

Caracterización geoquímica de suelos de la Antártida como parte de la “Segunda Expedición
Científica de Colombia a la Antártida”

Christian Julián Delgado Mateus, Andrés Felipe Morales Guerrero

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogos

Director

Carlos Albero Ríos Reyes
Geólogo PhD. en Ciencias Aplicadas

Codirector

José Antonio Henao Martínez
PhD. en Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico Químicas
Escuela de Geología
Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A Dios por todas las bendiciones que me ha dado durante la vida y la gran oportunidad de ser parte de este hermoso proyecto.

A mi familia por apoyarme cada día y en cada paso de mi vida: a mi madre Libia Mateus porque sin la dedicación que le imprime a la familia nada sería posible, a mi padre Cristian Delgado por enseñarme lo importante que es la nobleza y a mi hermana Laura Delgado por apoyarme.

A mi novia María Paula Barrera Blanco por generar en mí el deseo de ser mejor cada día, por alegrarme la vida y ser la mujer más hermosa del universo en todo sentido.

A mi primo Gonzalo Delgado por cada consejo y ayuda que me dio durante mi vida tanto personal como académica.

A mi compañero Andrés Morales por siempre creer en las ideas planteadas en esta investigación y ser buen compañero y amigo durante el tiempo compartido.

Al grupo de trabajo de la Fuerza Aérea Colombiana, liderado por Alexander Casallas, por aceptarnos y enseñarnos como realizar una investigación trabajando en equipo.

Christian Julián Delgado Mateus

Dedicatoria

El esfuerzo empleado en este trabajo se lo otorgo en especial a mí querido tío Víctor Cadena (Q.E.P.D) que, con su apoyo incondicional, sus enseñanzas y lecciones de vida contribuyeron en gran medida a formar a la persona que soy ahora, siempre estaré agradecido con la vida de haber tenido la oportunidad de conocer a un gran ser de luz el cual representa para mí el ejemplo más valioso de vida y sabiduría.

A Clara Morales, una persona de la que siempre estaré en deuda y muy agradecido por su apoyo incondicional, su sincero cariño y su constante voluntad de cada día contribuir para hacer de este, un mundo mejor.

A mis familiares que han contribuido a mi formación tanto académica como personal de los que destaco a mi hermano Alfonso Javier Morales G y mi padre Gabriel Alfonso Morales W los cuales me han demostrado que en la medida de lo posible estarán ahí para apoyarme.

A mi novia Daniela Giraldo Restrepo por su acompañamiento alentador, por la alegría que ha despertado en mí, por sus palabras que siempre llevan algo de ternura y por generar en mí una motivación de ser cada día mejor.

A mi compañero de tesis Christian Julián Delgado M por depositar su voto de confianza en mí y proponerme el desarrollo del proyecto y por su compañía a lo largo de la carrera en la que aprendí a través de él que hay que arriesgarse a hacer las cosas por más que se crean imposibles.

A todo el equipo de la Fuerza Aérea en especial a Alexander Casallas por su gran espíritu de hermandad y por enseñarme que las ideas más descabelladas son las que mueven y hacen crecer el mundo.

Andrés Felipe Morales Guerrero

Agradecimientos

A Dios por brindarnos esta magnífica oportunidad en nuestras vidas.

A la Universidad Industrial de Santander y a su Escuela de Geología.

A nuestro director de proyecto de grado, el profesor Carlos Alberto Ríos Reyes por todo su apoyo, su tiempo, sus enseñanzas y por contribuir con toda su experiencia en el desarrollo de la investigación.

A nuestro codirector de proyecto de grado, el profesor José Antonio Henao Martínez por su colaboración y apoyo incondicional en el desarrollo de la investigación.

Al Grupo de Investigación de Geología Básica y Aplicada (GIGBA) por abrirnos sus puertas a través del Semillero de Hidrogeología y permitirnos ser partícipes de sus eventos y divulgación del conocimiento los cuales han sido indispensables para nuestro desarrollo académico.

Al laboratorio de Microscopia de la Universidad Industrial de Santander ubicado en el Parque Tecnológico de Guatigará y a su recurso humano: director Carlos Alberto Ríos Reyes y a la Física Carolina Mendosa Luna por guiarnos en el desarrollo de la obtención e interpretación de los datos obtenidos por el microscopio electrónico de barrido.

Al laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander ubicado en el Parque Tecnológico de Guatigará por su colaboración en el suministro de datos analíticos.

Al Geólogo del Servicio Geológico Colombiano – Litoteca Nacional, Andrés Mauricio Cáceres Bottia por compartir su conocimiento académico y profesional.

Al Geólogo David Enrique Yepes Franco.

A la Fuerza Aérea Colombiana y a la Comisión Colombiana del Océano.

Al expedicionario Antártico Técnico Segundo de la Fuerza Aérea Colombiana Edwin Alexander Casallas Moreno el cual nos enseñó que las ideas más inciertas se pueden desarrollar y volver realidad que junto con su equipo de trabajo: El PhD en Física Teórica Fernando Andrés Quiñonez Granados por sus agradables charlas sobre Física de Partículas, A la Ingeniera Electrónica Giovanna Estefanía Ramírez Ruiz por su excelente acompañamiento en las diferentes actividades paralelas a la investigación Antártica, A la Ingeniera Aeronáutica María Betzabe Rubiano Esmeral por su acompañamiento en el desarrollo del proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	19
1. Objetivos.....	21
1.1 Objetivo General.....	21
1.2 Objetivos Específicos	21
2. Localización.....	22
3. Metodología.....	24
3.1 Primera Etapa: Compilación de información	24
3.2 Segunda Etapa: Trabajo de Laboratorio	25
3.2.1 Metodología de recolección y obtención de las muestras en la zona de estudio.....	26
3.2.2 Metodología para el análisis de Gamma Espectrometría	28
3.2.3 Metodología para la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	29
3.2.4 Metodología para la Difracción de Rayos X (DRX).....	30
3.2.5 Metodología para el análisis por medio de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-MS	31
3.3 Tercera Etapa: Oficina.....	32
3.4 Cuarta Etapa: Redacción y elaboración del informe final.....	33
4. Marco Referencial	33
4.1 Qué es la Antártica	33
4.2 Radiación en el Continente Antártico.....	36
4.2.1 Uranio	38
4.2.2 Potasio	39

4.2.3 Torio	39
4.3 Evolución geológica	42
4.3.1 Evento extensional del Triásico tardío al Jurásico temprano	46
4.3.2 Evento de Transpresión dextral del Jurásico tardío	47
4.3.3 Extensión y magmatismo del Cretácico	48
4.3.4 Compresión del Cretácico tardío	51
4.4 Geología Isla Marambio	51
4.4.1 Geomorfología de la isla de Marambio	53
4.5 parámetros medio-ambientales del continente antártico y de la isla Marambio.....	53
4.5.1 Temperatura.....	54
4.5.2 Humedad.....	55
4.5.3 Pluviosidad	56
4.5.4 Factor eólico	56
4.5.5 Factor biótico.....	57
4.5.6 Niveles de PH	57
4.6 Colombia en la Antártica.....	57
4.7 Trabajos Anteriores en contexto similar.....	62
5. Resultados.....	64
5.1 Resultados Gamma Espectrometría.....	64
5.1.1 Análisis muestra ANT-1	64
5.1.2 Análisis muestra ANT-2.....	65
5.2 Resultados Microscopía de Barrido Electrónico MEB.....	67
5.3 Resultados Difracción de Rayos X.....	70

5.3.1 Análisis DRX para ANT-1	70
5.3.2 Análisis DRX para ANT-2.....	72
5.4 Análisis ICP-MS.....	74
5.4.1 Metales Alcalinos	74
5.4.2 Metales Alcalinotérreos.....	75
5.4.3 Metales de Transición.....	75
5.4.4 Boroideos.....	78
5.4.5 Carbonoideos.....	79
5.4.6 Grupo del Nitrógeno.....	80
5.4.7 Anfígenos.....	80
5.4.8 Lantánidos	81
5.4.9 Actínidos.....	81
5.5 Caracterización y clasificación de las dos muestras.....	83
6. Discusión	88
7. Conclusiones.....	91
8. Recomendaciones	93
Referencias Bibliográficas.....	94

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Condiciones para el Microscopio de Barrido Electrónico</i>	29
Tabla 2. <i>Condiciones de medición para Difracción de Rayos X para las muestras ANT-1 y ANT-2 en el difractor de polvo BRUKER modelo D8 ADVANCE</i>	31
Tabla 3. <i>Síntesis de la totalidad de expediciones de Colombia al continente Antártico hasta el año 2018.</i>	58
Tabla 4. <i>Relacion de datos obtenidos de concentración de elementos K, U, Th con los estándares normales geológicos</i>	66
Tabla 5. <i>Minerales encontrados en la muestra ANT-1 y correlacionada con los espectros de Severin (2005)</i>	67
Tabla 6. <i>Minerales encontrados en la muestra ANT-1 y correlacionada con los espectros de Severin (2005) y Welton (1984)</i>	69
Tabla 7. <i>Resultados análisis de ICP-MS para las dos muestras: ANT-1 y ANT-2 comparándolos con los SRM 2709a - San Joaquin Soil y el SRM 2710a - Montana 1 Soil</i>	82
Tabla 8. <i>Características físicas de las muestras ANT-1 Y ANT-2.</i>	88

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Imagen de la localización de las dos muestras ANT-1 y ANT-2	23
<i>Figura 2.</i> Imagen de la localización de las dos muestras ANT-1 y ANT-2	23
<i>Figura 3.</i> Fotografía de la muestra ANT 1 colocada sobre una superficie de aluminio	25
<i>Figura 4.</i> Fotografía de la muestra ANT 2 colocada sobre una superficie de aluminio	26
<i>Figura 5.</i> Fotografía del área de la recolección de la muestra ANT en la Isla Marambio	27
<i>Figura 6.</i> Fotografía del área de la recolección de la muestra ANT en la Isla Marambio	28
<i>Figura 7.</i> Imagen del continente Antártico	34
<i>Figura 8.</i> Imagen con las ocho áreas más representativas que no están cubiertas de hielo en su totalidad.....	35
<i>Figura 9.</i> Imagen de la división administrativa y política del continente antártico, mostrando los principales países que están presentes sobre su área.....	36
<i>Figura 10.</i> Distribución de la radiación que afecta a la humanidad.....	37
<i>Figura 11.</i> Imagen que desglosa la cadena de decaimiento del Uranio-238.....	38
<i>Figura 12.</i> Serie del decaimiento radiactivo del Torio-232, mostrando la radiación emitida en cada uno de sus decaimientos	40
<i>Figura 13.</i> Ilustración realizada por la NASA del campo magnético de la tierra mostrando las diferentes zonas y capas	41
<i>Figura 14.</i> Cambios en el campo magnético en el continente antártico medidos en nanoTeslas.	42
<i>Figura 15.</i> Reconstrucción de Antártica occidental desde la ruptura de Gondwana. (a) Jurásico temprano, 200 Ma. se genera la ruptura de Gondwana. (b) Jurásico tardío,	

160 Ma. se genera la separación de Gondwana en dos partes: Gondwana Oriental y Gondwana Occidental. (c) Cretácico temprano, 130 Ma. se reconoce el oriente del continente Antártico y su desplazamiento hacia el polo sur..... 44

Figura 16. Diagramas secuenciales que ilustran los eventos geológicos con mayor importancia en la formación de la península Antártica para cuatro periodos de tiempo geológico: (a) Triásico tardío – Jurásico tardío, (b) Jurásico tardío – Cretácico temprano, (c) Cretácico temprano y (d) Cretácico medio. Muestra como son los esfuerzos “ σ ” para cada periodo..... 48

Figura 17. Ilustración de los eventos más representativos que afectaron la sedimentación que se representa como “Sed.”, el magmatismo que se representa como “mag.” y las deformaciones que se representa como “def.” en la Península Antártica desde el Triásico medio (240 Ma) hasta el Paleoceno (50 Ma)..... 50

Figura 18. Campo de temperatura media de la Antártida 55

Figura 19. Banderas de los países adheridos al tratado Antártico 59

Figura 20. Imagen modificada de la muestra ANT-1 mostrando los diámetros de los granos más representativos para clasificarlos de acuerdo al tamaño del grado de Blott y Kenneth, (2012) 86

Figura 21. Imagen modificada de la muestra ANT-2 mostrando los diámetros de los granos más representativos para clasificarlos de acuerdo al tamaño del grado de Blott y Kenneth, (2012). 87

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS).

Apéndice A. Resultados microscopia electrónica de barrido (MEB) para la muestra ANT-1

Apéndice B. Resultados microscopia electrónica de barrido (MEB) para la muestra ANT-2

Apéndice C. Resultados difracción de rayos x (DRX)

Apéndice D. Resultados gamma espectrometría

Apéndice E. Resultados del análisis inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)

Resumen

Título: Caracterización Geoquímica de Suelos de la Antártida como parte de la “Segunda Expedición Científica de Colombia a la Antártida”*

Autores: Christian Julián Delgado Mateus, Andrés Felipe Morales Guerrero**

Palabras claves: Isla Marambio, Antártida, Suelos desérticos, MEB, DRX, ICP-MS, Radiación.

El presente trabajo se desarrolla dentro del marco investigativo de la segunda expedición científica de Colombia a la Antártida “Almirante Lemaître” Verano Austral 2015-2016, en dicha expedición se recolectaron muestras de suelos en la Isla Marambio, debidamente empacadas y marcadas con sus respectivas coordenadas por personal de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), dos de esas muestras nos fueron suministradas con objetivo de identificar niveles de radiación de procedencia natural acelerado por debilidades de campo magnético y capa de ozono, además de posibles anomalías y caracterización litológica de los sedimentos. En cuanto a los niveles de radiación se analizó mediante la espectrometría gamma la cual identificó los niveles de radionúclidos de K, U, Th los cuales en base a la Resolución 18-1434 del Ministerio de Minas y Energía se compararon con niveles estándares de referencia y se determinó así un aporte radiactivo dentro de los niveles normales lo que indica que estos materiales no representan ningún riesgo para la salud operacional y generan muy poca radiactividad natural. Se catalogaron las muestras como suelos de desierto frío con base en sus fases minerales y características físicas y químicas identificadas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Difracción de Rayos X (DRX), se realizó análisis de espectrometría de masas con inducción de plasma acopado o (ICP-MS) por sus siglas en inglés, con intención de determinar cualquier posible anomalía pero los niveles de los 48 elementos, además de inferir mediante las proporciones de elementos un posible aporte ígneo relacionado con el magmatismo evidenciado en algunos sectores de la isla.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto Ríos Reyes, PhD. en Ciencias Aplicadas.

