bay in nature is similar to a

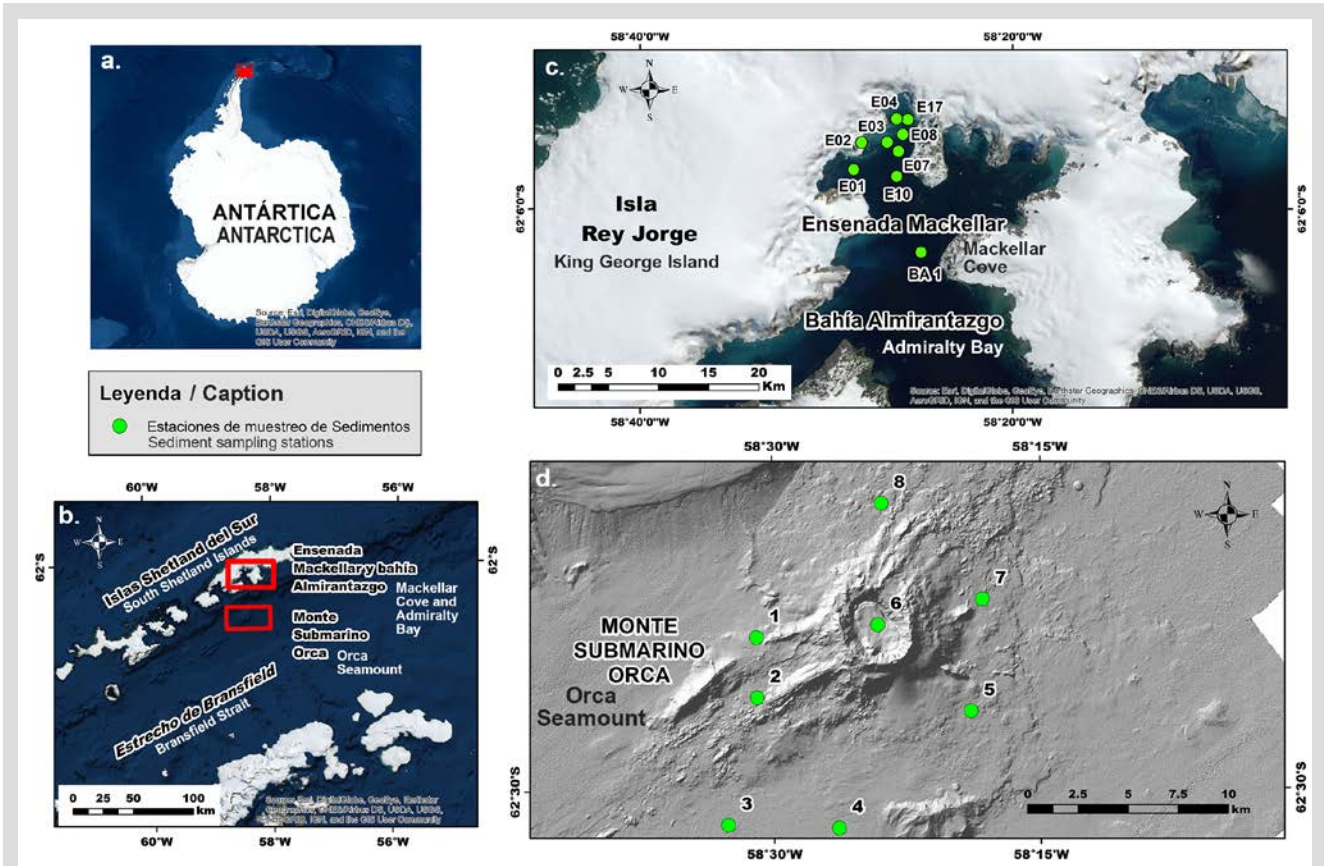


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio en el continente Antártico; **a.** mostrando la ubicación del monte submarino Orca, bahía Almirantazgo y ensenada Mackellar; **b.** y el detalle de las estaciones de colecta de sedimentos marinos en cada una de las localidades; **c.** y **d.** Imágenes tomadas de Google Earth.

Figure 1. Geographic location of the study area on the Antarctic continent; **a.** showing the location of the Orca Seamount, Admiralty Bay, and Mackellar Cove; **b.** and details of the marine sediment collection stations in each of the locations; **c.** and **d.** Images were taken from Google Earth.

La bahía Almirantazgo se encuentra ubicada en la isla Rey Jorge, siendo la bahía más grande en las islas Shetland del Sur (Ferreira *et al.*, 2012). La bahía en su naturaleza es parecida a un fiordo, con tres ramas: ensenada Ezcurra al sudoeste, Mackellar al norte y Martel al noreste (Rakusa-Suszczewski, 1980; 1995). Tiene una superficie que cubre 122,08 km², de los cuales el cuerpo principal es 52,3 %, además una profundidad promedio de 198,6 m, pero el punto más profundo puede alcanzar 535 m (Rakusa-Suszczewski, 1995).

Por su parte, la ensenada Mackellar, como se dijo anteriormente, se encuentra dentro de la bahía Almirantazgo, hacia el norte, y en ella se encuentra localizada la Estación Científica Antártica Machu Picchu, que pertenece a Perú. Mackellar y las otras ensenadas de la bahía son más someras que el cuerpo principal (Rakusa-Suszczewski, 1995) y se encuentra más influenciada por los aportes de los glaciares, los cuales han modelado su morfología. Las

fiord, with three branches: Inlet Ezcurra to the southwest, Mackellar to the north, and Martel to the northeast (Rakusa-Suszczewski, 1980; 1995). It has a surface that covers 122.08 km², of which the main body is 52.3 %, and an average depth of 198.6 m, but the deepest area can reach 535 m (Rakusa-Suszczewski, 1995).

For its part, the Mackellar Cove, as mentioned above, is located within the Admiralty Bay, to the north, and the Machu Picchu Antarctic Scientific Station, which belongs to Peru, is located there. Mackellar and the other inlets of the bay are shallower than the main body (Rakusa-Suszczewski, 1995) and are more influenced by the contributions of glaciers, which have shaped their morphology. The hydrological and also hydrochemical conditions of the Inlet are very different from those of the main body of the bay, as well as the suspended material, which has higher concentrations in this area (Rakusa-Suszczewski, 1995), possibly contributed by icebergs.

condiciones hidrológicas y también hidroquímicas de la ensenada son muy diferentes de las del cuerpo principal de la bahía, así como el material suspendido, que tiene mayores concentraciones en esta zona (Rakusa-Suszczewski, 1995), posiblemente aportado por los icebergs.

MATERIALES Y MÉTODOS

Colección y tratamiento de muestras

La recolección de muestras de sedimento marino se llevó a cabo durante el segundo crucero de la Vigésimo Sexta Campaña Científica del Perú a la Antártida - ANTAR XXVI, realizado entre 24 de enero y 19 de febrero de 2019, en el marco del proyecto “Caracterización radiológica de los sedimentos extraídos de la profundidad del mar en el estrecho de Bransfield y muestras ambientales en la ECAMP”. Las muestras recolectadas correspondieron de la siguiente manera: siete muestras de sedimento en el monte submarino Orca, una muestra de sedimento en la bahía Almirantazgo y siete muestras en los alrededores de la ensenada Mackellar (Figura 1). Adicionalmente, se obtuvieron datos de mediciones radiométricas en muestras de sedimentos marinos recolectadas en la ensenada Mackellar entre 1997 y 2001 y de calicatas recolectadas alrededor de la estación peruana de Macchu Pichu situada en Punta Crepin. Las muestras fueron recolectadas mediante draga Van Veen a profundidades de fondo entre 15 m y 30 m en la ensenada Mackellar, 423 m en la bahía almirantazgo, y entre 1080 m y 1636 m en el monte submarino Orca. Posterior a su colecta las muestras fueron depositadas en bolsas de polietileno precintadas y refrigeradas a 4 °C por dos meses, para luego ser secadas a 105 °C por toda la noche, tamizadas a un diámetro inferior a 0,5 mm y llevadas al laboratorio para su acondicionamiento y medición.

En la Tabla 1 se muestran los detalles de los puntos de muestreo de sedimentos extraídos alrededor del monte submarino Orca. Se planificaron ocho puntos de los cuales el punto 2 (MOS2_sed) no se recolectó debido a tres lances fallidos de la draga. Para cada muestra se recolectó 2 kg de masa aproximadamente y se midió la tasa de dosis, siendo en algunos casos menores al fondo natural (0,01 μSv/h).

MATERIALS AND METHODS

Collection and treatment of samples

The collection of marine sediment samples was carried out during the second cruise of the Twenty-sixth Scientific Campaign of Peru to Antarctica - ANTAR XXVI, carried out between January 24 and February 19, 2019, within the framework of the project “Characterization radiological analysis of the sediments extracted from the depth of the sea in the Bransfield Strait and environmental samples in the ECAMP”. The collected samples corresponded as follows: 7 sediment samples in the Orca seamount, 1 sediment sample in Admiralty Bay, and 7 samples in the surroundings of Mackellar Inlet (Figure 1). Additionally, data from radiometric measurements were obtained from marine sediment samples collected from Mackellar Inlet between 1997 and 2001 and from pits around the Peruvian station of Macchu Pichu located in Punta Crepin. The samples were collected by Van Veen dredge at bottom depths between 15 m and 30 m in Mackellar Inlet, 423 m in Admiralty Bay, and between 1080 m and 1636 m in Seamount Orca. After their collection, the samples were placed in sealed polyethylene bags and refrigerated at 4 °C for two months, and then dried at 105 °C overnight, sieved to a diameter of less than 0.5 mm, and taken to the laboratory for its conditioning and measurement.

Table 1 shows the details of the sediment sampling points extracted around the Orca seamount. 08 points were planned of which point 2 (MOS2_sed) was not collected due to 03 unsuccessful dredge sets. Approximately 2 kg of mass was collected for each sample and the dose rate was measured, in some cases being less than the natural background (0.01 μSv/h).