Abstract

Title: Geochemical characterization of Antarctic soils as part of the Second Scientific Expedition from Colombia to Antarctica*

Autors: Christian Julián Delgado Mateus, Andrés Felipe Morales Guerrero**

Keywords: Marambio Island, Antarctic, desert Soils, SEM, DRX, ICP-MS, Radiation.

This work is developed within the research framework of the second scientific expedition from Colombia to Antarctica "Almirante Lemaître" Austral Summer 2015-2016, in this expedition soil samples were collected in the Marambio Island, prepares packages and brands with their respective coordinates by personnel of the Colombian Air Force (FAC), these two tests with objective parameters of detection of natural radiation levels, in addition to possible anomalies and lithological characterization of the sediments. In terms of radiation levels, gamma spectrometry was used to analyze the levels of radionuclides of K, U, which are based on Resolution 18-1434 of the Ministry of Mines and Energy, were compared with reference levels and determined thus a radioactive support within normal levels that what these materials do not represent any risk to operational health and generate very little natural radiation. The samples were cataloged as desert soils with Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), mass spectrometry analysis with plasma induction or (ICP-MS) was carried out, with the intention of of being present or by the levels of the 48 elements, besides inferring by the proportions of the elements, a possible item related to the magmatism evidenced in some sectors of the island.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Carlos Alberto Ríos Reyes, PhD. in Applied Sciences.

Introducción

Colombia ha dado inicio a sus investigaciones en la denominada “Terra Australis incógnita” en las últimas tres décadas, estas investigaciones se han realizado de la mano de diferentes instituciones gubernamentales y académicas.

Para la generación del conocimiento y tener unos objetivos y metas por cumplir la Comisión Colombiana del Océano ha conformado un Programa Antártico Colombiano, en el cual la Fuerza Aérea Colombiana se encuentra vinculada y adscrita siendo un componente fundamental en las expediciones al continente blanco, para el año 2018 se han completado un total de III expediciones antárticas y se encuentra en curso la IV, el presente trabajo hace parte del trabajo de investigación titulado: “Estudio radiométrico de las características atmosféricas de la zona Antártica para el desarrollo de la aviación en Colombia” de la II expedición a la Antártida “Almirante Lemaitre”, la cual se dio en el verano austral 2015 – 2016.

Durante la primera expedición de Colombia a la Antártida no se tienen unos antecedentes tan específicos en la geología de las diferentes zonas de estudios, por eso la Fuerza Aérea Colombiana decidió ampliar el conocimiento de esta ciencia para la II expedición a la Antártida “Almirante Lemaitre” vinculando por medio del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA) el presente trabajo de investigación con dos muestras de suelo recolectadas en la zona de estudio, para lograr esto se decide realizar un análisis geoquímico inorgánico de las muestras con el fin de reconocer su importancia geológica y radiométrica para evaluar su

importancia e impacto en los datos radiométricos que se pueden tomar a futuro en la zona de estudio.

El análisis geoquímico de las dos muestras se genera por medio de las técnicas: Difracción de Rayos X (X-Ray Diffractometry - XRD), Microscopía de Barrido Electrónico (Scanning Electron Microscopy - SEM), Gamma Espectrometría (Gamma-Ray Spectrometry – GRS) y Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry - ICP-MS).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar la caracterización geoquímica de dos muestras de suelo de la Antártida para describir su composición y radiometría estableciendo su importancia en la toma futura de datos radiométricos en los diferentes proyectos que busquen ampliar el conocimiento en la isla de Marambio de la península Antártica.

1.2 Objetivos Específicos

- Analizar los niveles de radiación emitidos por las muestras por medio de la espectrometría gamma.
- Determinar la composición mineralógica de los suelos usando difracción de rayos x (DRX).
- Analizar la composición elemental de las muestras a partir de microscopia electrónica de barrido (MEB).
- Analizar los elementos inorgánicos de las muestras por medio de la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) enfocado en los elementos radiactivos.
- Evaluar los niveles de radiación presentes en las dos muestras de la Isla de Marambio teniendo en cuenta los datos obtenidos por cada técnica utilizada.
- Establecer el impacto que generan las dos muestras en la toma de datos radiométricos que se realizan en la zona de estudio.

2. Localización

El área de estudio se encuentra ubicada en la isla de Marambio que hace parte de la Península Antártica, está conformada por la ubicación de dos sitios específicos de muestreo de los cuales se recolectaron las dos muestras denominadas como ANT-1 y ANT-2 con coordenadas S: 64°14'02.4" WO: 56°39'11.3" y S: 64°14'27.9" WO: 56°35'54.6" respectivamente, determinadas mediante un GPS como se puede observar en la *Figura 1* se representa la ubicación de las muestras con una señalización mediante puntos de color rojo.

El estudio se centró en los lugares más cercanos a la base argentina Marambio, debido a que en la II expedición de Colombia a la Antártida “Almirante Lemaitre” los expedicionarios se ubicaron y alojaron en esta base, siendo estas coordenadas las más óptimas y próximas a los investigadores.

Para acceder al lugar de muestreo de la muestra ANT-1 es necesario recorrer aproximadamente 850 metros en dirección Norte-Oeste y la única forma de llegar es caminando, para acceder al lugar de muestreo de la muestra ANT-2 es necesario recorrer aproximadamente 280 metros en dirección Este y la única forma de llegar es caminando.

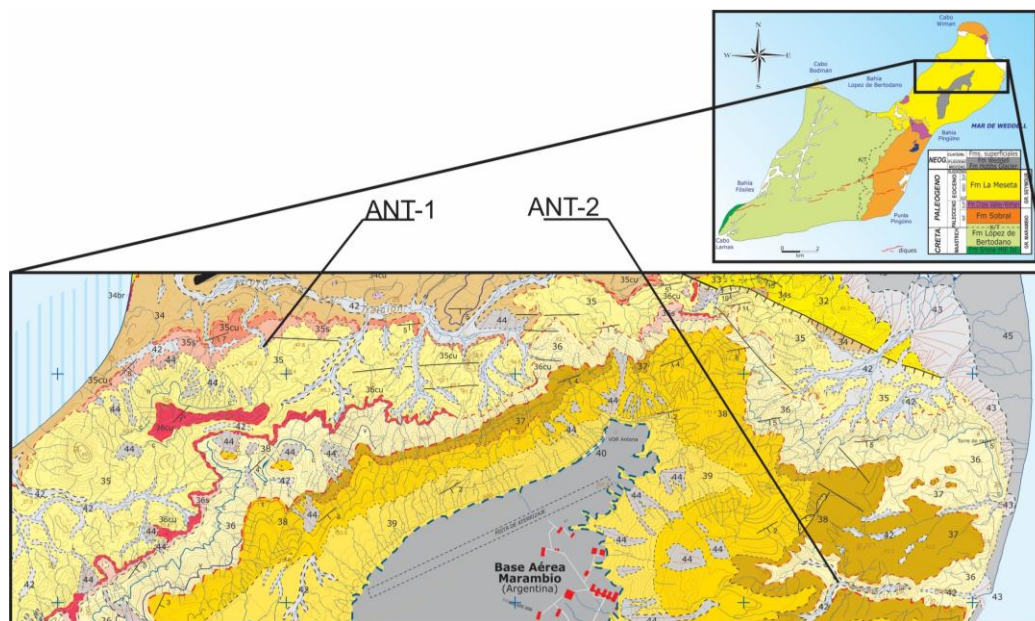


Figura 1. Imagen de la localización de las dos muestras ANT-1 y ANT-2 realizadas por medio de la georreferenciación del mapa Geológico de la isla de Marambio Montes, 2010.

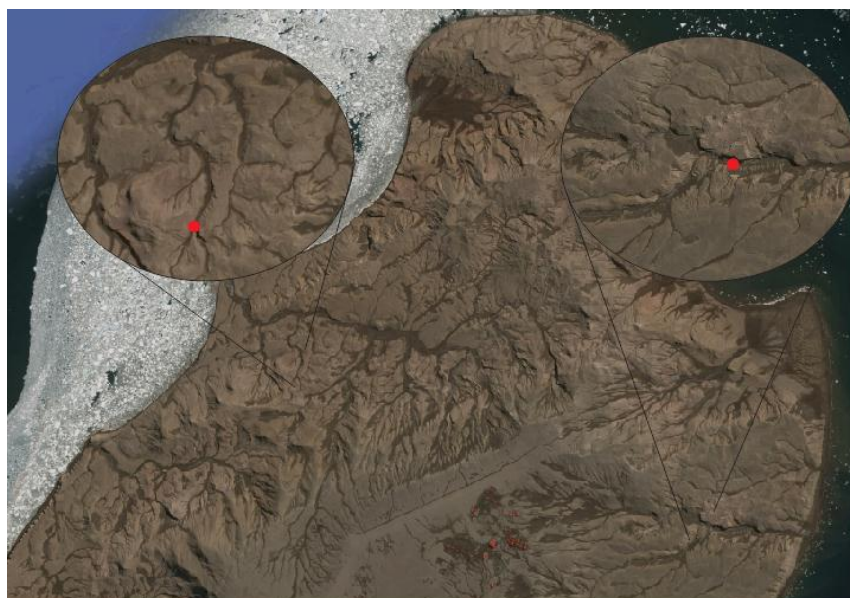


Figura 2. Imagen de la localización de las dos muestras ANT-1 y ANT-2. Recuperada de Google Earth.

3. Metodología

Este trabajo investigativo se desarrolló por medio del cumplimiento de cinco etapas principales, las cuales tienen una metodología interna característica y se explican a continuación:

3.1 Primera Etapa: Compilación de información

La primera etapa es la correspondiente al planteamiento del problema, la compilación de recursos bibliográficos: libros, artículos, revistas científicas, proyectos, bases de datos, análisis referentes, entre otros, posterior a esto se realiza una selección y organización para el análisis de la información enfocada en tres tópicos principales: el primero sobre la geología de la isla de Marambio (unidades geológicas, suelos del área de estudio, evolución geológica, etc.), el segundo: sobre las técnicas analíticas usadas en el desarrollo del trabajo (principios de las técnicas utilizadas, preparación de las muestras, metodologías aplicadas en diferentes trabajos geológicos, etc.) y el tercero sobre las expediciones a la Antártida y la radiometría (proyectos de investigación similares, informes de la Comisión Colombiana del Océano, informes del Instituto Antártico Argentino, etc.) y de acuerdo con la información obtenida se planificará la segunda etapa: trabajo de laboratorio.

3.2 Segunda Etapa: Trabajo de Laboratorio

Etapa enfocada en la realización de todos los análisis en los laboratorios, se inicia con el análisis para conocer la composición elemental de las dos muestras, para esto se realiza una microscopía electrónica de barrido (MEB), posteriormente se realiza el análisis de difracción de rayos X (DRX) con el fin de conocer la mineralogía de las muestras, luego se continúa el uso de la técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para conocer a detalle la geoquímica inorgánica enfocando el análisis en los elementos radiactivos, por último, para conocer los niveles de radiación: se realiza un análisis con espectrometría gamma en el laboratorio.



Figura 3. Fotografía de la muestra ANT 1 colocada sobre una superficie de aluminio.



Figura 4. Fotografía de la muestra ANT 2 colocada sobre una superficie de aluminio.

3.2.1 Metodología de recolección y obtención de las muestras en la zona de estudio. La recolección de las muestras fue realizada por personal de la Fuerza Aérea Colombiana durante la II expedición de Colombia a la Antártida “Almirante Lemaitre” en el verano austral 2015 – 2016, para la ubicación de los puntos de muestreo se seleccionaron según los parámetros ambientales, logística y programas de la expedición, se usó instrumentación básica y liviana de campo: una pala plegable de supervivencia militar, brújula militar Eyesky, GPS Garmin etrex30, mapas locales de la isla, empaques de bolsa hermética ziploc y cajas protectoras Pelican. El procedimiento para la toma de la muestra fue el siguiente:

1. Ubicación del punto de interés en el mapa.
2. Posicionamiento correlacional entre el punto de interés y la ubicación actual.
3. Verificar tiempo y clima.
4. Traslado al punto de interés.
5. Georreferenciación del punto actual y correlación con el punto de interés.

6. Ubicación del área de aproximadamente un metro cuadrado, y se realizó un barrido sistemático, para tomar un área representativa y que la muestra tuviera todo el material del área.
7. Se procedió al empaque de aproximadamente 200 gramos de muestra, los cuales se empacaron en capas de bolsas herméticas ziploc, por cada muestra se usaron un total de cuatro bolsas herméticas ziploc.
8. Se etiquetó la muestra empacada y se guardó en maletas de transporte protectoras de Pelican.

Posterior a todo el procedimiento de empaque de las muestras, se transportaron hacia Colombia donde se mantuvieron empacadas y aisladas para su posterior análisis.



Figura 5. Fotografía del área de la recolección de la muestra ANT en la Isla Marambio.

Fuente: Personal de la fuerza aérea.



Figura 6. Fotografía del área de la recolección de la muestra ANT en la Isla Marambio.

Fuente: Personal de la fuerza aérea.

3.2.2 Metodología para el análisis de Gamma Espectrometría. Para el análisis por medio de Gamma Espectrometría, se tomó la totalidad de las muestras ANT-1 y ANT-2 y se distribuyeron uniformemente en el mismo empaque con el cual se movilizaron a los laboratorios desde que se obtuvieron, posterior a esto se tomaron los datos de la dosis radiactiva con un gamma espectrómetro BGO-SUPER-SPEC (RS-230), con el cual se ubicó a una distancia de 5 centímetros aproximadamente y se dejó el tiempo suficiente para que marcara el contenido de los elementos Uranio, Torio y Potasio, y de la dosis radiactiva de la muestra en ese instante.

3.2.3 Metodología para la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Se separaron aproximadamente 50 gramos de la totalidad de las muestras en dos bolsas zip de plástico etiquetándolas como ANT-1 y ANT-2 respectivamente, para obtener los mejores resultados las muestras se prepararon con un recubrimiento de grafito (Melgarejo, 2010) siguiendo el protocolo del Laboratorio de Microscopía Electrónica de las instalaciones de Guatiguará UIS, el recubrimiento se desarrolló con el equipo metalizador y evaporador de carbón QUORUM Q150R ES, generando la capa conductora a base de carbón en cada una de las muestras, después se retiraron los dos ejemplares y se etiquetaron como ANT-1 y ANT-2 respectivamente. Ya listos los ejemplares para su análisis se ubicaron en Microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 650 FEG ambiental, se analizó primero el ejemplar ANT-1 y posteriormente el ejemplar ANT-2, para cada caso se generaron las condiciones óptimas de vacío y se realizaron observaciones a diferentes zooms de forma ascendente, iniciando con áreas de análisis de 1.739mm de alto con 1.978mm de ancho y con una distancia real de la muestra al detector (HFW) de 1.99 mm, hasta llegar a un detalle mayor de hasta 0.06 mm² s, las condiciones del MEB se pueden observar en la *Tabla 1*.

Tabla 1. *Condiciones para el Microscopio de Barrido Electrónico.*

Condiciones técnicas para el análisis MEB	
Resolución de la imagen	Imágenes de alta resolución a alto vacío con 3 nm a 1 Kv
Voltaje de aceleración del haz de electrones	20.00 Kv
Rango de aumento	150x - 1000x
Detector	BSED
Distancia real de la muestra al detector (HFW)	1.99 mm
Distancia de trabajo	10.4 mm

Para el proceso de selección de áreas de estudio en los ejemplares se realizó mediante la diferenciación de la tonalidad de los colores grises de la imagen, teniendo en cuenta que un área que tenga un brillo mayor representa elementos con número atómico más elevado (Leng, 2008) y así generar una selección en base al contraste del área seleccionada esperando que la diferencia se note en los resultados, en total se tomaron 10 puntos para ANT-1 y 10 puntos para ANT-2 en áreas diferentes respectivamente.

Para el análisis de los datos obtenidos por el MEB se realiza siguiendo el planteamiento de la investigación cuantitativa, especificando en el procedimiento de correlación, es decir, se genera una comparación entre la bibliografía consultada de espectros MEB-EDS con los datos obtenidos de las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, para identificar los posibles minerales presentes en los puntos realizados en el laboratorio.

3.2.4 Metodología para la Difracción de Rayos X (DRX). La metodología empieza con la separación de aproximadamente 100 gramos de las muestras ANT-1 y ANT-2, posteriormente los ejemplares ingresaron al laboratorio y se realizó un análisis de cantidad de humedad, se encontró una humedad alta en la muestra ANT-1 por lo cual fue necesario que se realizara un secado a 60°C durante 18 horas, teniendo el resultado del secado las dos muestras se molturaron y homogenizaron en un mortero de ágata hasta llevarlos a un tamaño de partícula menor de 38 μm que corresponden a 400 mesh. Seguido a esto los especímenes fueron montados en dos porta muestras respectivamente de polimetilmetacrilato (PMMA) utilizando la técnica de llenado frontal.

El análisis de Difracción de Rayos X se realizó en un difractómetro de polvo BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci bajos las condiciones de la *Tabla 2*.

Tabla 2. *Condiciones de medición para Difracción de Rayos X para las muestras ANT-1 y ANT-2 en el difractómetro de polvo BRUKER modelo D8 ADVANCE.*

CONDICIONES PARA DRX	
Voltaje	40 kV
Corriente	40 mA
Rendija de divergencia	0,6 mm
Rendijas Soller primario y secundario	2,5°
Muestreo	0,02035° 2Theta
Rango de medición	3,5° - 70,0° 2Theta
Radiación	CuK α 1
Filtro	Níquel
Uso de anti-dispersor de aire	Si
Detector	Lineal LynxEye
Tipo de barrido	A pasos
Tiempo de muestreo	0,8 segundos

Por último, para generar el análisis cualitativo de las fases que están presentes en los ejemplares seleccionados de las muestras se realizaron mediante la comparación de los perfiles observados con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del Internacional Centre for Diffraction Data (ICDD).

3.2.5 Metodología para el análisis por medio de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-MS. Se separaron aproximadamente 80 gramos de las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, se pulverizaron y tamizaron, posteriormente se realizó un seleccionado de las muestras generando sub-muestras para tener repuestos en dado caso que se presente algún error en el procedimiento del análisis, luego se empacaron en un nuevo embalaje catalogando las muestras por separado y respectivamente usando códigos de barras internos del laboratorio.

Se generó el análisis de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente usando el método de cuatro ácidos utilizando células de colisión/reacción para poder proporcionar los límites de detección más bajos con la tecnología actual del laboratorio, la digestión de la muestra se realizó de la siguiente manera:

1. De la muestra preparada se selecciona un peso mínimo de 0,25 gramos y se digiere con 1,5 ml de ácido nítrico y perclórico concentrado.
2. Después se digiere con ácido fluorhídrico concentrado.
3. La mezcla resultante se calienta a 185 °C hasta sequedad incipiente.
4. Se lixivia con ácido clorhídrico al 50% y se diluye a volumen con HCl débil.
5. La mezcla final es analizada por ICP-MS e ICP-AES corrigiendo las interferencias entre elementos espectrales.
6. Se organizan y sintetizan los resultados en tablas.

Para la interpretación de los datos por medio de correlación, se usarán las tablas finales del análisis en el laboratorio y se compararán con Materiales Estándares de Referencia encontrados en la bibliografía y referencias recopiladas.

3.3 Tercera Etapa: Oficina

Realización de la organización, tratamiento de los datos e interpretación de las correlaciones de los resultados obtenidos en la etapa segunda etapa.

3.4 Cuarta Etapa: Redacción y elaboración del informe final

Se organizan la totalidad de los resultados elaborando tablas, imágenes, figuras y apéndices para enfocar la información y que la lectura del trabajo de investigación tenga un orden para así facilitar su lectura y entendimiento.

4. Marco Referencial

4.1 Qué es la Antártica

El continente Antártico constituye una de las regiones más inaccesibles para el hombre, debido a su aislamiento, temperatura y ubicación geográfica. Sus diferentes características extremas como son: clima, geomorfología, radiación, los océanos y corrientes de vientos, entre otras, limita los estudios y por lo tanto el conocimiento en las diferentes ciencias de interés es reducido (geología, biología, oceanografía, entre otros), más sin embargo esa tendencia cambió en los últimos años (Silva, 2009).



Figura 7. Imagen del continente Antártico. Recuperada de Google Earth.

El área superficial total del continente Antártico sin contar sus islas es de aproximadamente 13.177.000 km² (Silva, 2009) y diferentes autores han dividido el continente en áreas en donde la superficie no está completamente cubierta de hielo, ya que aproximadamente 45.000 Km² de su totalidad es libre de hielo, esa área corresponde a solamente 0.35% (Bockheim, 2015).

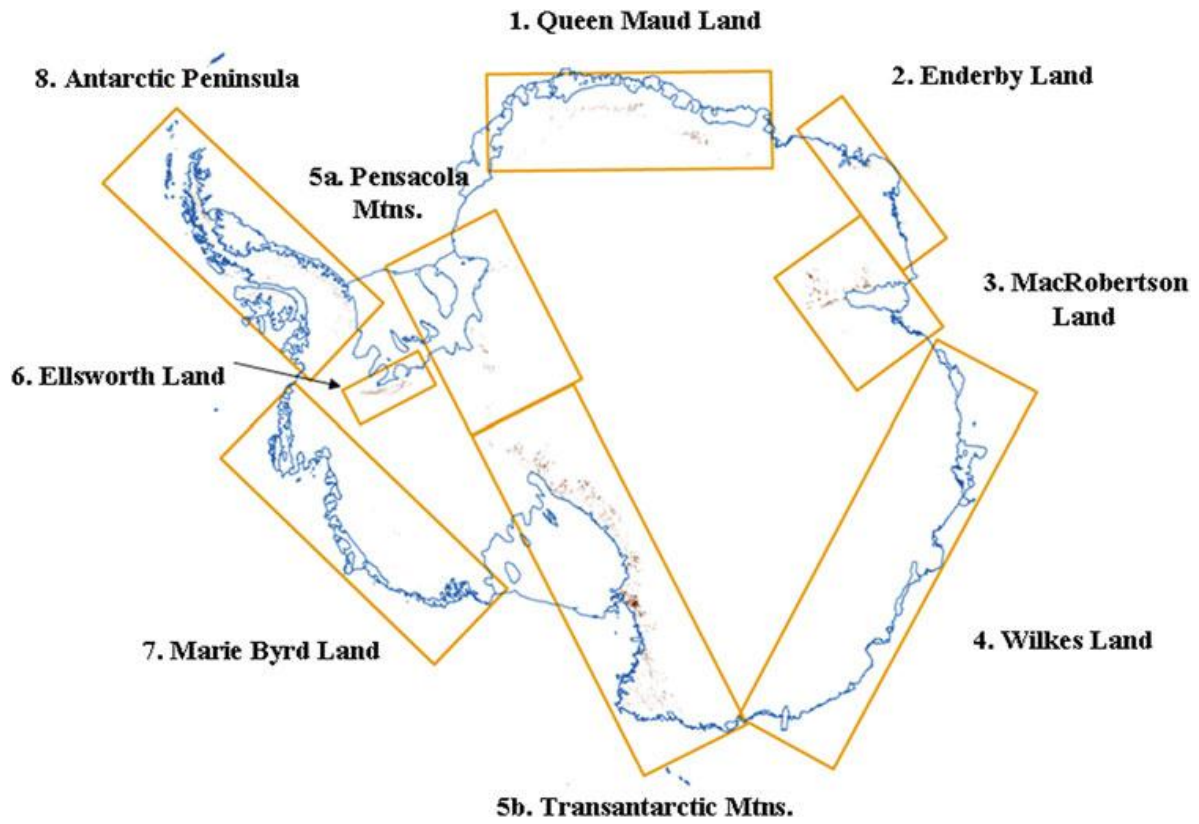


Figura 8. Imagen con las ocho áreas más representativas que no están cubiertas de hielo en su totalidad. Recuperada de Bockheim, 2015.

El protocolo al tratado antártico sobre protección del medio ambiente deja claro que el continente antártico es un patrimonio mundial y de protección medio ambiental, por eso algunos países se han vinculado a este tratado con el fin de proteger o hacerse cargo de ciertas áreas del continente (CPA, 2016), algunos autores se han encargado de generar mapas para reconocer la división política y administrativa del continente Antártico, en la cual destacan diferentes países: Chile, Argentina, Noruega, Australia, Francia, Nueva Zelanda, como es en el caso de la *Figura 9*, la cual es la división que generó la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional de España (2016).

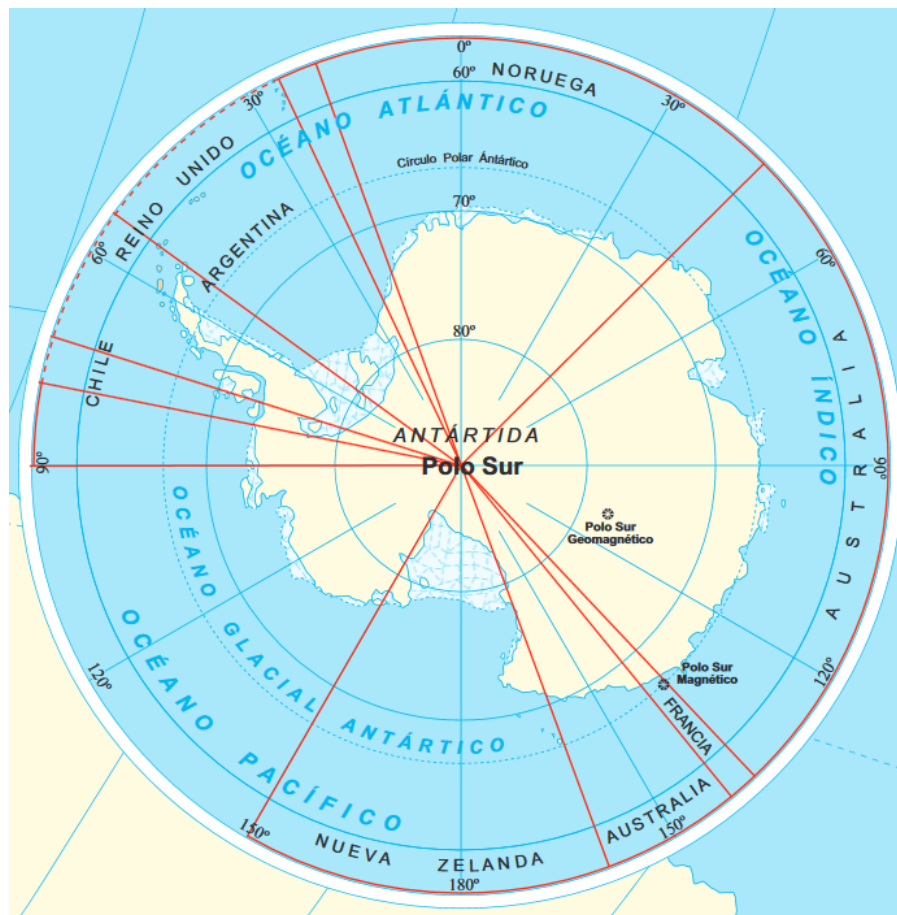


Figura 9. Imagen de la división administrativa y política del continente antártico, mostrando los principales países que están presentes sobre su área. Imagen tomada y modificada del mapa político del mundo la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional de España (2016).

4.2 Radiación en el Continente Antártico

La radiación presente en el ambiente llamada también radiación natural, se debe principalmente a tres fuentes: la primera es una fuente externa a nuestro planeta, se han categorizado como radiación cósmica, la segunda es una fuente que proviene de los elementos

radiactivos naturales que están presentes en rocas y suelos, y la tercera es una fuente que proviene de radionúclidos cosmogénicos producidos en la atmósfera (Suarez, 2000). Como se muestra en la *Figura 10* las radiaciones provenientes de fuentes naturales tienen aproximadamente el 69 % de la radiación total a la que están expuestos los seres vivos.

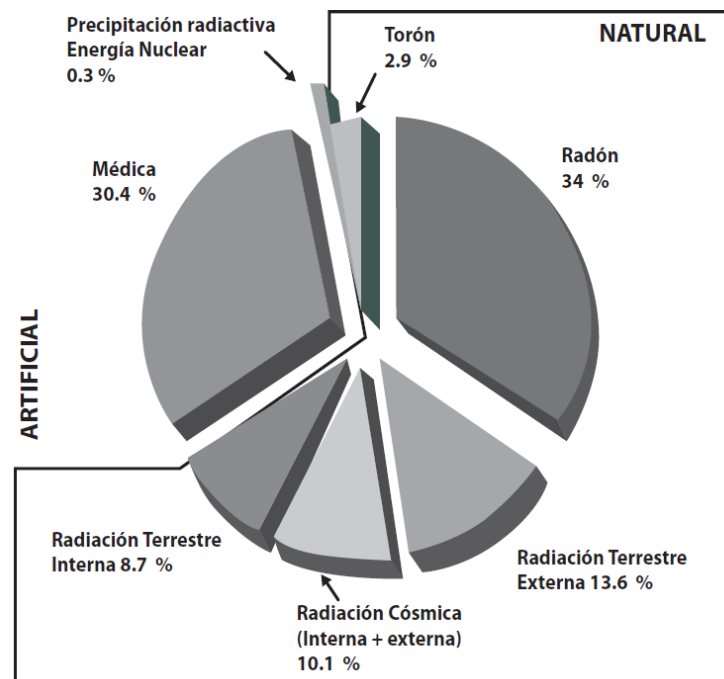


Figura 10. Distribución de la radiación que afecta a la humanidad.