Tabla 1. Datos de los puntos de muestreo de sedimentos recolectados alrededor del monte submarino Orca.

Estación / Station	Código de muestra / Sample code	Coordenadas geográficas / Coordinates Geographic		Fecha de muestreo / Date Sampling	Profundidad / Depth (m)	Tasa de dosis / Dose rate ($\mu\text{Sv/h}$)
		Latitud / Latitude	Longitud / Longitude			
1	MOS1_Sed	S62° 26.053'	W58° 30.920'	03/02/2019	1249	0.02
3	MOS3_Sed	S62° 30.925'	W58° 32.578'	03/02/2019	1628	< 0.01
4	MOS4_Sed	S62° 31.021'	W58° 26.348'	04/02/2019	1636	< 0.01
5	MOS5_Sed	S62° 27.997'	W58° 18.900'	04/02/2019	1553	0.02
6	MOS6_Sed	S62° 25.745'	W58° 24.114'	04/02/2019	1080	0.02
7	MOS7_Sed	S62° 25.539'	W58° 18.14'	04/02/2019	1605	0.02
8	MOS8_Sed	S62° 22.590'	W58° 23.880'	04/02/2019	1392	< 0.01

Table 1. Data from sediment sampling points collected around Orca Seamount.

Los detalles de los puntos de muestreo de los sedimentos extraídos en la bahía de Almirantazgo y alrededores de la ensenada Mackellar se describen la Tabla 2. Para cada muestra se recolectó entre 0,5 y 1 kg de masa aproximadamente y se midió la tasa de dosis, siendo en todos los casos ligeramente mayor al fondo natural ($0,01\mu\text{Sv/h}$).

The details of the sampling points of the sediments extracted in the Admiralty Bay and the surroundings of the Mackellar Inlet are described in Table 2. For each sample between 0.5 kg and 1 Kg of mass approximately was collected and the dose rate measured, being in all cases slightly higher than the natural background ($0.01\mu\text{Sv/h}$).

Tabla 2. Datos de los puntos de muestreo de sedimentos recolectados en bahía de Almirantazgo e interiores de la ensenada Mackellar (estaciones 2-17).

Estación / Station	Código de muestra / Sample code	Coordenadas geográficas / Coordinates Geographic		Fecha de muestreo / Date Sampling	Profundidad / Depth (m)	Tasa de dosis / Dose rate ($\mu\text{Sv/h}$)
		Latitud / Latitude	Longitud / Longitude			
Bahía de Almirantazgo / Admiralty Bay	BA1	S62°7'39"	W58°25'18"	12/02/2019	423	0.02
2	E02	N62°08'071"	E58°46'372"	05/02/2019	37	0.02
3	E03	N62°07'289"	E58°44'242"	05/02/2019	27	0.02
4	E04	N62°06'672"	E58°42'397"	02/02/2019	37	0.02
7	E07	N62°08'237"	E58°43'169"	05/02/2019	41	0.02
8	E08	N62°07'596"	E58°42'579"	02/02/2019	40	0.02
10	E10	N62°09'664"	E58°43'375"	05/02/2019	102	0.02
17	E17	N62°06'361"	E58°42'306"	05/02/2019	46	0.02

Table 2. Data from sediment sampling points collected in Admiralty Bay and interior of Mackellar Cove (Station 2-17).

Análisis de muestras

Para la medición de los radionúclidos de interés: ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{208}Tl , ^{214}Bi , ^{228}Ac y ^{40}K se acondicionó entre 180 a 380 g de muestra seca, en envases de polipropileno de 300 cm³ de volumen (diámetro 8,2 cm, altura 5 cm), los cuales fueron sellados herméticamente, pesados en balanza de 1 mg de precisión y almacenados por un mes para alcanzar equilibrio secular entre ^{226}Ra y ^{222}Rn (Ibrahiem *et al.*, 1993).

Todas las mediciones fueron realizadas usando un detector p-HPGe con una eficiencia relativa de 70 %, y una resolución de 1,9 keV para el pico de 1332,5 keV del ^{60}Co y una relación pico/Compton de 70. El detector se encuentra acoplado a un sistema intercambiador automático de muestras, Tema Sinergie modelo SC 100/20, con un blindaje de Pb de 100 mm de espesor forrado con una lámina de Cu electrolítico y otra de Cd de 1 mm cada una. Para la adquisición y tratamiento espectral se utilizó el programa Genie 2K versión 2.0 (Canberra) corrigiendo tanto la contribución del fondo natural como la interferencia espectral de ^{214}Bi en el pico de 661,65 keV del ^{137}Cs

El tiempo de conteo varió desde 65000 s a 120000 s con un tiempo muerto < 1 %, previamente se calibró el sistema de medición en energía mediante una fuente patrón de ^{152}Eu , y en eficiencia absoluta mediante una cantidad de masa conocida de una solución estándar múltiple de Eckert & Ziegler, código UA591, con fecha de calibración 01 de abril de 2012 conteniendo ^{133}Ba , ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{65}Zn , ^{88}Y , ^{54}Mn depositada en una muestra de suelo debidamente secada y tamizada. Considerando el tiempo de decaimiento transcurrido hasta la fecha de medición de las muestras, sólo los picos gamma de ^{133}Ba (276,38 keV, 302,85 keV, 356,013 keV, 383,848 keV) y ^{137}Cs (661,65 keV) fueron factibles de ser empleados.

Para una óptima estadística de conteo se estableció como geometría de medición una distancia de 18 mm entre la muestra y el detector, considerando posible efecto de suma por coincidencia en los picos gamma de interés (Talavera *et al.*, 2001; Haluk *et al.*, 2010). Dada la diferencia de densidad observada en las muestras, desde 0.6 g cm⁻³ a 1.3 g cm⁻³, se corrigió el efecto de atenuación gamma aplicando el método de transmitancia (Cutshall, 1981), empleando una fuente calibrada de ^{152}Eu .

La concentración de actividad de los radionúclidos encontrados en las muestras de sedimento marino fue calculada usando la ecuación 1, según Reza *et al.* (2012).

$$C_A = A_{\text{neto}} / (\epsilon \times B_r \times T_v \times W) [1]$$

Sample Analysis

For the measurement of the radionuclides of interest: ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{208}Tl , ^{214}Bi , ^{228}Ac y ^{40}K It was conditioned between 180 g to 380 g of dry sample, in polypropylene containers of 300 cm³ volume (diameter = 8.2 cm and height = 5 cm), which were hermetically sealed, weighed in a 1 mg precision balance and stored by a month to achieve a secular balance between ^{226}Ra y ^{222}Rn (Ibrahiem *et al.*, 1993).

All measurements were performed using a p-HPGe detector with a relative efficiency of 70 %, and a resolution of 1.9 keV for the 1332.5 keV peak of the ^{60}Co and a peak/Compton ratio of 70. The detector is coupled to an automatic sample exchanger system, Tema Sinergie model SC 100/20, with a 100 mm thick Pb shield lined with a sheet of electrolytic Cu and another of Cd of 1 mm each. For the acquisition and spectral treatment, the Genie 2K version 2.0 program (Canberra) was used, correcting both the contribution of the natural background and the spectral interference of ^{214}Bi at the 661.65 keV peak of the ^{137}Cs

The counting time ranged from 65000 s to 120000 s with a dead time < 1 %, previously the measurement system was calibrated in energy using a standard source of ^{152}Eu , and in absolute efficiency using a known mass quantity of multiple standard solutions of Eckert & Ziegler, Code UA591, with calibration date April 1, 2012, containing ^{133}Ba , ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{65}Zn , ^{88}Y , ^{54}Mn deposited in a properly dried and sieved soil sample. Considering the decay time elapsed up to the date of measurement of the samples, only the gamma peaks of ^{133}Ba (276.38 keV, 302.85 keV, 356.013 keV, 383.848 keV) and ^{137}Cs (661.65 keV) were feasible to be used.

For optimal counting statistics, a distance of 18 mm between the sample and the detector was established as the measurement geometry, considering a possible effect of coincidence in the gamma peaks of interest (Talavera *et al.*, 2001; Haluk *et al.*, 2010). Given the difference in density observed in the samples, from 0.6 g cm⁻³ a 1.3 g cm⁻³, the gamma attenuation effect was corrected applying the transmittance method (Cutshall, 1981), using a calibrated source of ^{152}Eu .

The activity concentration of the radionuclides found in the marine sediment samples was calculated using equation 1, according to Reza *et al.*, 2012.

$$C_A = A_{\text{neto}} / (\epsilon \times B_r \times T_v \times W) [1]$$

Donde C_A está expresado como $Bq\ kg^{-1}$, ε es la eficiencia absoluta para picos gamma de energía específica, T_V es el tiempo vivo de conteo en segundos, W es la cantidad de masa expresada en Kg, B_i es la fracción de partículas que se desintegran por un modo de desintegración definida para cada energía, de acuerdo a bases de datos de LNHB (Laboratoire National Henri Becquerel) y A_{neta} es el área neta de los picos gamma evaluados de: 186,21 keV (^{226}Ra), 238,63 keV (^{212}Pb), 661,6 keV (^{137}Cs), 351,93 keV (^{214}Pb), 583,18 keV (^{208}Tl), 609,316 keV (^{214}Bi) y 1460,82 keV (^{40}K), calculándose la incertidumbre de C_A mediante propagación de errores. Todos los resultados, tanto de muestras como de referencia, están dados en peso seco.

Determinación de índices de peligro de radiación

El riesgo radiológico de los radionúclidos presentes en las muestras de sedimento se estimó mediante los siguientes índices basados en la determinación de concentración de actividad de ^{40}K , ^{226}Ra (por ^{214}Bi) y ^{232}Th (por ^{228}Ac): el índice de concentración de actividad equivalente de radio (Ra_{eq}) (ecuación 2), el índice de riesgo de radiación gamma (I_γ), la tasa de dosis absorbida externamente a 1 m sobre el nivel del suelo (D) y la dosis de radiación efectiva anual correspondiente (DEA)

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1.43 C_{Th} + 0.077 C_K [2]$$

Donde C_{Ra} , C_{Th} y C_K son las concentraciones de actividad de ^{226}Ra , ^{228}Ac y ^{40}K en $Bq\ kg^{-1}$ respectivamente.