Recuperada de Solis, 2011.

La radiactividad que proviene del ambiente es un proceso complejo que también se puede categorizar de acuerdo al tipo de radiación que emita la fuente, existen tres tipos: Radiación alfa, radiación beta y radiación gamma, en geología se usa principalmente la radiación gamma para hacer exploración de minerales radiactivos (Alonso, 2016), para esto se tiene que las principales fuentes son Uranio (U), Torio (Th) y Potasio (K).

4.2.1 Uranio. El elemento uranio natural consta principalmente de dos radionúclidos, el Uranio-238 (99,28 %) y el Uranio-235 (0,72 %) que son los padres iniciales de las principales series radiactivas (Suarez, 2000). En la *Figura 11* podemos observar la cadena de desintegración del Uranio con sus emisiones de radiación gamma, alfa y beta.

En los minerales es común encontrar todos los diferentes miembros de la serie, cuando están en equilibrio mantienen una relación constante que es producto de procesos geoquímicos como lixiviación, fijación, alteración, entre otros que pueden ocurrir en el transcurso del tiempo o también por factores netamente mecánicos que afectan las rocas. Este elemento cuando se encuentra en sedimentos se puede relacionar con minerales pesados (Mantilla, 2014).

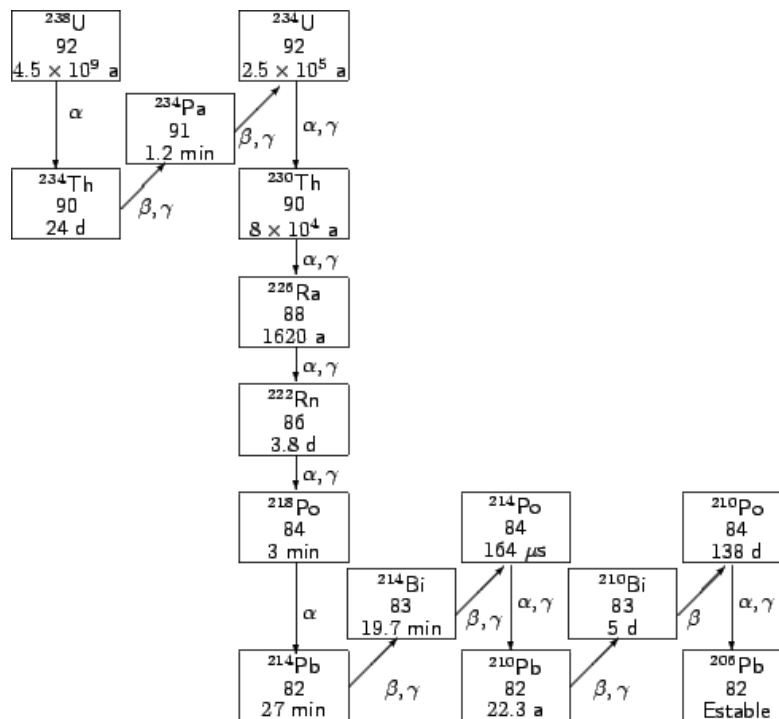


Figura 11. Imagen que desglosa la cadena de decaimiento del Uranio-238.

Recuperada de <http://www.ugr.es/~amaro/radiactividad/tema7/img81.gif>

4.2.2 Potasio. Un pequeño porcentaje del potasio natural es radiactivo, solamente el 0,0012 % que corresponde al Potasio-40, sus productos son estables, pero en su decaimiento generan radiación gamma (Suarez, 2000). Este mineral cuando se encuentra en sedimentos se relaciona con contenido de arcilla y minerales pesados (Mantilla, 2014).

4.2.3 Torio. El torio natural se restringe a un radionúclido específico que corresponde al Torio-232 y es padre de todas las series radiactivas que consta de 11 hijas, 6 emisoras de radiactividad (Suarez, 2000), como se observa en la *Figura 12*. Este mineral cuando se encuentra en sedimentos indica presencia de micas, arcillas micáceas y feldespatos micáceos (Mantilla, 2014).

La tierra junto con otros planetas del sistema solar posee un campo magnético, denominado campo magnético terrestre, este campo se divide en dos orígenes principales, el interno del globo terráqueo que se denomina campo secundario y proviene principalmente de las corrientes eléctricas en el núcleo líquido interno de la tierra que su composición mayoritaria es de hierro (Villanaín, 2016). También se conoce que otra parte del campo magnético se origina externamente a la tierra en las capas de la atmósfera y magnetosfera, y se le denomina campo primario o principal de la inducción generada por la actividad solar, como se muestra en la *Figura 13* (Villanaín, 2016).

Pero lamentablemente la protección que nos brinda el campo magnético no es constante, puesto que contiene fluctuaciones debido a cambios en el planeta y a sus características físicas como cualquier campo, varía en su intensidad entre 20.000 nT (nano-Tesla= 10^{-9} Tesla) en el ecuador y 70.000 nT en los polos (Villanaín, 2016). Las fluctuaciones han sido estudiadas por numerosos autores y se han centrado en la Antártica debido a la importancia que el continente

tiene para la vida en el planeta, en los polos el campo es más débil debido a que están cercanos a los polos magnéticos, con una desviación de 8°.

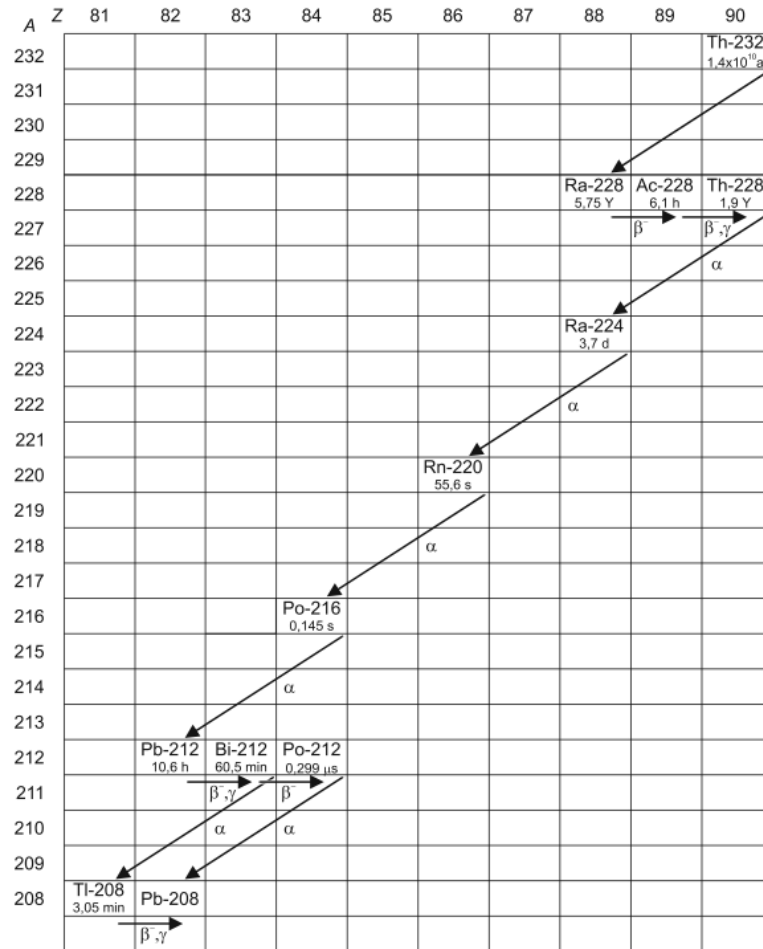


Figura 12. Serie del decaimiento radiactivo del Torio-232, mostrando la radiación emitida en cada uno de sus decaimientos. Recuperada de

<https://www.lddidactic.de/software/524221es/Content/Appendix/Th232Series.htm>

Pero a su vez algunos estudios han registrado que el flujo del núcleo tiene fluctuaciones que afectan al campo magnético en el continente Antártico, haciendo que tenga zonas más débiles que en el resto del planeta (Fox, 2005).

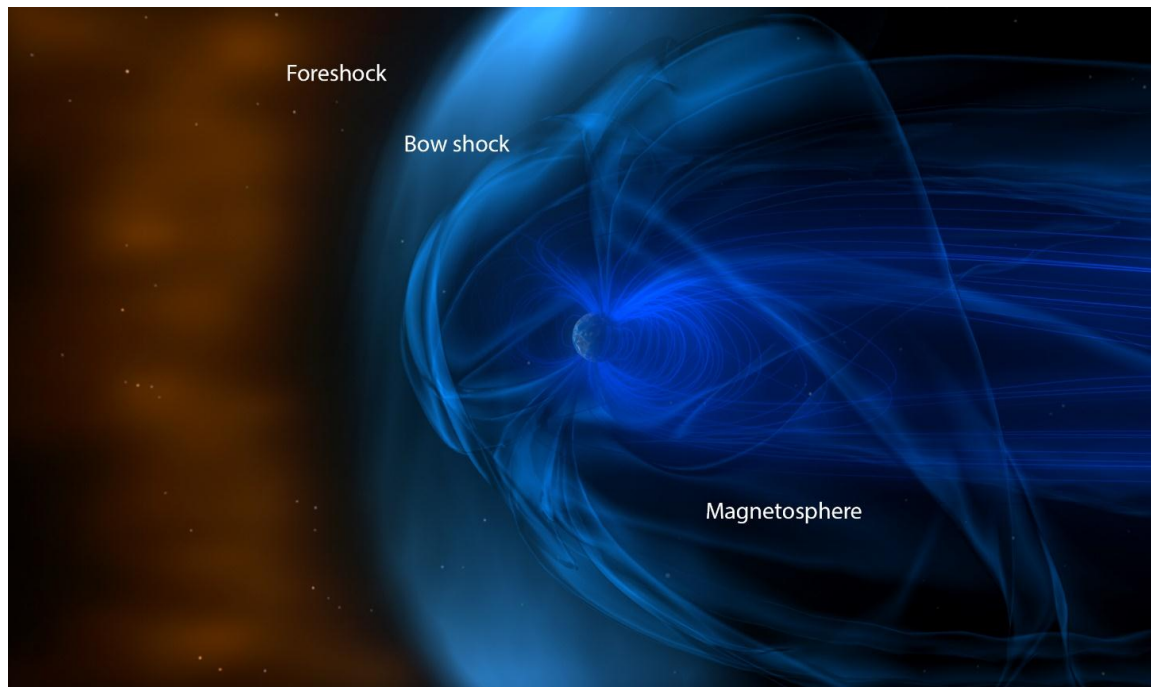


Figura 13. Ilustración realizada por la NASA del campo magnético de la tierra mostrando las diferentes zonas y capas. Recuperada de

https://www.nasa.gov/images/content/741654main_magnetosphere-orig_full.jpg

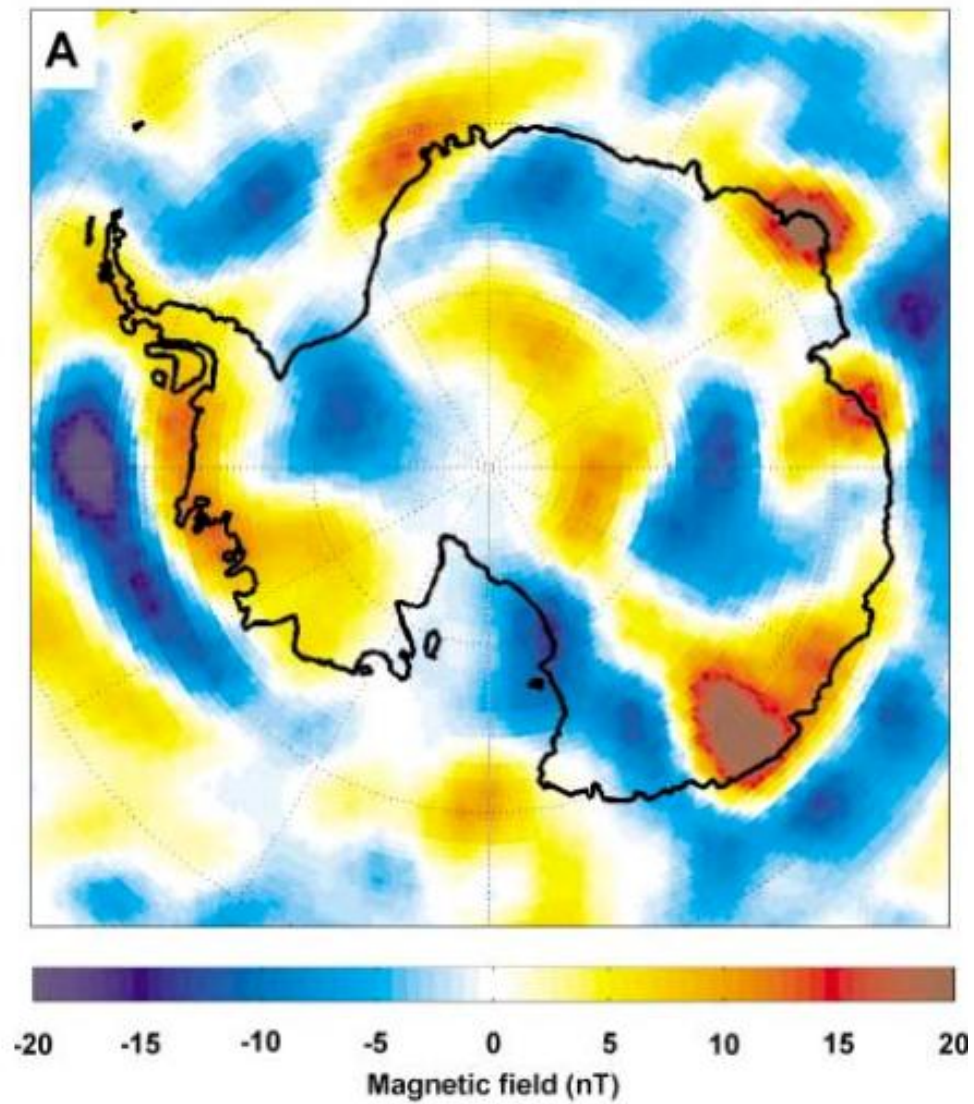


Figura 14. Cambios en el campo magnético en el continente antártico medidos en nanoTeslas. Recuperada de Fox, 2005.

4.3 Evolución geológica

Se conoce que el continente antártico tiene aproximadamente un área de 14.000.000 Km² teniendo en cuenta toda su extensión y sus islas (Fox y Cooper, 1994). En la actualidad el

continente presenta cambios y modificaciones en su geomorfología debido a que aproximadamente el 98% del continente está cubierto por hielo y básicamente en última instancia se comprende que estos cambios y la evolución está determinada principalmente por la tectónica de placas (Fitzgerald, 2002). El movimiento que aísla el continente blanco respecto a los otros continentes comienza principalmente con África apartándose de Antártica que describe un movimiento con dirección SW hacia el polo sur (Fitzgerald, 2002), esto condujo a una posición geográfica de la antártica lejana respecto a la posición geográfica de los demás continentes provocando el aislamiento térmico, el cambio climático y el ambiente polar frío actual (Lawver, 1992). Para comprender la evolución geológica de la Antártica primeramente tenemos que conocer sobre la historia tectónica del continente, y esta ha sido descrita por diferentes autores coincidiendo que el inicio se ubica desde la ruptura de Gondwana, un ejemplo de esto es la coincidencia de la forma de los límites y bordes de África, Australia e India que encajan de una manera correcta con los bordes del continente Antártico (Lawver, 1998).

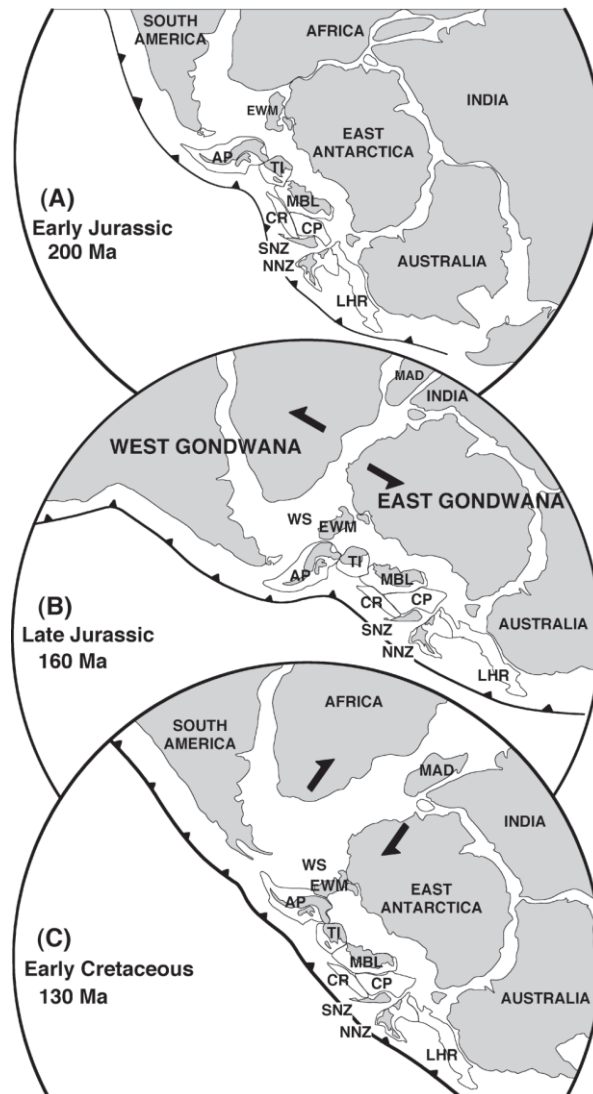


Figura 15. Reconstrucción de Antártica occidental desde la ruptura de Gondwana. (a) Jurásico temprano, 200 Ma. se genera la ruptura de Gondwana. (b) Jurásico tardío, 160 Ma. se genera la separación de Gondwana en dos partes: Gondwana Oriental y Gondwana Occidental.

(c) Cretácico temprano, 130 Ma. se reconoce el oriente del continente Antártico y su desplazamiento hacia el polo sur.

Recuperada de Fitzgerald, 2002.

Como se muestra en la *Figura 16. (b)* se conoce por (Lawver, 1992) que el inicio de la ruptura del supercontinente de Gondwana se genera una transtensión que da como origen la separación que tiene como origen el norte y se extiende hasta el sur de Gondwana en sus dos partes: Gondwana oriental que comprende Antártica, Australia, India, Nueva Zelanda y Gondwana occidental que contiene a América del sur y África, a su vez también la ruptura presenta indicios de relación con magmatismo de una pluma ubicada en África (Cox, 1988). En diferentes estudios se reconoce la ubicación de una megapluma en la región del mar de Weddell (Dalziel, 1999) sugirió que incluso la acción de la pluma es anterior a la ruptura y posibilita la formación del cinturón orogénico de Gondwanide. Los márgenes continentales jóvenes han generado en el jurásico tardío un tras-arco (Lawver, 1991), como se puede observar en la *Figura 16. (c)*, posterior a esto en el Cretácico inferior hay un cambio representativo en el movimiento que tiene Gondwana, pasando a un dominio de norte a sur entre oriente y occidente a tener un dominio predominantemente de oriente-occidente y se genera una mayor complejidad en las placas tectónicas pasando de un sistema de dos placas a un nuevo sistema de múltiples placas (Lawver, 1992), los cambios del movimiento y la tectónica tuvo una fuerte incidencia que provocó que las rocas de la península Antártica generaran una deformación, como es en el caso de rocas gnéisicas y magmáticas de la región (Storey, 1996), a su vez se tienen registros y vestigios que también se afectaron algunas cuencas sedimentarias que ya se habían formado en el área de la península, generándose una deformación de tipo piel fina (Thin-skinned) (Kellogg y Rowley, 1989) en el cretácico inferior también ocurre la separación entre el continente Antártico y la India (Lawver, 1991) lo cual deja libre al continente y con el rumbo preciso para situarse en el lugar del polo sur como en la actualidad con el acomodamiento de las microplacas tanto de Antártica oriental como occidental y es hasta fines del cretácico que termina su última

configuración y ubicación completada por la última ruptura ocasionada por el rift de Marie Byrd Land 84 Ma. (Lawver, 1991).

La península Antártica es un arco magmático que se formó aproximadamente en el paleozoico (Milne y Millar, 1989), pero según (Storey *et al.* 1994) puede ser de edad más antigua. Algunas dataciones realizadas para conocer la edad del arco magmático muestran diferentes episodios en el tiempo geológico: Jurásico tardío (236 – 199 Ma.), Jurásico medio (180 – 160 Ma.) y en el Cretácico tardío en los cuales se tienen registro de episodios magmáticos (Storey y Alabaster, 1991) posteriormente se generó una deformación en el arco por esfuerzos de tipo cizalla, y movimientos con alta complejidad con diferentes componentes tanto compresionales como extensionales y de strike-slip, se reconoce por medio de dataciones que algunos de estos movimientos tuvieron lugar en el mismo periodo de tiempo de algunos eventos magmáticos (Meneilly, 1987). Para comprender de una manera más adecuada la evolución se han seleccionado 4 eventos geológicos importantes y representativos que han moldeado y formado a la Península Antártica como se observa en la *Figura 16*.

4.3.1 Evento extensional del Triásico tardío al Jurásico temprano. Como se observa en la *Figura 16 (a)* se han encontrado evidencias de eventos de sedimentación, magmatismo y una deformación dúctil que se da como respuesta final al periodo extensional y la evidencia puntual es un Gneis granítico de composición Cuarzofeldespático que se ha datado dentro del arco magmático en las montañas Welch ver *Figura 16 (a)* (Wever, 1994), otras evidencias son las foliaciones sinmagmáticas que se evidencian en la orientaciones débiles y fuertes de los feldespatos potásicos hacia el oriente (Paterson, 1989), el cual sugiere también un cizallamiento durante el emplazamiento del magma. Algunos diques que también se han emplazado

singenéticamente y sincinemáticamente a lo largo de la corteza han sido caracterizados por Vaughan (1996). Se han encontrado Dioritas y Xenolitos anfibólicos que tienen una asimetría representativa y muy marcada que es subparalela a la fábrica de las granodioritas presentes en la zona de cizalla de Auriga Nunataks, esto indica un proceso de deformación dúctil y estos eventos están superpuestos con el pico metamórfico descrito por Vaughan (1996).

En cuanto a los procesos de sedimentación presentes en este periodo, se tiene registro de una capa de poco espesor del cretácico, clasificadas como turbiditas y que se encuentran ubicadas en la región del arco posterior en la península de Kenyon (Macdonald y Butterworth, 1990) como se muestra en la *Figura 16 (c)*, en el cretácico medio se generó un cambio abrupto en la sedimentación, teniendo un cambio de facies y localizando una discordancia descrita por Macdonald y Butterworth (1990).

4.3.2 Evento de Transpresión dextral del Jurásico tardío. Se reconoce que según Thomson (como se citó en Storey, 1996) hay un plegamiento con edad del cretácico tardío y ha tenido un impacto principalmente en la deformación de los depósitos sedimentarios más jóvenes, algunos indicadores del sentido del dominio dúctil presente en estas deformaciones son las áreas en donde se han encontrado milonitas desarrolladas y leucogranitos deformados (Wever, 1995), se ha encontrado que la deformación alcanza su máximo esplendor en cretácico temprano (Macdonald y Butterworth, 1990) con planos de falla y tendencias lineales NW y un movimiento en el mismo sentido de las manecillas del reloj de un plegamiento con planos axiales transeccionales (Jones y Tanner, 1995).

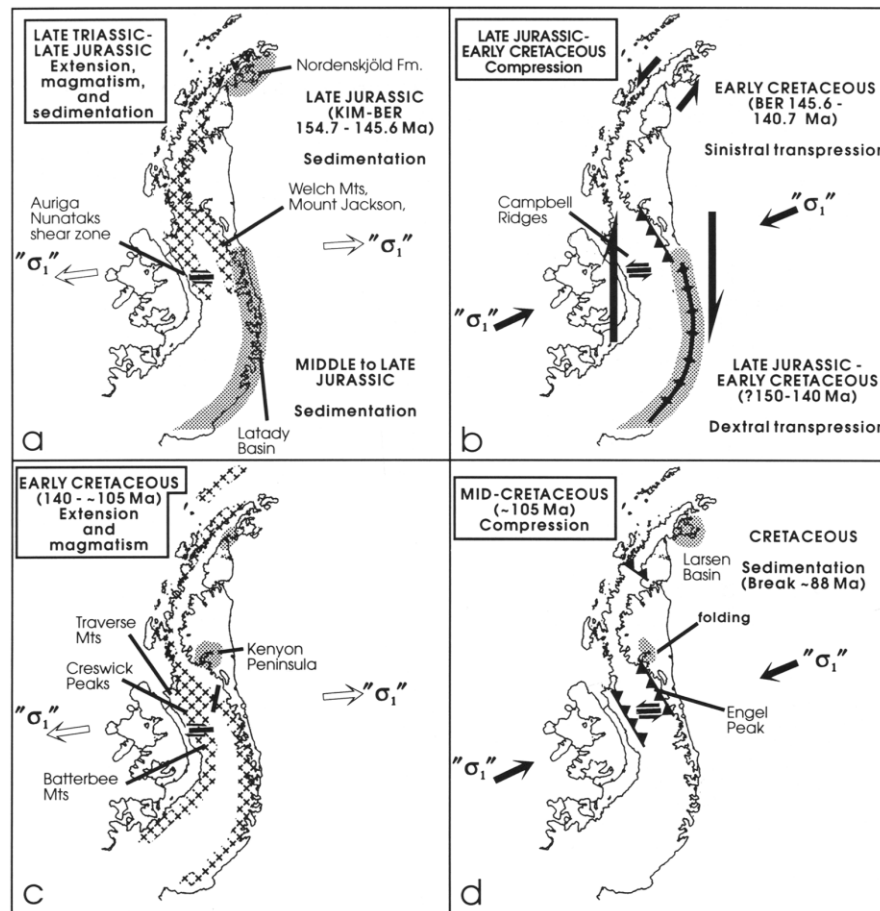


Figura 16. Diagramas secuenciales que ilustran los eventos geológicos con mayor importancia en la formación de la península Antártica para cuatro periodos de tiempo geológico: (a) Triásico tardío – Jurásico tardío, (b) Jurásico tardío – Cretácico temprano, (c) Cretácico temprano y (d) Cretácico medio. Muestra como son los esfuerzos “ σ ” para cada periodo.

Recuperada de Storey, 1996.

4.3.3 Extensión y magmatismo del Cretácico. Se genera un magmatismo, diferentes sedimentaciones y un crecimiento de la corteza a lo largo de la península Antártica, teniéndose registro de emplazamientos de rocas ígneas plutónicas en el área que se conoce como Palmer Land, concentrándose este evento en el sector Noroeste que datan de 141-80 Ma. (Vaughan y

Millar, 1996), en cambio para el sector Noreste la datación de las rocas es diferente (128-83 Ma.) según explica Pankhurst y Rowley (1991) dentro de Thompson (1991) estas diferencias tienen un gran significado, demostrando que el magmatismo tuvo un crecimiento lateral hacia estas áreas en el Cretácico. Del crecimiento rápido de la corteza se tienen evidencias en las rocas plutónicas, ya que son sinmagmáticas tanto con el crecimiento como con la deformación de cortical (Vaughan y Millar, 1996). Se encuentran gabros al final de la deformación, los cuales son evidencia en la actualidad del movimiento extensional. Para la sedimentación se tiene que su actividad fue alta mediante el periodo de crecimiento cortical, la evidencia más clara son las turbiditas marinas presentes en la península de Kenyon ver *Figura 17 (c)* (Macdonald y Butterworth, 1990). La sedimentación tuvo diferentes etapas en las que su actividad fue nula, la etapa del inicio comprende una sedimentación de conglomerados gruesos en abanicos que datan de 135 – 124 Ma aproximadamente, después se registra una posible interrupción en la sedimentación para el cretácico temprano, posteriormente se volvió a activar el proceso de sedimentación para finales del cretácico temprano con clastos gruesos debido a la entrada y la pendiente de los abanicos submarinos profundos (Ineson, 1989; Macdonald y Butterworth, 1990).