El valor del índice de riesgo de radiación I_γ se estimó mediante la ecuación 3

$$I_\gamma = C_{Ra} / 370 + C_{Th} / 259 + C_K / 4810 [3]$$

La tasa de dosis absorbida de radiación gamma externa en el aire a 1 m de nivel del suelo se calculó de acuerdo con la ecuación 4 (Unsear, 1988)

$$D = 0,462 C_{Ra} + 0,604 C_{Th} + 0,042 C_K [4]$$

Donde D es la tasa de dosis en $nGy\ h^{-1}$ y C_{Ra} , C_{Th} y C_K tienen el mismo significado que la ecuación 1.

Para la evaluación de los efectos en la salud de las dosis absorbidas de radiación gamma, se calculó la dosis efectiva anual mediante la ecuación 5, empleando la conversión de la dosis absorbida a la dosis efectiva mediante coeficiente de conversión ($0,7\ Sv\ Gy^{-1}$) y factor de ocupación exterior (0,2) (Unsear, 1988),

$$DEA\ (mSv/a) = D\ (nGy/h) \times 24 \times 365\ (h/a) \times 0,2 \times 0,7\ (Sv/Gy) \times 10^6 [5]$$

Where C_A is expressed as $Bq\ kg^{-1}$, ε is the absolute efficiency for gamma peaks of specific energy, T_V is the counting live time in seconds, W is the amount of mass expressed in Kg, B_i is the fraction of particles that disintegrate by a defined disintegration mode for each energy, according to LNHB databases (Laboratoire National Henri Becquerel) and A_{neta} is the net area of the evaluated gamma peaks of 186,21 keV (^{226}Ra), 238.63 keV (^{212}Pb), 661.6 keV (^{137}Cs), 351.93 keV (^{214}Pb), 583.18 keV (^{208}Tl), 609.316 keV (^{214}Bi) and 1460.82 keV (^{40}K), calculating the uncertainty of C_A by propagating errors. All results reports, both samples and references are given in dry weight.

Determination of radiation hazard indices

The radiological risk of the radionuclides present in the sediment samples was estimated using the following indices based on the determination of activity concentration of ^{40}K , ^{226}Ra (by ^{214}Bi), and ^{232}Th (by ^{228}Ac): the radium equivalent activity concentration index (Ra_{eq}) (equation 2), the gamma radiation hazard index (I_γ), the externally absorbed dose rate at 1 m above ground level (D) and the corresponding annual effective radiation dose (AED)

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1.43 C_{Th} + 0.077 C_K [2]$$

Where C_{Ra} , C_{Th} , and C_K are the activity concentrations of ^{226}Ra , ^{228}Ac , and ^{40}K in $Bq\ kg^{-1}$ respectively.

The value of the radiation hazard index I_γ was estimated by equation 3

$$I_\gamma = C_{Ra} / 370 + C_{Th} / 259 + C_K / 4810 [3]$$

The absorbed dose rate of external gamma radiation in the air at 1 m ground level was calculated according to equation 4 (UNSCEAR, 1988)

$$D = 0,462 C_{Ra} + 0,604 C_{Th} + 0,042 C_K [4]$$

Where D is the dose rate in $nGy\ h^{-1}$ and C_{Ra} , C_{Th} and C_K have the same meaning as equation 1.

For the evaluation of the health effects of the absorbed doses of gamma radiation, the annual effective dose was calculated using equation 5, using the conversion of the absorbed dose to the effective dose through the conversion coefficient ($0.7\ Sv\ Gy^{-1}$) and external load factor (0.2) (UNSCEAR, 1988),

$$DEA\ (mSv/a) = D\ (nGy/h) \times 24 \times 365\ (h/a) \times 0,2 \times 0,7\ (Sv/Gy) \times 10^6 [5]$$

Aseguramiento de la calidad y evaluación estadística

Para asegurar la calidad de las mediciones obtenidas en la presente investigación se analizaron las muestras de referencia: CRM IAEA Soil 6 y CRM IAEA Moss Soil 447 proveídas por la Agencia Internacional de Energía Atómica. En tabla 3 se muestra los valores obtenidos expresados como Bq kg⁻¹ y su incertidumbre combinada calculada mediante propagación de errores con factor de cobertura k = 1.

Los valores registrados indicaron que la metodología analítica estuvo bajo control estadístico. La discrepancia respecto a la concentración de actividad de ²²⁶Ra en CRM IAEA Moss Soil-447 se explica por la presencia de ²³⁵U (Shakhashiro *et al.*, 2012), cuyo pico de 185,72 keV y 57 % de emisión gamma, interfiere en el análisis de ²²⁶Ra (pico de 186,21 keV) por espectrometría gamma. Tal superposición de picos gamma no puede ser resuelta por el sistema de medición, derivando en una contribución adicional de 50 % en el valor de ²²⁶Ra.

Tabla 3. Concentración de actividad expresado en Bq kg⁻¹ en masa seca de radionúclidos en muestras de referencia, incertidumbre combinada con factor de cobertura k = 1.

Núclido / Nuclide	CMR IAEA Soil-6 (N = 3)		IC	CMR IAEA Moss Soil-447 (N = 2)	
	Valor medido / Measured value	Valor referencia / Valor reference*		Valor medido / Measured value	Valor referencia / Valor reference**
²²⁶ Ra	70.1 ± 3.5	79.9	69.6 - 93.4	38.3 ± 5.1	25.1 ± 2.0
²¹⁴ Pb	54.5 ± 3.0	---	---	21.4 ± 3.7	26.0 ± 2.0
²⁰⁸ Tl	10.6 ± 0.6	---	---	12.9 ± 0.8	13.0 ± 0.5
²¹⁴ Bi	60.2 ± 2.4	---	---	24.3 ± 4.0	24.8 ± 2.0
²²⁸ Ac	31.5 ± 2.2	---	---	39.4 ± 0.4	37.0 ± 2.0
⁴⁰ K	367 ± 16	---	---	577 ± 4	550 ± 20
¹³⁷ Cs	50.8 ± 1.4	53.65	51.43 -57.91	422 ± 15	425 ± 10

(*) (Pszonicki *et al.*, 1984). (**) (Shakhashiro *et al.*, 2012). IC = intervalo de confianza al 95 %

Quality Assurance and Statistical Evaluation

To ensure the quality of the measurements obtained in this investigation, the reference samples were analyzed: CRM IAEA Soil 6 and CRM IAEA Moss Soil 447 provided by the International Atomic Energy Agency. Table 3 shows the values obtained expressed as Bq kg⁻¹ and their combined uncertainty calculated by the propagation of errors with coverage factor k = 1.

The reported values indicated that the analytical methodology was under statistical control. The discrepancy regarding the activity concentration of ²²⁶Ra in CRM IAEA Moss Soil-447 is explained by the presence of ²³⁵U (Shakhashiro *et al.*, 2012), whose peak of 185.72 keV and 57 % gamma emission interferes in the analysis of ²²⁶Ra (186.21 keV peak) by gamma spectrometry. Such overlapping of gamma peaks cannot be resolved by the measurement system, resulting in an additional 50 % contribution in the value of ²²⁶Ra.

Table 3. Activity concentration expressed in Bq kg⁻¹ in dry mass of radionuclides in reference samples, uncertainty combined with coverage factor k = 1.

La actividad mínima detectable (MDA) se determinó según Curie (1968). Los valores calculados se muestran en tabla 4, variando por tiempo de conteo, masa de muestra, eficiencia del detector y fondo de pico gamma evaluado.

The minimal detectable activity (MDA) was determined according to Curie (1968). The calculated values are shown in table 4, varying by counting time, sample mass, detector efficiency, and the evaluated gamma peak background.

Tabla 4. Valores de MDA en Bq kg⁻¹ para muestras de ensenada Mackellar, Monte Submarino Orca y de referencia empleadas.

	Ensenada Mackellar / Mackellar Cove	Monte submarino Orca / Orca Seamount	CRM IAEA Soil-6	CRM IAEA Moss Soil-447
²²⁶ Ra	11 - 12	14 - 16	12.4	24.0
²¹² Pb	0.8 - 1.0	1.1 - 1.3	----	1.9
²¹⁴ Pb	1.0 - 1.2	1.8 - 2.1	----	2.1
²⁰⁸ Tl	0.5 - 0.6	0.6 - 0.8	----	0.9
²¹⁴ Bi	0.8 - 1.0	1.3 - 1.4	----	1.4
²²⁸ Ac	1.3 - 2.1	2.0 - 3.0	----	2.1
⁴⁰ K	3.4 - 3.8	4 - 7	----	5.3
¹³⁷ Cs	0.3 - 0.4	0.4	0.4	0.9

Table 4. MDA values in Bq kg⁻¹ for Mackellar Cove, Orca Seamount, and reference samples used.

La variabilidad entre las muestras de Ensenada Mackellar y del Monte submarino Orca fue estudiada a fin de establecer posibles vías de transporte de radionúclidos en ambas zonas. Para ello, se procesaron los resultados analíticos de: ²²⁶Ra, ²¹²Pb, ²¹⁴Pb, ²⁰⁸Tl, ²¹⁴Bi, ²²⁸Ac y ⁴⁰K mediante métodos de estadística multivariada de extracción de componentes principales (ACP) y clasificación jerárquica empleando el programa estadístico SPSS.

Para evaluar si era factible aplicar el análisis factorial (ACP) al conjunto de datos obtenidos, se realizó el test KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) y prueba de esfericidad de Bartlett obteniendo un valor de 0,718 > 0,5 y una significancia = 0, respectivamente, mostrando que la matriz de datos (15x7) es adecuada para llevar a cabo el ACP. De igual manera, se realizó una correlación simple entre la profundidad y la concentración de los radioisótopos, con el fin de evaluar si la ruta de llegada a los sedimentos marinos era desde continente o desde el fondo oceánico.

RESULTADOS

Los resultados de concentración de actividad de los radionúclidos de interés calculados para las muestras de ensenada Mackellar, bahía Almirantazgo y monte submarino Orca, mostraron la presencia de ¹³⁷Cs en el área de la ensenada Mackellar a niveles de actividad superior al valor de MDA, con excepción de las muestras de las estaciones BA1, E02, E03 y E08 (tabla 5). Por lo contrario, en las muestras de sedimentos de la zona del monte submarino Orca, no se detectó ¹³⁷Cs, a excepción de la muestra de la estación MOS4, que presentó una alta incertidumbre de medición.

The variability between the Mackellar Inlet and Seamount Orca samples was studied to establish possible transport pathways for radionuclides in both areas. To do this, the analytical results of ²²⁶Ra, ²¹²Pb, ²¹⁴Pb, ²⁰⁸Tl, ²¹⁴Bi, ²²⁸Ac, and ⁴⁰K were processed utilizing multivariate main component extraction (PCA) and hierarchical classification methods using the SPSS statistical program.

To evaluate whether it was feasible to apply factor analysis (PCA) to the data set obtained, the KMO test (Kaiser-Meyer-Olkin) and Bartlett's sphericity test were performed, obtaining a value of 0.718 > 0.5 and a significance = 0, respectively, showing that the data matrix (15x7) is adequate to carry out the PCA. Similarly, a simple correlation between Depth and radioisotope concentration was carried out, to assess whether the route of arrival to marine sediments was from the continent or the ocean floor.

RESULTS

The activity concentration results of the radionuclides of interest calculated for the samples from Mackellar Inlet, Admiralty Bay, and Orca Seamount, showed the presence of ¹³⁷Cs in the Mackellar Inlet area at activity levels higher than the MDA value, except for the samples from stations BA1, E02, E03 and E08 (Table 5). On the contrary, in the sediment samples from the Orca seamount area, ¹³⁷Cs were not detected, except for the sample from Station MOS4, which presented a high measurement uncertainty.



Tabla 5. Resultados de mediciones radiométricas en sedimento marino extraídos de la Ensenada Mackellar (E), Bahía Almirantazgo (BA) y Monte submarino Orca (MOS).

Table 5. Results of radiometric measurements in marine sediment extracted from Mackellar Inlet (E), Admiralty Bay (BA), and Orca Seamount (MOS).

M*	Estación / Station	Radionúclidos Bq kg ⁻¹ / RadioNuclides Bq kg ⁻¹							
		²²⁶ Ra	²¹² Pb	²¹⁴ Pb	²⁰⁸ Tl	²¹⁴ Bi	²²⁸ Ac	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
1	BA1	19.2 ± 2.2	7.1 ± 1.4	10.0 ± 1.4	4.5 ± 0.5	11.0 ± 1.1	11.5 ± 1.2	383 ± 37	< MDA
2	E02	22.2 ± 2.7	9.2 ± 2.0	13.1 ± 2.2	4.9 ± 0.5	14.6 ± 1.6	13.4 ± 1.5	409 ± 42	< MDA
3	E03	18.5 ± 1.6	8.2 ± 1.6	11.8 ± 1.6	4.7 ± 0.4	13.5 ± 1.2	14.4 ± 1.1	406 ± 32	< MDA
4	E04	23.5 ± 3.5	10.2 ± 2.5	14.8 ± 2.7	5.9 ± 0.7	16.3 ± 2.2	16.9 ± 2.2	571 ± 69	0.5 ± 0.1
5	E07	18.6 ± 3.1	9.8 ± 1.9	13.4 ± 2.0	5.1 ± 0.6	14.6 ± 1.7	15.8 ± 1.7	554 ± 56	0.9 ± 0.2
6	E08	19.3 ± 2.3	11.2 ± 2.2	14.6 ± 2.1	6.5 ± 0.7	16.6 ± 1.7	18.7 ± 1.8	562 ± 53	< MDA
7	E10	24.8 ± 4.7	9.2 ± 1.9	13.2 ± 2.3	5.2 ± 0.6	14.1 ± 2.1	14.6 ± 2.0	526 ± 66	0.4 ± 0.1
8	E17	21.5 ± 1.0	10.4 ± 2.1	12.7 ± 1.8	6.2 ± 0.6	13.9 ± 1.3	16.6 ± 1.4	597 ± 49	0.7 ± 0.2
9	MOS1	34.0 ± 6.0	10.8 ± 2.4	18.6 ± 2.8	6.3 ± 0.8	20.3 ± 2.3	15.6 ± 1.8	372 ± 39	< MDA
10	MOS3	33.5 ± 5.1	11.5 ± 2.5	18.8 ± 2.9	6.4 ± 0.8	19.8 ± 2.3	17.7 ± 2.0	396 ± 42	< MDA
11	MOS4	37.7 ± 5.7	13.2 ± 2.9	25.2 ± 3.9	7.4 ± 0.9	26.0 ± 3.0	18.8 ± 2.2	466 ± 49	0.5 ± 0.3
12	MOS5	33.5 ± 5.4	11.9 ± 2.6	21.0 ± 3.2	5.4 ± 0.7	23.7 ± 2.7	19.5 ± 2.2	447 ± 54	< MDA
13	MOS6	38.8 ± 5.8	11.4 ± 2.5	23.0 ± 3.5	6.4 ± 0.8	23.4 ± 2.7	17.2 ± 2.0	445 ± 47	< MDA
14	MOS7	29.6 ± 4.5	9.6 ± 2.1	17.8 ± 2.7	5.7 ± 0.7	19.7 ± 2.3	15.9 ± 1.8	374 ± 40	< MDA
15	MOS8	32.8 ± 5.1	10.1 ± 2.3	20.1 ± 3.2	5.4 ± 0.7	21.3 ± 2.5	13.9 ± 1.7	385 ± 41	< MDA

M* = Identificación de muestra en dendrograma

M* = Identification of sample in dendrogram

Los resultados históricos (diferentes años de colecta) para muestras de sedimento extraídas en un mismo punto en la Ensenada Mackellar (tabla 6), que fueron medidos en el presente estudio, estuvieron en general en niveles superiores al MDA para el ¹³⁷Cs, exceptuando el correspondiente al año 1999, con un descenso paulatino del valor de concentración de actividad.

The historical results (different collection years) for sediment samples extracted from the same point in Mackellar Inlet (table 6), which were measured in the present study, were in general at levels above the MDA for ¹³⁷Cs, except for those corresponding to 1999, with a gradual decrease in the activity concentration value.

Tabla 6. Resultados de mediciones radiométricas en sedimento marino extraídos de un mismo punto de muestreo en la Ensenada Mackellar, coordenadas: 62° 05' 29" S, 58° 28' 10" O, en diferentes años.

Table 6. Results of radiometric measurements in marine sediment extracted from the same sampling point in Mackellar Cove, Coordinates: 62°05'29 "S, 58°28'10" W, in different years.

Año / Year	Radionúclidos Bq kg ⁻¹ / RadioNuclides Bq kg ⁻¹							
	²²⁶ Ra	²¹² Pb	²¹⁴ Pb	²⁰⁸ Tl	²¹⁴ Bi	²²⁸ Ac	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
1996	15.7 ± 2.4	9.0 ± 1.7	12.0 ± 1.6	4.8 ± 0.5	12.8 ± 1.2	15.3 ± 1.3	355 ± 32	1.5 ± 0.2
1997	15.1 ± 2.9	9.0 ± 1.7	11.9 ± 1.6	4.8 ± 0.5	12.8 ± 1.3	15.6 ± 1.5	363 ± 36	1.3 ± 0.2
1998	13.5 ± 2.8	9.0 ± 1.5	12.6 ± 1.6	4.9 ± 0.4	13.1 ± 1.1	16.6 ± 1.3	382 ± 40	0.9 ± 0.1
1999	13.5 ± 2.5	8.3 ± 1.8	12.1 ± 1.7	4.4 ± 0.5	12.7 ± 1.3	14.8 ± 1.4	435 ± 42	< MDA
2001	15.5 ± 5.7	9.3 ± 1.9	12.3 ± 2.1	4.7 ± 0.6	13.0 ± 1.8	15.3 ± 1.9	465 ± 60	1.1 ± 0.1

El análisis de correlación a partir de un análisis factorial (ACP), para las muestras de ensenada Mackellar (N = 7), bahía Almirantazgo (N = 1) y monte submarino Orca (N = 7), mostró una alta relación de ^{226}Ra , ^{214}Pb y ^{214}Bi pertenecientes a la serie radiactiva de ^{238}U . Asimismo, una alta correlación lineal entre ^{212}Pb , ^{208}Tl y ^{228}Ac pertenecientes a la serie radiactiva de ^{232}Th y mínima relación con ^{40}K . No obstante, se observó una relación inversa entre el ^{40}K y los radionúclidos de la serie radiactiva de ^{238}U . La clasificación jerárquica empleando el método de enlace promedio entre grupos, se muestra en figura 2, donde se observa una agrupación de las estaciones 4 a 8 de ensenada Mackellar y un segundo grupo con el resto de estaciones.

Según el ACP, la varianza total en la matriz de datos evaluada puede ser explicada por un primer componente constituido por los radionúclidos de la serie radiactiva del ^{238}U (^{226}Ra , ^{214}Pb y ^{214}Bi) con un 69,19% de varianza. En tanto,

The correlation analysis from a factor analysis (PCA), for the samples from Mackellar Cove (N = 7), Admiralty Bay (N = 1), and Orca Seamount (N = 7), showed a high ratio of ^{226}Ra , ^{214}Pb , and ^{214}Bi belonging to the ^{238}U radioactive series. Likewise, a high linear correlation between ^{212}Pb , ^{208}Tl , and ^{228}Ac belonging to the radioactive series of ^{232}Th and a minimum relation with ^{40}K . However, an inverse relationship was observed between ^{40}K and radionuclides of the ^{238}U radioactive series. The hierarchical classification using the average link method between groups is shown in figure 2, where a grouping of stations 4 to 8 of Mackellar Inlet is observed and a second group with the rest of the stations.