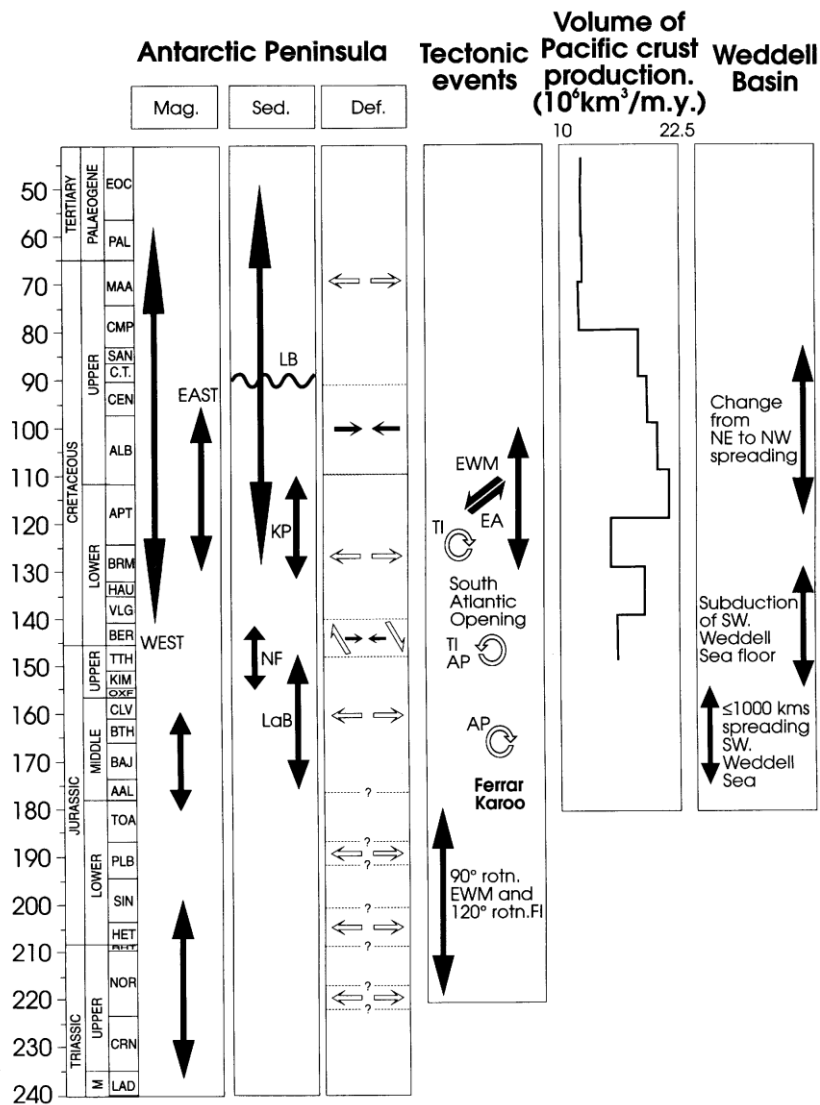


Figura 17. Ilustración de los eventos más representativos que afectaron la sedimentación que se representa como “Sed.”, el magmatismo que se representa como “mag.” y las deformaciones que se representa como “def.” en la Península Antártica desde el Triásico medio (240 Ma) hasta el Paleoceno (50 Ma). Recuperada de Storey, 1996.

4.3.4 Compresión del Cretácico tardío. Se tienen diferentes evidencias de los eventos compresionales que se reactivaron en el cretácico tardío como se observa en la *Figura 16 (d)*., como son la formación de pliegues, los diques doblados constatando el desplazamiento sinistral inverso, teniendo también movimientos de edades de 117 Ma que van en dirección oriente y son cortados por intrusiones plutónicas con edades de 96 Ma (Birkenmajer, 1994). Como se puede observar en la *Figura 17*. La deformación del cretácico tardío se representa como una compresión, teniendo dataciones entre (110 – 90 Ma) (Storey, 1996).

4.4 Geología Isla Marambio

La Isla ubicada en la Península Antártica inicialmente se denominó como “Seymour” en honor a un marino inglés que exploró con frecuencia el territorio a fines del siglo XIX pero a partir del año 1956 lleva el nombre de Isla Marambio que se utiliza actualmente para denominar esta región en homenaje al Vicecomodoro Gustavo Argentino Marambio al que se le atribuyen los primeros intentos de propiciar las condiciones necesarias para instalar una base científica Argentina en esta Isla (Fundación Marambio, 2018).

La Isla Marambio situada al sureste del extremo norte de la península Antártica, más concretamente en la península Trinidad, hace parte del grupo Insular James Ross, se encuentra al este de la isla James Ross y adyacente al mar de Weddell Silva, (2009).

Se ha podido determinar que a Isla Marambio Emergió del mar en épocas relativamente recientes, esto sustentado según los estudios realizados por geólogos desde las primeras expediciones Suecas al Polo Sur de 1901-1903 a inicios del siglo , siguiendo con trabajos casi 7 décadas más tarde como el de Andersson (1906) se comenzó a considerar la presencia de rocas

con edades del cretácico y del terciario en la isla , actualmente se tiene más detalle en estudios estratigráficos gracias a las investigaciones realizadas en colaboración con entidades estadounidenses y argentinas como lo son United States Geological Survey, The Ohio State University y el Instituto Antártico Argentino.

La Isla cuenta con una secuencia sedimentaria expuesta de aproximadamente 2 km de espesor siendo esta la más representativa de la cuenca James Ross, a lo largo de las numerosas expediciones y continuas investigaciones en este territorio se han podido subdividir o delimitar distintos tipos de unidades sedimentarias de las cuales se reconocen las Formaciones López de Bertodano, Cross Valley, Sobral, Weddellian y la Meseta la cual es la unidad que más interesa en el presente trabajo por motivo tal que los puntos de recolección de las muestras correspondientes a analizar se tomaron en sectores donde precisamente están relacionados a esta unidad. (Valle et al., 1992; Elliot and Trautman, 1982; Rinaldi et al., 1978).

La Formación la Meseta es una unidad sedimentaria de espesor máximo de 720 m delimitada por discordancias, con una elevación máxima topográfica de 198 metros sobre el nivel del mar, posee características como una superficie moderadamente plana con suelos en su mayoría congelados o permafrost barridos constantemente por fuertes vientos que evitan la acumulación excesiva de nieve en varios sectores. (Elliot y Trautman, 1982).

Marensi et al. (1998) explica tanto la estratigrafía, la geología estructural y las características de facies vista en términos de la aloformacion la Meseta como resultado de un origen mixto Tectónico-erosivo de las discordancias que cuentan con gran importancia regional. Dicha unidad se encuentra compuesta por un 90% de sedimentos sueltos y por compactos un 10%, Granulométricamente está unidad está formada en mayor medida por arenas finas, arenas muy finas y limos con una tendencia general grano y estrato-creciente. La composición mineralógica

de los constituyentes geológicos es por lo general cuarzo monocristalino, feldespato alcalino, plagioclasas en proporciones variables y fragmentos líticos principalmente volcánico.

4.4.1 Geomorfología de la isla de Marambio. La geomorfología para el continente antártico tiene dos componentes, el hielo y la litología, para el caso específico de la isla de Marambio tiene el rasgo característico de tener una cubierta de hielo escasa o nula (Nozal, 2007), pero también se encuentran suelos que están totalmente o parcialmente congelados de tipo permafrost (Fukuda, 1992), esto concuerda con su morfo dinamismo peri glaciar dejando que actúen los diferentes procesos formación de hielo y el deshielo del mismo de una manera intensa (Nozal, 2007), se presencia escorrentía principalmente en la época de verano debido al descongelamiento de la nieve, generando causes que fluyen por la diferencia de pendientes, por otro lado en la época de invierno las máximas capas de hielo presentes no dejan que se erosione la superficie, limitando estos procesos (Nozal, 2007).

Se cuanta con tres principales factores que afectan y erosionan la geomorfología: La actividad eólica, el flujo de agua y la actividad marina en las cosas, estos tres factores han moldeado la isla (Nozal, 2007).

4.5 parámetros medio-ambientales del continente antártico y de la isla Marambio

La Antártica es el continente cubierto casi en su totalidad por hielo donde solo el 0,35 % que equivale a 45.000 km² se considera como área libre de hielo o donde se encuentra superficie expuesta. Entre los territorios que se identifican en esta categoría se encuentran las montañas Transantárticas y de Pensacola, tierra de Mac- Robertson y la costa de la princesa Elizabeth,

Queen Maud y La Península Antártica y sus islas es una de las superficies de este continente más extensas desprovistas de hielo contemplando áreas de 10,000 km², o 20% del total de territorio Antártico libre de hielo. (Bockheim, 2015).

La Antártida está provista de gigantescas capas de hielo con elevaciones medias de más de 3.000 m y se podría llegar a pensar que este continente tiene alta humedad ya que cuenta con la mayor cantidad de reservas de agua dulce con casi un 70% de agua dulce total de la tierra, pero lo cierto es que este continente posee un clima árido o desértico con un promedio de 166 mm de precipitación por año. Esto se puede explicar con el relativo aislamiento con los demás océanos el planeta producto de la denominada corriente circumpolar que fluye de oeste a este alrededor del continente Antártico. (Silva, 2009; OMM, 2015).

4.5.1 Temperatura. El continente Antártico ha registrado las medidas de temperatura media anual más bajas del planeta que oscila entre -10 °C en la costa y -60 °C en las zonas más altas del interior, así como también los picos de temperatura más bajos reconocidos hasta el momento en el mundo, llegando a marcar el record de temperatura de -89,2 °C (-128,6 °F) registrado el 21 de julio de 1983 en la estación de Vostok.

En cuanto a la temperatura registrada por la base Argentina Marambio registra valores de temperaturas promedio anual de -8.8 °C en superficie y en los suelos se registra una temperatura promedio de -6,6 °C (Fukuda et al, 2016). En la época de verano austral que se da en los meses de diciembre 21 a marzo 21 las temperaturas diarias varían entre los 2 °C, y los -5 °C ver *Figura 18*. Con picos extremos de hasta 10 °C como máximo y hasta los -20 °C como mínimo, en contraste en época de invierno. En cuanto al invierno que va del 21 de junio hasta el 21 de septiembre las temperaturas pueden llegar a descender rigurosamente con máximas diarias de -

20 °C y mínimas de .35 °C y con picos extremos de -45 °C de mínima y -10 °C de máxima, estos contrastes de temperaturas se pueden ver apoyados por el hecho de que en el polo sur en el día durante el verano el sol no se opone y en invierno se mantiene una oscuridad constante durante todo el día lo que facilita el descenso excesivo de temperatura (OMM, 2015).

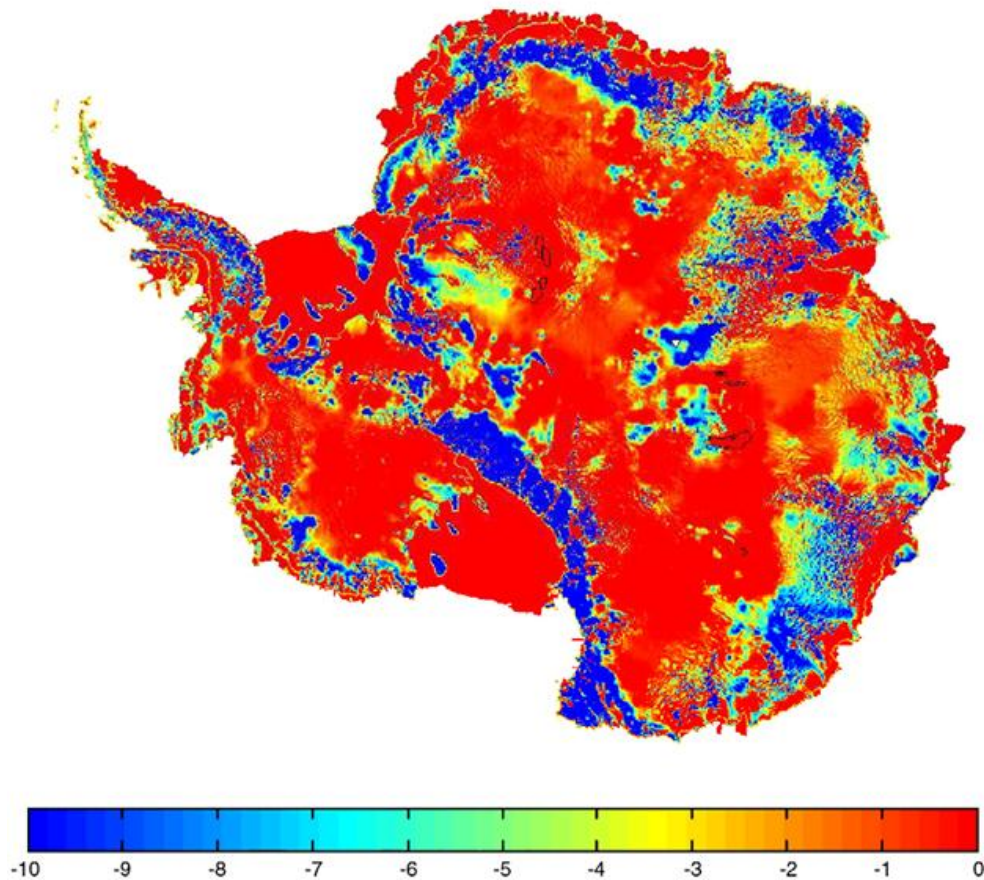


Figura 18. Campo de temperatura media de la Antártida.

Recuperada de Pattyn, 2010.

4.5.2 Humedad. La humedad relativa alrededor del continente blanco es muy baja, Durante el verano austral de 1960 se obtuvieron registros de 50% de humedad relativa durante la "noche"

y del 10 al 15 por ciento durante el 'día', humedad relativa en la estación del Polo Sur promedió 40 a 45 por ciento, y en McMurdo Sound se aproximó al 70 por ciento, todo lo anteriormente mencionado tiene un efecto muy importante en los procesos de meteorización y formación de suelo, este factor además marca una condición particular para catalogar la el territorio como desierto de frio extremo Rubin (1962).

En el caso particular de la isla Marambio ubicado en la Península Antártica se identifica por presentar escasas precipitaciones con humedades relativas de aproximadamente 30%, similar a los índices marcados en la península, análogo al resto del continente se cataloga como una zona semiárida subpolar (Silva, 2009).

4.5.3 Pluviosidad. La precipitación promedio en la Antártica es muy escasa llegando a medirse unos 166 milímetros promedio por año, llegando en algunas regiones con condiciones de aridez extrema a valores de hasta 50 mm de por año teniendo en cuenta que valores inferiores a 250 mm se considera desierto. Para el caso de la isla Marambio en la península Antártica la cantidad anual de precipitación total sumada el equivalente a agua y nieve fundida, es de 260 mm (Vaughan *et al*, 1999).

4.5.4 Factor eólico. En la superficie Antártica a pesar de las bajas temperaturas se pueden detectar pequeñas corrientes generalmente alcalinas en reacción durante los veranos australes. La velocidad del viento es muy importante debido a su efecto en los suelos. Los vientos catabáticos que son traídos con origen de la meseta polar por desprendimiento superficial hacia los valles secos y otras áreas libres de hielo provocan cierta generación de viento y la deriva de la arena, pero aun así no se ha logrado establecer la cantidad de material mineral que es

transportado por la acción del viento”. El paleo clima de la Antártida es de gran interés para los investigadores con motivo de en reconstruir posibles eventos pedológicos del pasado. (Tedrow y Ugolini, 1956).