According to the PCA, the total variance in the evaluated data matrix can be explained by the first component constituted by the radionuclides of the radioactive series of ^{238}U (^{226}Ra , ^{214}Pb , and ^{214}Bi) with

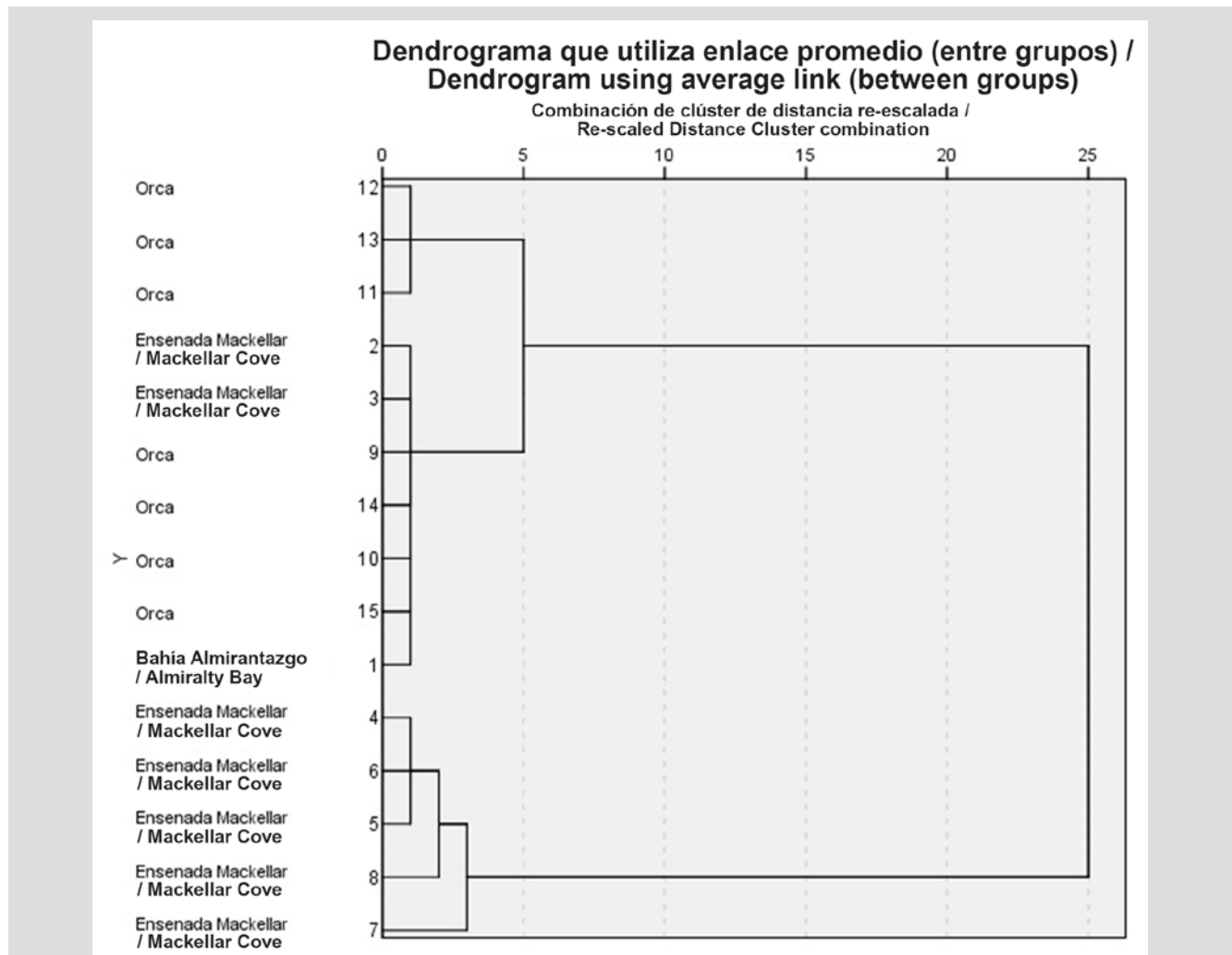


Figura 2. Análisis de conglomerado de datos de la matriz (15x7).

Figure 2. Cluster analysis of matrix data (15x7).

un segundo componente correspondiente al ^{40}K explica un 23,27 % de la varianza haciendo en conjunto una varianza total explicada de 92,46 %. El análisis de la relación entre la profundidad y la concentración de actividad los elementos (figura 3), mostró una relación directa entre la variación

a 69.19 % variance. Meanwhile, a second component corresponding to ^{40}K explains 23.27 % of the variance, making together a total explained variance of 92.46 %. The analysis of the relationship between Depth and the concentration of activity of the elements (figure 3), showed

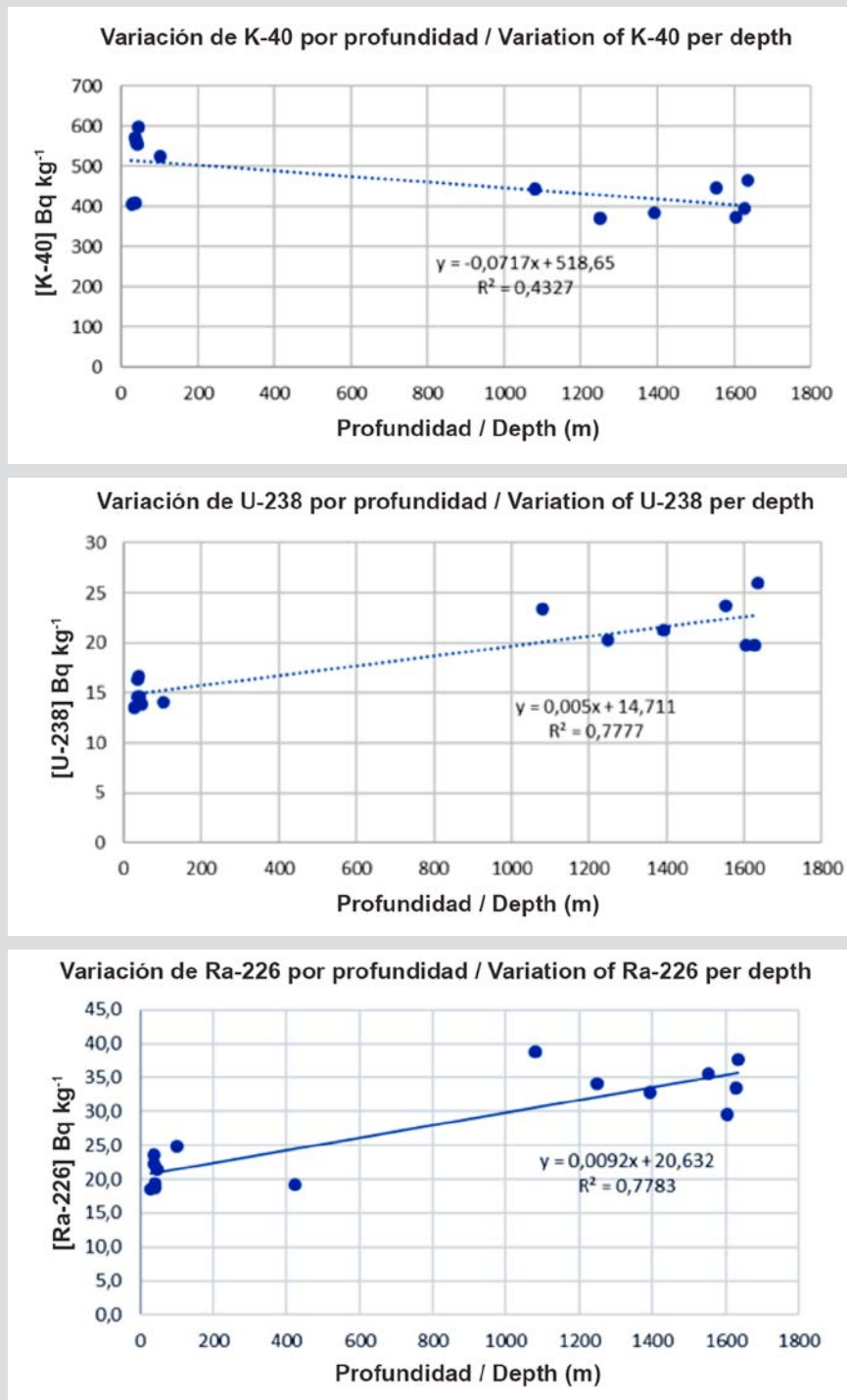


Figura 3. Relación de la profundidad con la concentración de ^{40}K , ^{226}Ra y ^{238}U en las muestras de sedimentos de las diferentes estaciones de colecta del estudio.

Figure 3. Relationship of Depth with a concentration of ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{238}U in the sediment samples from the different collection stations of the study.

de ^{238}U y ^{226}Ra en función de la profundidad, mientras que para el ^{40}K la relación es inversa, aunque con un bajo nivel de correlación. Para el ^{137}Cs no fue posible establecer una relación numérica, pero se observó un mayor número de eventos de concentración mayor al MDA en ensenada Mackellar (tabla 5).

En los valores de los parámetros de peligro de radiación en bahía Almirantazgo, ensenada Mackellar y monte submarino Orca (tabla 7), se observó el nivel más bajo para la estación en bahía Almirantazgo (BA1) y el valor más alto para la estación 4 en el monte submarino Orca (MOS-4). Para el índice de concentración de actividad equivalente de radio ($R_{a_{eq}}$), se observó una variación de 56,9 a 88,8 Bq kg^{-1} . Para el índice de riesgo de radiación (I_r), los niveles variaron entre 0,18 y 0,27. Así mismo se obtuvo los valores de la tasa de dosis (D), que variaron entre 31,89 y 48,35 nGy h^{-1} , y los valores de la Dosis Efectiva Anual (DEA), que variaron entre 0,04 y 0,05 mSv a^{-1} .

a relationship directly between the variation of ^{238}U and ^{226}Ra as a function of Depth, while for ^{40}K the relationship is inverse, although with a low level of correlation. For ^{137}Cs it was not possible to establish a numerical relationship, but a greater number of events with a concentration greater than MDA was observed in Mackellar Inlet (table 5).

In the values of the radiation hazard parameters in Admiralty Bay, Mackellar Inlet, and Orca Seamount (Table 7), the lowest level was observed for Station in Admiralty Bay (BA1) and the highest value for Station 4 in Orca Seamount (MOS-4). For the radium equivalent activity concentration index ($R_{a_{eq}}$), a variation from 56.9 to 88.8 Bq kg^{-1} was observed. For the radiation hazard index (I_r), the levels varied between 0.18 and 0.27. Likewise, the values of the dose rate (D) were obtained, which varied between 31.89 and 48.35 nGy h^{-1} , and the values of the Annual Effective Dose (AED), which varied between 0.04 and 0.05 mSv a^{-1} .

Tabla 7. Valores de los parámetros de peligro de radiación en bahía Almirantazgo, ensenada Mackellar y monte submarino Orca.

Estación / Station	$R_{a_{eq}}$	I_r	D	DEA
BAHIA	56.9	0.18	31.9	0.039
E-02	65.2	0.20	35.5	0.044
E-03	65.3	0.19	34.3	0.042
E-04	84.4	0.25	45.0	0.055
E-07	79.8	0.23	41.4	0.051
E-08	86.6	0.24	43.9	0.054
E-10	75.5	0.23	42.3	0.052
E-17	83.6	0.25	45.0	0.055
MOS-1	71.2	0.23	40.7	0.050
MOS-3	75.6	0.24	42.8	0.052
MOS-4	88.8	0.27	48.3	0.059
MOS-5	85.9	0.26	46.9	0.058
MOS-6	82.2	0.26	47.0	0.058
MOS-7	71.3	0.22	39.0	0.048
MOS-8	70.9	0.22	39.8	0.049

Límites Máximos Permisibles (LMP): $R_{a_{eq}} = 370 \text{ Bq kg}^{-1}$; $I_r < 1$; $D = 55 \text{ nGy h}^{-1}$; $DEA = 0.067 \text{ mSv a}^{-1}$

Table 7. Radiation hazard parameter values at Admiralty Bay, Mackellar Inlet, and Orca Seamount.

Maximum Allowable Limits (LMP): $R_{a_{eq}} = 370 \text{ Bq kg}^{-1}$; $I_r < 1$; $D = 55 \text{ nGy h}^{-1}$; $DEA = 0.067 \text{ mSv a}^{-1}$

DISCUSIÓN

La concentración de actividad de radionúclidos en las muestras de sedimentos marinos indicó un nivel de radiactividad significativamente menor para el ^{137}Cs , en comparación a otras áreas a nivel mundial (tabla 8), lo cual puede ser explicado por la distancia que hay entre el continente Antártico y las zonas fuente de este elemento (Friedlander *et al.*, 2005). Mientras que el ^{40}K y el ^{226}Ra mostraron estar dentro de los rangos observados en sedimentos marinos de varias localidades alrededor del mundo, con excepción de los reportados para ^{40}K por Lambrechts *et al.* (1992) y Kurnaza *et al.* (2007), quienes mostraron rangos cuyo límite superior está por encima de 1000 Bq kg^{-1} , así mismo Abdel-Halim y Saleh (2016) citan para las costas de Alejandría concentraciones de ^{226}Ra hasta de $499,2 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Las concentraciones de ^{137}Cs que se reportan para algunas estaciones de ensenada Mackellar corresponden con los niveles de actividad históricamente observados según la tabla 6, considerando el factor de decaimiento natural. Una probable explicación a la presencia de mayores concentraciones de actividad del ^{137}Cs en sedimentos marinos de áreas someras (ensenada Mackellar) con respecto a la más profunda (monte submarino Orca) del área de estudio, se fundamenta en que el transporte de este radioisótopo es principalmente por vía atmosférica (Godoy *et al.*, 1998), acumulándose posteriormente en la nieve, hielo marino, suelos y vegetación terrestre, lo cuál ha sido corroborado con los resultados de Mietelski *et al.* (2008), quienes encontraron más bajos niveles de contaminación en las muestras del ambiente marino que en las de los ecosistemas terrestres. Posteriormente, este material es aportado a los sedimentos marinos a través de la escorrentía terrestre y la deriva de hielo hacia mar abierto.

Tabla 8. Comparación de radioactividad (expresado como Bq kg^{-1}) en sedimentos marinos de la zona de estudio con otras áreas a nivel mundial.

País / Country	Ubicación / Location	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{137}Cs	Referencia / Reference
Antártica / Antarctica	Ensenada Mackellar, bahía Almirantazgo y monte submarino Orca / Mackellar Cove, Admiralty Bay and Orca Seamount	13.5 - 38.8	----	355 - 597	< 1.5	Este estudio / This studio
Egipto / Egypt	Costas de Alejandría / Coasts of Alexandria	12.6 - 499.2	----	12.6 - 499.2	0.1 - 3.22	Abdel-Halim and Saleh, 2016
Egipto / Egypt	Costas sureste-Mar rojo / Southeast coasts-Red Sea	3.35 - 61.1	1.39 - 24.3	132.5 - 531.2	0.67 - 2.52	Arafat <i>et al.</i> , 2017

DISCUSSION

The concentration of radionuclide activity in the marine sediment samples indicated a significantly lower level of radioactivity for ^{137}Cs , compared to other areas worldwide (Table 8), which can be explained by the distance between the Antarctic continent and the source areas of this element (Friedlander *et al.*, 2005). While ^{40}K and ^{226}Ra showed to be within the ranges observed in marine sediments from various locations around the world, with the exception of those reported for ^{40}K by Lambrechts *et al.* (1992) and Kurnaza *et al.* (2007), who showed ranges whose upper limit is above 1000 Bq kg^{-1} , likewise Abdel-Halim and Saleh (2016) report concentrations of ^{226}Ra up to 499.2 Bq kg^{-1} for the Alexandria coasts.

The concentrations of ^{137}Cs that are reported for some stations in Mackellar Inlet correspond to the levels of activity historically observed according to Table 6, considering the natural decay factor. A probable explanation for the presence of higher concentrations of ^{137}Cs activity in shallow marine sediments (Mackellar Inlet) with respect to the deeper zone (Orca seamount) of the study area, is based on the fact that the transport of this radioisotope is mainly by atmospheric route (Godoy *et al.*, 1998), subsequently accumulating in snow, sea ice, soils and terrestrial vegetation, which has been corroborated with the results of Mietelski *et al.* (2008), who found lower levels of contamination in samples from the marine environment than those from terrestrial ecosystems. Subsequently, this material is contributed to marine sediments through land runoff and ice drift into the open sea.

Table 8. Comparison of radioactivity (expressed as Bq kg^{-1}) in marine sediments in the study area with other areas worldwide.

País / Country	Ubicación / Location	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	Referencia / Reference
India	Bahía del puerto de Mumbai / Mumbai Harbor Bay	13.6 - 26.7	----	437.5 - 653	48.3 - 221	Kumar <i>et al.</i> , 2013
Francia		9 - 62	16 - 55	120 - 1026		Lambrechts <i>et al.</i> , 1992
Omán	Costa norte del mar de Omán / North coast of the sea of Oman	----	10.7 - 25.0	222.9 - 535.1	0.1 - 3.0	Zare <i>et al.</i> , 2012
Pakistán	Costa de Karachi / Karachi Coast	18.4 - 53.8	----	125 - 780.4	< 1.6	Qureshi, 1999
Portugal	Rio Tejo / Tejo River	42 - 57	54 - 76			Carreira and Sequeira, 1988
Turquía / Turkey	Rio Firtina / Firtina River	15 - 116	17 - 87	51 - 1605		Kurnaza <i>et al.</i> , 2007
Kuwait	Costa sur y norte / South and north coast	8.1 - 72	1.6 - 17	40.5 - 492	0.35 - 4.24	Saad and Al-Azmi, 2002
Bangladesh	Chittagong	18 - 85	51 - 88	217 - 320	1.7 - 2.7	Chowdhury <i>et al.</i> , 1999

La variabilidad de los radionúclidos de origen natural tanto en la ensenada Mackellar como en monte submarino Orca está definida principalmente por los radionúclidos de la serie radiactiva de ²³⁸U (²²⁶Ra, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi) y por ⁴⁰K, en tanto, aquellos de la serie radiactiva de ²³²Th (²¹²Pb, ²⁰⁸Tl, ²²⁸Ac) muestran homogeneidad a nivel general en ambas zonas. Según el análisis de cluster, las estaciones MOS4, MOS5 y MOS6 se agrupan convenientemente considerando la ubicación de tales estaciones en esa localidad (figura 1d).