4.5.5 Factor biótico. La presencia de materia orgánica a lo largo de la Antártida es de cierta manera muy escasa, en las áreas desprovistas de hielo como en el caso de la isla Marambio se encuentran grandes extensiones sin ningún signo de vida terrestre (Llano, 1962), en sectores del valle en estos ambientes es muy inusual encontrar líquenes ni musgos así como se dio en la obtención de las muestras del presente trabajo.

4.5.6 Niveles de PH. Se puede reconocer una tendencia a lo largo de la Antártida y es el continuo grado de alcalinidad en los suelos con altos valores de ph como se demuestra en los trabajos de Llano, (1962), también sugiere alta presencia de materiales solubles y capas salinas en la superficie, por estándares científicos, los suelos antárticos se pueden considerar como materiales bien suministrado con nutrientes potencialmente disponibles, particularmente Ca, Mg, Na y K.

4.6 Colombia en la Antártica

Colombia hasta la fecha ha registrado un total de cuatro expediciones colombianas a la antártica.

Tabla 3. *Síntesis de la totalidad de expediciones de Colombia al continente Antártico hasta el año 2018.*

EXPEDICIONES DE COLOMBIA A LA ANTÁRTICA		
NÚMERO	NOMBRE	FECHA
I	Expedición Caldas	Verano Austral 2014 - 2015
II	Almirante Lemaitre	Verano Austral 2015 - 2016
III	Almirante Padilla	Verano Austral 2016 - 2017
IV	Almirante Tono	Verano Austral 2017 - 2018

Colombia a lo largo de los últimos años se ha sumado al interés de la comunidad internacional en el ámbito de la investigación y preservación del continente Antártico y por ende se ha fijado un objetivo a largo plazo el cual consiste en convertirse en un miembro con voz y con voto, en el Sistema del Tratado Antártico (SAT) dentro del cual se acuerda usar el territorio únicamente con fines científicos evitando rigurosamente cualquier finalidad militar o de extracción de recursos. De este tratado hacen parte 53 países como se muestra en la *Figura 19*. 29 de ellos tienen voz y voto, entre los que destacan Estados Unidos, Alemania, Australia, China, Bélgica, Francia, India, Rusia, Sudáfrica y los latinoamericanos Brasil, Chile, Argentina, Ecuador y Perú; y 24 de ellos únicamente poseen voz y se consideran miembros consultivos, entre los que está actualmente Colombia. Para lograr ser un miembro consultivo, Colombia debe hacer investigación científica en el continente virgen. Lo que pretende el Gobierno Nacional es poder instalar su propia base científica en la Antártica en el 2025 y poder votar en la reforma al Tratado Antártico, que se llevará a cabo en el año 2048 (PAC, 2015).



Figura 19. Banderas de los países adheridos al tratado Antártico siendo las dos rondas del centro los países considerados plenipotenciarios y las banderas de los países del círculo exterior son aquellos que cuentan con voz, es decir son únicamente miembros consultivos por el momento. Recuperada de <http://buendianoticia.com/nota/8868/aniversario-de-la-firma-del-tratado-antartico>.

La Antártica ha sido explorada hace más de un siglo pero que aún posee grandes y numerosas incógnitas que despiertan la curiosidad de científicos y comunidades de todo el mundo, como ya se ha demostrado cuenta con condiciones ambientales particulares en el mundo no solo por las extremas temperaturas de hasta valores menores de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ que pueden ser registradas sino

también por las debilidades del campo magnético terrestre y de la capa de ozono, las cuales permiten la incidencia de mayor radiación tanto cósmica como solar entre otras, estas debilidades afectan este territorio amenazando el equilibrio y balance térmico y en consecuencia también afecta al resto del mundo, de ahí radica la importancia de estudiar esta área que por más alejado que este de muchas naciones en muchos casos se mantiene una estrecha conexión.

Colombia inicia su participación en los asuntos del continente blanco hace aproximadamente 30 años con su adherencia en el tratado Antártico en el año 1989 el cual permite desarrollar proyectos de investigación relacionados con los intereses y objetivos estratégicos de cada nación vinculada, A partir de esta fecha investigadores Colombianos apasionados por el misterio que trae consigo esta parte del mundo han emprendido viajes como invitados por expediciones de distintas naciones con amplia trayectoria en asuntos Antárticos como lo son Chile y Argentina (PAC, 2015).

. Fue solo hasta 2012 donde Colombia informa sobre su intención de efectuar su primera expedición científica al continente blanco, recibiendo el respaldo de los países consultivos mediante un documento presentado durante la XXXVI Reunión Consultiva del Tratado Antártico, celebrada en Bruselas, esto sirvió como punto de partida para cambiar el status del país, de estado de adherente a consultivo del Tratado, a partir de esto Colombia por medio de la CIOH (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico Colombiano) en compañía con la Dirección General Marítima se encargan de reunir y coordinar durante dos años los elementos operativos necesarios y mediante la CCO (Comisión Colombiana del Océano) se proyectó la agenda científica Antártica así como el programa Antártico Colombiano específicamente en las áreas temáticas de investigación relacionadas con seguridad Marítima, relaciones de Suramérica y la Antártica, medio ambiente, entre otras (PAC, 2015).

La Primera expedición científica de Colombia en la Antártica denominada también como “Expedición Caldas” se puso en marcha el 16 de diciembre del 2014 zarpando desde Cartagena en la Base Naval ARC “BOLÍVAR” el buque adaptado de la Armada Nacional de Colombia, ARC “20 DE JULIO”, durante esta expedición en los puertos de Guayaquil (Ecuador), Valparaíso (Chile), Punta Arenas (Chile), Callao (Perú) se pudieron exponer a los centros de investigación Antárticos de estos países los objetivos inmersos en la Agenda científica Antártica de Colombia obteniendo así apoyo y lazos de cooperación científica internacional (PAC, 2015).

La expedición ingresó a aguas antárticas (Paralelo 60° S) durante el verano Austral el 13 de enero de 2015 a las 10:00 am hora local colombiana y a partir de ese momento se llevaron a cabo los estudios planeados registrando gran número de datos de diversas áreas del conocimiento involucradas en la expedición (oceanografía: química, física, biológica y geológica, así como biología marina) y adquiriendo gran número de muestras entre ellas muestras de sedimentos del fondo marino pero no fijando en gran medida la investigación a la geología superficial del territorio (PAC, 2015).

El buque ARC “20 DE JULIO” atracó en la ciudad de Cartagena dando así por culminada la expedición antártica el 24 de marzo del 2015, finalmente con esto se pudieron generar nuevos interrogantes y por ende se abrieron las puertas para una nueva expedición que se dio durante el siguiente verano austral 2015-2016 en la segunda expedición científica de Colombia en la Antártica denominada como “Almirante Lemaitre”. Esta expedición no contó con la plataforma operacional propia con el buque “Arc 20 de Julio”, pero aun así algunos trabajos se llevaron a cabo gracias al apoyo de desplazamiento vía aérea coordinado con la Fuerza Aérea Colombiana en compañía con la (CCO) y sumado con el apoyo de Argentina, Chile, Ecuador e Italia, los cuales ofrecieron a los 24 investigadores colombianos cupos en sus buques y bases en la Antártida,

acogiéndolos para desarrollar 15 proyectos de investigación, enmarcados dentro de la Agenda Científica Antártica de Colombia (PAC, 2016). En esta expedición uno de sus proyectos se aventuró en tomar con mayor consideración e importancia el ámbito geológico, dicho trabajo se tituló “Estudio radiométrico de las características atmosféricas de la zona antártica para el desarrollo de la aviación en Colombia”. Logrando así con esta expedición adquirir muestras de material geológico con fines de caracterización relacionada con la seguridad operacional.

Colombia ha mantenido constante el esfuerzo y apoyo en la investigación Antártica teniendo focalizado los objetivos antes expuestos y por tanto se han logrado expandir los proyectos relacionados con las diferentes áreas de la ciencia llegando a culminar la tercera y la cuarta expedición, catalogadas como “Almirante Padilla” (Verano Austral 2016-2017) y “Almirante Tono” (Verano Austral 2017-2018) respectivamente (PAC, 2017).

4.7 Trabajos Anteriores en contexto similar

En el continente Antártico se ha logrado un gran avance en cuanto al desarrollo del conocimiento por medio de las numerosas expediciones que deciden llevar a cabo sus investigaciones en este territorio, pero incluso con los grandes esfuerzos que se han mantenido en realidad el territorio Antártico se sigue considerando aun como un área ignota.

En el área de la Isla Marambio más puntualmente en los sectores relacionados con la formación la Meseta se tienen escasos estudios documentados sobre análisis geológico superficial en suelos, pero aun así se pueden tomar como punto partida estudios donde los puntos de muestreo se encuentran muy cercanos y relacionados con los del presente trabajo como los realizados en Tatur et al (1993).

En dichos trabajos se realiza un muestreo superficial tanto de material rocoso como de suelos obtenidos en el límite entre las zonas marítimas y continentales caracterizados como suelos áridos con presencia de acumulaciones de capas minerales de sales poco solubles tales como carbonatos, cloruros e hidróxido en la capa superficial de lecho rocoso, en donde se identificaron minerales de estas muestras por medio de Difracción de Rayos X (usando un instrumento Dron-1) y pudieron ser observados a detalle mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) (adquiriendo imágenes x60 hasta x3700) usando un instrumento Jeol Ash (Tatur et al, 1993). Con objetivo de lograr una caracterización algo más completa del presente trabajo, se complementa el procedimiento analítico anteriormente mencionado con los procedimientos de referencia llevados a cabo igualmente en la Antártica en la bahía de terra nova adyacente al mar de Ross donde se contempla entre muchos otros análisis representativos la utilización de técnicas analíticas de Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) útil para detectar cualquier tipo de anomalía y para la cuantificación optima de los resultados, por tanto combinar esta con las demás técnicas analíticas anteriormente mencionadas genera mayor acierto a los fines del proyecto.

En cuanto a la utilización de espectrometría gamma superficial con el fin de medir el estado radiométrico en la región antártica dentro de contextos similares en áreas aledañas a la Isla Marambio se encuentran estudios radiométricos realizados con finalidad de medición de radiactividad ambiental natural en el entorno de la estación científica Machu Picchu ubicada en la Isla Rey Jorge con condiciones ambientales similares a la Isla Marambio, para este estudio se tomaron múltiples muestras, entre las cuales se destacan suelos y sedimentos marinos en los que se determinaron los niveles energéticos de radionúclidos tanto de ^{40}K , U, Th como de otros menos comunes como $^{226,228}\text{Ra}$, ^7Be y ^{137}Cs tomando entre sus conclusiones la consideración de

en posteriores estudios de la estimación del comportamiento atmosférico hacer énfasis sobre la determinación de radionúclidos naturales producto de la actividad cósmica y de origen terrestre tales como los descendientes de elementos como el Th y U (González et al, 2002). El presente trabajo hace mención sobre la considerable radiación que puede estar siendo generada por actividad cósmica lo que se ajusta muy bien a las consideraciones tenidas en cuenta en el estudio de los suelos de la Isla Marambio.

En el Contexto referido anteriormente, el presente trabajo tiene como finalidad integrar diferentes análisis con objetivos puntuales distintos que se den solución a varias incógnitas pero enmarcados en una temática complementaria en la que cada una de las observaciones pueden ser relacionadas y comparadas entre si dando cada una un aporte importante obteniendo así mayor certeza y precisión en los resultados.

5. Resultados

5.1 Resultados Gamma Espectrometría

5.1.1 Análisis muestra ANT-1. Para la muestra ANT-1 se registraron un total de 4578.4 cuentas por minuto (cpm) el cual se mantiene dentro del rango de valores normales para la radiactividad natural en base a (CSN, 2010), por tanto, estos valores, aunque están ligeramente elevados dentro del rango normal no representan un riesgo a considerar.

El análisis registro una concentración de elementos de K de 2,00 (%), de U 4,00 (ppm) y de Th 13,30 (ppm), partiendo de los estándares de referencia normales para la proporción de estos

elementos que consiste en tener 4% para K, 12 ppm de U, 22 ppm de Th (Mantilla, 2014) se puede determinar que los valores obtenidos en el análisis permanecen por debajo del estándar en los tres elementos determinados.

La radiactividad producida por los radionúclidos de los minerales no suele ser motivo de preocupación, pero en algunos casos los niveles de exposición a estos radionúclidos pueden llegar a ser significativamente mayores que en algunos casos requieren ser reguladas y controladas, en estos casos en los que los materiales dan lugar a este tipo de exposiciones se les denomina como NORM (Natural Origin Radiative Material) (SGC, 2016). Según con lo establecido en la Resolución 18-1434 del Ministerio de Minas y Energía se tienen unos límites de dosis de exposición radiactiva que serían, una dosis efectiva de 1 mSv en un año, es decir 0.1140771161 Micro sievert por hora [$\mu\text{Sv/h}$] y en circunstancias especiales, una dosis efectiva de hasta 5 mSv en un solo año (equivalente a 0.570 385 580 7 Micro sievert por hora [$\mu\text{Sv/h}$]), a condición de que la dosis promedio en cinco años consecutivos no exceda de 1 mSv por año, se tiene que para la muestra ANT-1 se registraron dosis de radiación de 0.1017 $\mu\text{Sv/h}$, por tanto se determina que la dosis generada se encuentra dentro de los estándares permitidos operacionales.

Se determinó contenido de K puede estar relacionado con la illita (tiene K) que se pudo determinar su presencia mediante el análisis MEB. Alta relación de Th/U, es decir la concentración de Th sobrepasa la de U, lo que indica que las muestras corresponden a un ambiente somero aireado. (Mantilla, 2014).

5.1.2 Análisis muestra ANT-2. Para la muestra ANT – 2 se registraron un total de 4595.0 cuentas por minuto (cpm) el cual se mantiene dentro del rango de valores normales para la

radiactividad natural en base a (CSN, 2010), por tanto, estos valores, aunque están ligeramente elevados dentro del rango normal no se consideran valores con motivos de preocupación.

El análisis registro una concentración de elementos de K de 2,00 (%), de U 3,80 (ppm) y de Th 12,50 (ppm), partiendo de los estándares de referencia normales para la proporción de estos elementos que consiste en tener 4% para K, 12 ppm de U, 22 ppm de Th (Mantilla, 2006) se tiene que los valores obtenidos en el análisis permanecen por debajo del estándar en los tres elementos determinados.

Se tiene que para la muestra ANT-2 se registraron dosis de radiación de 0.0969 $\mu\text{Sv/h}$, por tanto se determina que la dosis generada se encuentra dentro de los estandares permitidos operacionales según la Resolución 18-1434 del Ministerio de Minas y Energía .