La concentración de actividad del ²³⁸U y ²²⁶Ra encontrada, sugiere un origen asociado a la actividad volcánica en el área de estudio, los valores de ²²⁶Ra coinciden con lo reportado por Iyengar (1990), para diferentes tipos de rocas con este origen. La relación directa de las concentraciones de ²²⁶Ra con la profundidad confirma la evolución geológica del área propuesta por varios autores (Schreider *et al.*, 2015; Kozlenko y Kozlenko, 2019) y los cambios temporales de fuente de material al manto, que altera la geoquímica de las rocas volcánicas de las diferentes zonas de las islas Shetland del Sur (Fretzdorff *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2008). Los mayores valores ²²⁶Ra (29.6-38.8 Bq kg⁻¹) se encontraron en la zona más profunda y de actividad más reciente, monte submarino Orca, en el cual se encuentran rocas ígneas volcánicas o magmáticas alcalinas (Fretzdorff *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2008), las cuales tienen concentración de ²²⁶Ra entre 11.1 y 48.1 Bq kg⁻¹ según Iyengar (1990), y menor concentración (18.5-24.8 Bq kg⁻¹) en el área menos profunda (bahía Almirantazgo y ensenada Mackellar) en donde Birkenmajer (1980) identificó lavas

The variability of naturally occurring radionuclides both in Mackellar Inlet and Orca Seamount is defined mainly by radionuclides of the radioactive series of ²³⁸U (²²⁶Ra, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi) and by ⁴⁰K, meanwhile, those of the radioactive series of ²³²Th (²¹²Pb, ²⁰⁸Tl, ²²⁸Ac) show general homogeneity in both zones. According to the cluster analysis, the MOS4, MOS5 and MOS6 stations are conveniently grouped considering the Location of such stations in that locality (figure 1d).

The activity concentration of ²³⁸U and ²²⁶Ra found, suggests an origin associated with volcanic activity in the study area, the values of ²²⁶Ra coincide with that reported by Iyengar (1990), for different types of rocks with this origin. The direct relationship of ²²⁶Ra concentrations with Depth confirming the geological evolution of the area proposed by several authors (Schreider *et al.*, 2015; Kozlenko and Kozlenko, 2019) and the temporal changes from the source of material to the mantle, which alters the geochemistry of volcanic rocks from different areas of the South Shetland Islands (Fretzdorff *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2008). The highest ²²⁶Ra values (29.6-38.8 Bq kg⁻¹) were found in the deepest and most recently active zone, Orca seamount, in which alkaline magmatic or volcanic igneous rocks are found (Fretzdorff *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2008), which have a concentration of ²²⁶Ra between 11.1 and 48.1 Bq kg⁻¹ according to Iyengar (1990), and a lower concentration (18.5-24.8 Bq kg⁻¹) in the shallower zone (Admiralty Bay and Mackellar Cove) in Where Birkenmajer (1980) identified andesitic and rhyolitic lavas considered intermediate volcanic rocks, for which Iyengar (1990) reported ²²⁶Ra values of 18.5 Bq kg⁻¹.

andesíticas y riolíticas consideradas rocas volcánicas intermedias, para las cuales Iyengar (1990) reportó valores de ^{226}Ra de $18,5 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Por su parte, las concentraciones de actividad del ^{40}K encontradas en este estudio en bahía Almirantazgo y ensenada Mackellar, coinciden con las presentadas por Godoy *et al.* (1998), quienes registraron valores entre 402 y 607 Bq kg^{-1} . El ^{40}K como el ^{232}Th , y el ^{238}U está disponible en el magma y entra así en la estructura cristalina de los minerales, debido a que durante su proceso de transporte después de la desintegración de la roca no sufre enriquecimiento o agotamiento significativo, proporciona una especie de etiqueta radiactiva de la roca fuente (Anjos *et al.*, 2007). La relación inversa entre el ^{40}K y la profundidad sugiere como fuente de este elemento la zona continental, posiblemente asociado al tipo de rocas volcánicas que conforman la isla Rey Jorge, las cuales son diferentes de las del monte submarino Orca, como se dijo anteriormente. Teniendo en cuenta que el monte submarino Orca no evidencia actividad volcánica e hidrotermal actual, partiendo de las exploraciones realizadas en la zona en los cruceros ANTAR XXVI y XXVII, y los registros de Klinkhammer *et al.* (1996, 2001), se hace necesario explorar en trabajos futuros la concentración de actividad de radionúclidos de origen natural en otras zonas del estrecho con hidrotermalismo activo, con el fin de definir si existen cambios espaciales derivados de esta condición.

En cuanto a los índices utilizados para evaluar peligro de radiación, se encontró que todas las concentraciones de radionúclidos estuvieron por debajo de los límites máximos permisibles (LMP) sugeridos por Unsear (1988), lo cual indica que aunque hay presencia de estos radionúclidos todavía no representan un peligro para la salud. Para el índice de concentración de actividad equivalente de radio (Ra_{eq}), los valores estuvieron por debajo del límite fijado en 370 Bq kg^{-1} , para el índice de riesgo de radiación (I), los valores fueron menores a la unidad. Así mismo, los valores de la tasa de dosis (D) estuvieron por debajo de 55 nGy h^{-1} y los valores de la Dosis Efectiva Anual (DEA) no superaron el valor máximo de $0,067 \text{ mSv a}^{-1}$ de acuerdo a lo sugerido por Unsear (1993).

Teniendo en cuenta la extensión del continente Antártico y la acumulación en el hielo del ^{137}Cs , así como su posterior contribución al océano adyacente y los sedimentos, es posible pensar que Antártica puede ser considerado un gran reservorio de elementos radioactivos de origen antrópico. Pourchet *et al.* (2003) fijaron en 760

For their part, the ^{40}K activity concentrations found in this study in Admiralty Bay and Mackellar Inlet, coincide with those reported by Godoy *et al.* (1998), who registered values between 402 and 607 Bq kg^{-1} . The ^{40}K as the ^{232}Th and the ^{238}U is available in magma and thus enters the crystalline structure of minerals, because during its transport process after the disintegration of the rock it does not undergo significant enrichment or depletion, it provides a species radioactive label of the source rock (Anjos *et al.*, 2007). The inverse relationship between ^{40}K and Depth suggests the continental zone as a source of this element, possibly associated with the type of volcanic rocks that make up King George Island, which are different from the Orca Seamount, as stated above. Taking into account that the Orca seamount does not show current volcanic and hydrothermal activity, based on the explorations carried out in the area on the ANTAR XXVI and XXVII cruises, and the records of Klinkhammer *et al.* (1996) and Klinkhammer *et al.* (2001), it is necessary to explore in future works the concentration of activity of naturally occurring radionuclides in other areas of the Strait with active hydrothermalism, to define whether there are spatial changes derived from this condition.

Regarding the indices used to evaluate radiation hazard, it was found that all concentrations of radionuclides were below the maximum permissible limits (MPL) suggested by UNSCEAR (1988), which indicates that although there is the presence of these radionuclides, they are not yet present, represents a health hazard. For the radium equivalent activity concentration index (Ra_{eq}), the values were below the limit set at 370 Bq kg^{-1} , for the radiation risk index (I) the values were less than unity. Likewise, the dose rate values (D) were below 55 nGy h^{-1} and the Annual Effective Dose (AED) values did not exceed the maximum value of 0.067 mSv a^{-1} as suggested by UNSCEAR (1993).

Taking into account the extension of the Antarctic continent and the accumulation of ^{137}Cs in the ice, as well as its subsequent contribution to the adjacent ocean and sediments, it is possible to think that Antarctica can be considered a large reservoir of radioactive elements of anthropic origin. Pourchet *et al.* (2003) set the activity of ^{137}Cs deposited throughout Antarctica at 760 TBq (terabecquerels), this is equivalent to around 20,000 Ci, although it is a very large amount of activity, it only represents 0.08 % of the deposited ^{137}Cs worldwide according to the same reference. Derived from the

TBq (terabequerelios) la actividad de ^{137}Cs depositada en toda la antártica, esto equivale alrededor de 20000 Ci, si bien es una cantidad muy grande de actividad solo representa el 0,08 % de lo depositado de ^{137}Cs a nivel mundial según la misma referencia. Derivado de lo anterior se puede decir que el derretimiento y liberación de estos elementos debido al cambio climático, puede representar un peligro para los organismos de esta región y la humanidad, por lo cual mediciones en núcleos de sedimentos pueden ser útiles para evaluar el aporte de estos radionúclidos a lo largo del tiempo y su relación con los cambios del clima en la región, y con esto aportar a los modelos predictivos.

AGRADECIMIENTOS

A la tripulación del BAP Carrasco e investigadores de la segunda expedición de la campaña Antar XXVI (2018 – 2019) por su apoyo abordo en la colecta de las muestras de este estudio. De igual manera, a la dirección de Soberanía Límites y Asuntos Antárticos del Ministerio de Relaciones Exteriores de Perú, por el apoyo logístico y económico para participar en la expedición. Así como al Invemar por el apoyo económico de la investigadora colombiana. Finalmente, los autores agradecen al investigador Oswaldo Coca Domínguez por su colaboración en el componente cartográfico y a la Universidad Científica del Sur por la entrega de muestras de ensenada de Mackellar.

above, it can be said that the melting and release of these elements due to climate change may represent a danger for the organisms of this region and humanity, therefore measurements in sediment cores can be useful in evaluating the contribution of these radionuclides over time and their relationship with climate changes in the region, to predictive models.

ACKNOWLEDGEMENT

Special thanks to the BAP Carrasco crew and researchers from the second expedition of the Antar XXVI campaign (2018 - 2019) for their support on board in the collection of the samples for this study. Similarly, to the Directorate of Limits Sovereignty and Antarctic Affairs of the Ministry of Foreign Affairs of Peru, for the logistical and financial support to participate in the expedition. As well as Invemar for the financial support of the researcher Constanza Ricaurte-Villota. Finally, the authors thank the researcher Oswaldo Coca Domínguez for his collaboration in the cartographic component and the Universidad Científica del Sur for the delivery of samples from the Mackellar Inlet.

BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Abdel-Halim, A.A. and I.H. Saleh. 2016. Radiological characterization of beach sediments along the Alexandria–Rosetta coasts of Egypt. *J. Taibah Univ. Sci.*, 10(2), 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2015.02.016>
- Anjos, R.M., R. Veiga, C. Carvalho, K.D. Macario and P.R.S. Gomes. 2007. Geological provenance of Quaternary deposits from the southeastern Brazilian coast. *Nucl. Phys. A*, 787: 642c–647c.
- Arafat, A.A., M.H.M. Salama, S.A. El-Sayed and A.A. Elfeel. 2017. Distribution of natural radionuclides and assessment of the associated hazards in the environment of Marsa Alam-Shalateen area, Red Sea coast, Egypt. *J. Rad. Res. Appl. Sci.*, 10 (3): 219-232, DOI: 10.1016/j.jrras.2016.11.006
- Bargagli, R. 2000. Trace metals in Antarctica relate to climate change and increasing human impact. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, 166: 129–173.
- Bhardwaj, L., A. Chauhan, A. Ranjan and T. Jindal. 2018. Persistent organic pollutants in biotic and abiotic components of Antarctic pristine environment. *Earth Syst. Environ.*, doi.org/10.1007/s41748-017-0032-8
- Birkenmajer, K. 1980. Geology of Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands): an outline. *Polish Polar Res.*, 1(1): 29-54.
- Cary, S.C., I.R. McDonald, J.E. Barrett and D.A. Cowan. 2010. On the rocks: the microbiology of Antarctic Dry Valley soils. *Nat. Rev. Microbiol.*, 8:129–138.
- Chowdhury, M.I., M.N. Alam and S.K.S. Hazari. 1999. Distribution of radionuclides in the river sediments and coastal soils of Chittagong, Bangladesh and evaluation of the radiation hazard. *Appl. Rad. Isot.*, 51(6), 747–755. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(99\)00098-6](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(99)00098-6)
- Connell, D.W. 1989. Biomagnification by aquatic organisms—a proposal. *Chemosphere*, 19: 1573-1584.
- Currie L.A. 1968. Limits for qualitative detection and quantitative determination. *Anal. Chem.*, 40 (3): 586-593.
- Cutshall, N.H., I.L. Larsen and C.R. Olsen. 1983 Direct analysis of ^{210}Pb in sediment samples: self-absorption corrections. *Nucl. Inst. Meth.*, 206: 309-312.



- Ferreira, P.A.L., A.P. Ribeiro, M.G. do Nascimento, C.C. Martins, M.M. Mahiques, R. C. Montone and R.C.L. Figueira. 2013. ^{137}Cs in marine sediments of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Sci. Total Environ.*, 443: 505–510.
- Focardi, S., R. Bargagli and S. Corsolini. 1993. Organochlorines in the Antarctic marine food chain at Terranova Bay (Ross Sea). *Korean J. Polar Res.*, 4 (2): 73–77.
- Fretzdorff, S., T.J. Worthington, K.M. Haase, R. Hékinian, L. Franz, R. A. Keller and P. Stoffers. 2004. Magmatism in the Bransfield Basin: Rifting of the South Shetland Arc? *J. Geophys. Res.*, 109: B12208, doi:10.1029/2004JB003046.
- Friedlander, B.R., M. Gochfeld, J. Burger and C.W. Powers. 2005. Radionuclides in the marine environment. A CRESO Science Review. Consortium for Risk Evaluation with Stakeholder Participation.
- García Talavera M., J.P. Laedermann and B. Quintana. 2001. Coincidence summing corrections for the natural decay series in γ ray spectrometry. *J. Rad. Iso.*, 54:769-776.
- Godoy, J.M., L.A. Schuch, D.J.R. Nordermann, V.R.G. Reis, M. Ramalho, J.C. Recio, R.R.A. Brito and M.A. Olech. 1998. ^{137}Cs , $^{226,228}\text{Ra}$, ^{210}Pb , and ^{40}K concentrations in Antarctic soil, sediment, and selected moss and lichen samples. *J. Environ. Radioact.*, 41: 33–45.
- http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm
- Ibrahiem, N. M., A.H. Abdel Ghana, S.M. Shawky, E.M. Ashraf and M.A. Farouk. 1993. Measurement of radioactivity levels in soil in Nile Delta and Middle Egypt. *Health Phys.*, 64: 620–627.
- Iyengar, M.A.R. 1990. The natural distribution of radium. *The Environmental Behavior of Radium*. Technical Reports Series No. 310. International Atomic Energy Agency, Vienna, 59-128
- Klinkhammer, G.P., C.S. Chin and C. Wilson. 1996. Hydrothermal and hydrographic surveys of the Bransfield Strait: Results from cruise NBP95-07. *Ant. J. Rev.*, 31: 92 – 94.
- Klinkhammer, G.P., C.S. Chin, R.A. Keller, A. Dähmann, H. Sahling, G. Sarthou, S. Petersen, F. Smith and C. Wilson. 2001. Discovery of new hydrothermal vent sites in Bransfield Strait, Antarctica. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 193: 395-407.
- Kozlenko, Y. and M. Kozlenko. 2019. Earth crust of the Bransfield strait between the Antarctic peninsula and King George Island. *Geol. Min. Res. World Oc.*, 15(1): 3-73
- Kumar, A., R. Karpe, S. Rout, V. Joshi, R.K. Singhal and P.M Ravi. 2013. Spatial distribution and accumulation of ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{40}K , and ^{137}Cs in bottom sediments of Mumbai Harbour Bay. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 295(2): 835–839. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-2166-3>
- Lawver L.A., B.J. Sloan, D.H.N. Barker, M. Ghidella, R.P. von Herzen, R.A. Keller, G.P. Klinkhammer and C.S. Chin. 1996. Distributed, active extension in Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: Evidence from multibeam bathymetry. *GSA Today*, 6(1): 2-5.
- Lee, M.J., J.I. Lee, W.H. Choe and C.H. Park. 2008. Trace element and isotopic evidence for temporal changes of the mantle sources in the South Shetland Islands, Antarctic. *Geochem. J.*, 42: 207-219.
- Legrand, M. and P. Mayewski. 1997. Glaciochemistry of polar ice cores: a review. *Rev Geophys*, 35: 219–243.
- Marzano, F.N. and C. Triulzi. 1994. A radioecological survey of the Northern and Middle Adriatic Sea before and after the Chernobyl event. *Mar. Pollut. Bull.*, 28(4): 244–253.
- Matisoff, G., M.E. Ketterer, K. Rosén, J.W. Mietelski, L.F. Vitko, H. Persson and E. Lokas. 2011. Downward migration of Chernobyl-derived radionuclides in soils in Poland and Sweden. *Appl. Geochem.*, 26: 105–115.
- Mietelski, J.W., M.A. Olech, K. Sobiech-Matura, B.J. Howard, P. Gaca, M. Zwolak, S. Błażej and E. Tomankiewicz. 2008. ^{137}Cs , ^{40}K , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{90}Sr in biological samples from King George Island (Southern Shetlands) in Antarctica. *Polar Biol.*, 31(9): 1081-1089.
- Pourchet, M., O. Magand, M. Frezzotti, A. Ekaykin and J.G. Winther. 2003. Radionuclides deposition over Antarctica. *J. Environ. Radioact.*, 68: 137–158.
- Pszonicki, L., A.N. Hanna and O. Suschny. 1984. Report on intercomparison IAEA/Soil-6 of the determination of Cs-137, Pu-239, Ra-226, and Sr-90 in soil. Vienna, 31 p.
- Qureshi, R.M. Qureshi, A. Mashiatullah, M Akram, M.I Sajjad, M. Shafiq, T. Javed and M. Aslam. 1999. Radiological assessment of coastal marine sediment and water samples, Karachi coast, Pakistan. *Techn. Rep.*, Pakistan, 28 p.
- Rakusa-Suszczewski, S. 1980. Environmental conditions and the functioning of Admiralty Bay (South Shetland Islands) as part of the nearshore Antarctic ecosystem. *Polish Polar Res.*, 1(1): 11–27.
- Rakusa-Suszczewski, S. 1995. The hydrography of Admiralty Bay and its inlets, coves and lagoons (King George Island, Antarctica). *Polish Polar Res.*, 16(1): 61–70.

- Roos, P.E., R.B.R. Holm, A.A. Persson and S.P. Nielsen. 1994. Deposition of ^{210}Pb , ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , and ^{241}Am in the Antarctic Peninsula area. *J. Environ. Radioact.*, 24(3): 235-251.
- Saad, H. R. and D. Al-Azmi. 2002. Radioactivity concentrations in sediments and their correlation to the coastal structure in Kuwait. *Appl. Rad. Isot.*, 56(6), 991–997. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(02\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(02)00061-1)
- Sanders, C.J., I.R. Santos, S.R. Patchineelam, C. Schaefer and E.V. Silva-Filho. 2010. Recent ^{137}Cs deposition in sediments of Admiralty Bay, Antarctica. *J. Environ. Radioact.*, 101(5): 421-424.
- Shakhashiro, A., S. Tarjan, A. Ceccatelli, G. Kis-Benedek and M. Betti, 2012. IAEA-447: A new certified reference material for environmental radioactivity measurements. *Appl. Rad. Isot.*, 70: 1632-1643.
- Schreider, A.A., A.A. Schreider, J. Galindo-Zaldivar, A. Maldonado, L. Gamboa, Y. Martos, F. Lobo and E.I. Evsenko. 2015. Structure of the Bransfield Strait Crust. *Oceanology*, 55 (1): 112–123.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1988. Report to the General Assembly, UNSCEAR, United Nations, New York, Anexo A, 26-80 p.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1993. Report to the General Assembly, UNSCEAR, United Nations, New York, Anexo A, 39-44 p.
- Yücel, H., A.N. Solmaz, E. Köse and D. Bor. 2010. A semi-empirical method for calculation of true coincidence corrections for the case of a close-in detection in γ -ray spectrometry. *J. Nucl. Chem.*, 283: 305-312. doi.10.1007/s10967-009-0360-8.
- Zare, M.R., M. Mostajaboddavati, M. Kamali, M.R. Abdi and M.S. Mortazavi. 2012. ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs activity concentrations in marine sediments along the northern coast of Oman Sea using high-resolution gamma-ray spectrometry. *Mar. Poll. Bull.*, 64(9): 1956–1961. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.05.00>

RECIBIDO/RECEIVED: 30/09/2019

ACEPTADO/ACCEPTED: 02/09/2020