Se determino en esta muestra contenido de K puede estar relacionado con la illita (tiene K) que se pudo determinar su presencia mediante el analisis MEB. Alta relacion de Th/U, es decir la concentracion de Th sobrepasa la de U, lo que indica que las muestras corresponden a un ambiente somero aireado,. (Mantilla, 2014).

Tabla 4. *Relacion de datos obtenidos de concentracion de elementos K, U, Th con los estandares normales geologicos.*

Elementos	Muestra ANT-1	Muestra ANT-2	Estándar (Mantilla, 2014)
K[ppm]	2.00	2.00	4.00
U[ppm]	4.00	3.80	12.00
Th[ppm]	13.30	12.50	22.00

Es importante mencionar que las concentraciones de elementos radiactivos para las dos muestras se encuentran dentro de los estándares normales y son muy mínimas como para

representar riesgo para la salud operacional y tampoco representa unos valores de interés económico debido a que concentraciones mínimas de estos elementos para considerarse rentables para extracción es a partir de los 100 ppm (Scianna, 2005).

5.2 Resultados Microscopía de Barrido Electrónico MEB

La síntesis de los resultados obtenidos de la correlación de los datos obtenidos por medio de la técnica de laboratorio de microscopía electrónica de barrido (MEB) y la bibliografía consultada para la presente investigación se pueden observar para la muestra ANT-1 en la *Tabla 4*. Y para la muestra ANT-2 en la *Tabla 5*.

Tabla 5. *Minerales encontrados en la muestra ANT-1 y correlacionada con los espectros de Severin (2005).*

ANT-1		
Espectro MEB-EDS	Mineral	Referencia
Apéndice A -Figura 2	Montmorillonita	Severin, 2005
Apéndice A -Figura 3	Clorita	Severin, 2005
Apéndice A -Figura 4	Feldespatos Plagioclasa y Pirita	Severin, 2005
Apéndice A -Figura 5	Anortita	Severin, 2005
Apéndice A -Figura 6	Clorita	Severin, 2005
Apéndice A -Figura 7	Pirita	Severin, 2005
Apéndice A -Figura 8	Ilmenita	Severin, 2005
Apéndice A -Figura 9	Zircón	Severin, 2005
Apéndice A -Figura 10	Cuarzo	Severin, 2005
Apéndice A -Figura 11	Feldespatos potásico	Severin, 2005

Mediante el análisis MEB se identificaron minerales resistentes a la meteorización, desgaste o alteración, se encuentra el cuarzo (ver Apéndice A, figura 10), el zircón el cual es uno de los minerales más abundantes en la corteza terrestre, en este análisis se presenta en una forma bien definida con bordes suaves (ver Apéndice A, figura 9).

Se determinó la presencia de minerales un poco menos estables con cierta tendencia a la alteración como el Feldespato Plagioclasa, Anortita y Feldespato potásico (ver Apéndice A, figura 4, 5, 11) y se determinó la presencia de minerales aluminosilicatos como la clorita presentándose posiblemente como producto de alteración que se da comúnmente a través de minerales como la hornblenda y relacionados por lo general con un ambiente de formación ígneo (ver Apéndice A, figura 3, 6). También hay presencia de la Montmorillonita que es un mineral del grupo de los silicatos y del subgrupo de las arcillas provienen de ambientes hidrotermales y de alteración de feldespatos, vidrios volcánicos y tobas. Se identificó el mineral Ilmenita (ver Apéndice A, figura 8) es un mineral accesorio de rocas ígneas, de un ambiente ígneo y comúnmente relacionada con filones pegmatíticos, por otro lado tenemos también presencia de Pirita (ver Apéndice A, figura 7) que es un mineral del grupo de los Sulfuros comúnmente producto de ambientes hidrotermales o de acumulación en los diferentes depósitos sedimentarios.

Tabla 6. *Minerales encontrados en la muestra ANT-1 y correlacionada con los espectros de Severin (2005) y Welton (1984).*

ANT-2		
Espectro MEB-EDS	Mineral	Referencia
Apéndice B - Figura 13	Muscovita	Severin, 2005
Apéndice B - Figura 14	Vermiculita	Severin, 2005
Apéndice B - Figura 15	Ilmenita	Severin, 2005
Apéndice B - Figura 16	Montmorillonita	Severin, 2005
Apéndice B - Figura 17	Smectita con Zircon	Welton, 1984
Apéndice B - Figura 18	Ilmenita	Severin, 2005
Apéndice B - Figura 19	Pirita	Severin, 2005
Apéndice B - Figura 20	Monacita	Severin, 2005
Apéndice B - Figura 21	Monacita	Severin, 2005
Apéndice B - Figura 22	Monacita	Severin, 2005

Con las imágenes suministradas por el MEB se logra identificar la presencia de minerales que se clasifican como monacitas asociados a elementos de tierras raras y con presencia de U, Th, K, en los puntos analizados con esta fase mineral, es importante recalcar la importancia de la presencia de estos elementos para la finalidad del presente trabajo, las monacitas se encuentran principalmente como accesorio en rocas ígneas ácidas y normalmente en depósitos de placeres (ver Apéndice B, figura 20, 21, 21).

La muestra cuenta con fases minerales identificadas como micas que en este caso corresponderían a minerales como moscovita (ver Apéndice B, figura 13) que generalmente están presentes en rocas ígneas ácidas y metamórficas, vermiculita (ver Apéndice B, figura 14) que es un silicato que principalmente se origina por la alteración de la biotita, su principal característica es que a temperaturas determinadas se deshidrata y aumenta su volumen, un valor

considerable de arcillas más específicamente con minerales como la Montmorillonita (ver Apéndice B, figura 16).

Se identificó presencia de un considerable número de fases minerales de ilmenita (ver figura 8, Apéndice A y figuras 15, 18, Apéndice B) su presencia asume un aporte ígneo o metamórfico a la muestra debido a que este mineral se encuentra en rocas básicas ígneas como (gabro, diabasa, piroxenita, etc.). Se determinó la presencia además de pirita (ver Apéndice B, figura 19) que es un mineral del grupo de los Sulfuros comúnmente producto de ambientes hidrotermales o de acumulación en forma de framboides en los diferentes depósitos sedimentarios.

Tomando en cuenta los espectros energéticos obtenidos en cada punto se puede inferir que en el momento de tomar el dato se presentan valores energéticos de configuraciones correspondientes a dos fases minerales distintas, es decir en algunos puntos donde incide el haz de electrones incide en espacios de intercepción de dos o más minerales o donde hay presencia de varias fases minerales tal como ocurre en los casos del apéndice A, Figura 4 y apéndice B, con las figuras 17, 20, 21, 22.

5.3 Resultados Difracción de Rayos X

Se realizó un análisis de Difracción de Rayos X (DRX) con el fin de reconocer las fases minerales de manera más detallada y corroborar la información obtenida por el Microscopio de Barrido Electrónico (MEB).

5.3.1 Análisis DRX para ANT-1. Las fases minerales encontradas dentro de la muestra ANT-1 se encuentran de manera detallada en el Apéndice C, tabla 21, se identificaron un total

de 9 minerales cristalinos que representan el 91,3% del total de la muestra y un 8,7% que representan los minerales amorfos y otros (Ver Apéndice C, tabla 21). Entre los minerales cristalinos se encuentra el Cuarzo (SiO_2) que representa el 62,6% de la muestra, este mineral pertenece al grupo de los silicatos y es el segundo mineral más abundante de la corteza terrestre, también pertenece al grupo de los minerales con mayor resistencia a la meteorización, la Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) que corresponde al 9,2 % el cual es un silicato dentro del grupo de los feldespatos plagioclasas en este caso lleva sodio y el calcio no se encontró en su estructura, este mineral es un constituyente muy típico de las rocas ígneas de tipo granito o sienita, la Microclina $\text{K}_{0,96}\text{Na}_{0,04}\text{AlSi}_3\text{O}_8$ representa el 7,5% de la muestra, este mineral es un silicato catalogado dentro de las plagioclasas en este caso se detectó que posee impurezas de Na en su estructura como es frecuente en este tipo de mineral, la moscovita $\text{K}(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{Al Si}_3 \text{O}_{10}(\text{OH})_2$, con una representación del 7,4% del total de la muestra, este mineral es un silicato que pertenece al grupo de las micas aluminicas, esta variedad detectada cuenta con Fe adicional a su estructura mineral, este mineral es componente primario en muchas rocas ígneas de tipo ácido, como en granitos y pegmatitas, la Magnesiohornblenda $(\text{Na}_{0,4} \text{K}_{0,1}) (\text{Ca}_{1,8} \text{Fe}_{0,2}) (\text{Mg}_{3,1} \text{Fe}_{1,5} \text{Al}_{1,4}) (\text{Si}_7 \text{Al}_1 \text{O}_{22}) (\text{OH})_2$, con un 2,5% del total de la muestra, es un silicato que se refiere una clase de Anfíbol en la que la sustitución gradual de Fe a Mg dio origen a esta variedad de extremo composicional, el origen de estos minerales está asociado a la formación composicional de muchas rocas, tales como los granitos, los gneises etc., el mineral determinado de Clinocloro con fórmula química:

$(\text{Mg}_{11,148} \text{Fe}_{0,852}) ((\text{Si}_{4,99} \text{Al}_{3,01}) \text{O}_{20} (\text{OH})_{16})$ con un 2,1% es un silicato que es común en rocas metamórficas como producto de alteración hidrotermal de minerales silicatos de hierro y magnesio, como son los anfíboles, piroxenos y biotita que aparecen en rocas ígneas, sobre todo

de rocas especialmente ultra básicas, se determinó microclina con variaciones composicionales con respecto a la anterior $KAlSi_3O_8$ en proporciones no cuantificables por su contenido en la que se encuentra la estructura teórica sin impurezas, se comprobó la presencia de calcita $CaCO_3$ en cantidades no cuantificables debido a su baja proporción en la muestra, este es un carbonato común en depósitos sedimentarios, por último se determinó la presencia de Illita $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ de igual manera en bajas proporciones por tanto no cuantificable, es un silicato del grupo de las micas y catalogada como una arcilla no expansiva.

5.3.2 Análisis DRX para ANT-2. Las fases minerales encontradas dentro de la muestra ANT-2 se encuentran de manera detallada en el Apéndice D, tabla 22, se identificaron un total de 9 minerales cristalinos que representan el 93,8% del total de la muestra y un 6,2% que representan los minerales amorfos y otros (Ver Apéndice D, tabla 22). Entre los minerales cristalinos se encuentra el Cuarzo (SiO_2) que representa el 57,7 % lo que sería la mayor cantidad de la muestra, este mineral es uno de los silicatos más abundantes y resistentes de la corteza terrestre, también pertenece al grupo de los minerales con mayor resistencia a la meteorización, la Albita ($NaAlSi_3O_8$) que corresponde al 15,8 % el cual es un silicato dentro del grupo de los feldespatos plagioclasas en este caso lleva sodio, este mineral es un constituyente muy típico de granitos o sienitas, la Microclina $K_{0.96}Na_{0.04}AlSi_3O_8$ representa el 12% de la muestra, este mineral es un silicato catalogado dentro de las plagioclasas en este caso se detectó que posee impurezas de Na en su estructura como es frecuente en este tipo de mineral, la moscovita $K(Al, Fe)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$, con una representación del 5,1% del total de la muestra, este mineral es un silicato que pertenece al grupo de las micas aluminicas, esta variedad detectada cuenta con Fe

adicional a su estructura mineral, este mineral es componente primario en muchas rocas ígneas de tipo ácido, como en granitos y pegmatitas, el mineral determinado de Clinocloro ($\text{Mg}_{11.148} \text{Fe}_{0.852}$) ($(\text{Si}_{4.99} \text{Al}_{3.01}) \text{O}_{20} (\text{O H})_{16}$) con un 2,6% es un silicato que es común en rocas metamórficas como producto de alteración hidrotermal de minerales silicatos de hierro y magnesio, como son los anfíboles, piroxenos y biotita que aparecen en rocas ígneas, sobre todo de rocas especialmente ultra básicas, la Magnesiohornblenda ($\text{Na}_{0.4} \text{K}_{0.1}$) ($\text{Ca}_{1.8} \text{Fe}_{0.2}$) ($\text{Mg}_{3.1} \text{Fe}_{1.5} \text{Al}_{1.4}$) ($\text{Si}_7 \text{Al}_1 \text{O}_{22}$) (O H)₂, con un 0,6% del total de la muestra, es un silicato que se refiere una clase de Anfíbol en la que la sustitución gradual de Fe a Mg dio origen a esta variedad de extremo composicional, el origen de estos minerales está asociado a la formación composicional de muchas rocas, tales como los granitos, los gneises etc., se determinó microclina con variaciones composicionales con respecto a la anterior $\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$ en proporciones no cuantificables por su contenido en la que se encuentra la estructura teórica sin impurezas, se comprobó la presencia de calcita Ca CO_3 en cantidades no cuantificables debido a su baja proporción en la muestra, este es un carbonato común en depósitos sedimentarios, la vermiculita $\text{Mg}_3 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{O H})_2$ el cual es un silicato en este caso compuesto en gran medida a base de Mg, este mineral es característico por presentar fuertes características expansivas en base a la elevación de la temperatura, en este caso presenta una proporción muy reducida, por tanto no cuantificable, por último la Hematita $\text{Fe}_2 \text{O}_3$ con proporciones en la muestra muy mínimas y por tanto no cuantificables en el análisis, este mineral es un óxido asociado a origen hidrotermal y de reemplazamiento aunque también se forma en rocas ígneas como un mineral accesorio.

5.4 Análisis ICP-MS

El análisis de la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-MS cuenta con un total de 48 elementos para las dos muestras, los cuales se comparan y correlacionan con dos Materiales de referencia estándar: SRM 2709a que corresponde a San Joaquin Soil y el SRM 2710a que corresponde a Montana 1, como se muestra en la *Tabla 7*.

5.4.1 Metales Alcalinos. Para el grupo de los Metales Alcalinos se encontraron los elementos:

- Litio (Li) con concentraciones de 17 ppm y 19.4 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente se encuentra que son valores normales y no representan una anomalía importante o representativa.
- Sodio (Na) con concentraciones de 0.087 % y 1.160 % para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente se encuentra que son valores normales correlacionándolos con los SRM, por lo tanto, no representan una anomalía importante o representativa
- Potasio (K) se encontraron concentraciones de 2.34 % y 2.22 % para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, al compararlos con los valores de los SRM se encuentra que no representan una anomalía importante o representativa, sin embargo, se tendrán en cuenta por sus propiedades radiactivas.
- Rubidio (Rb) con concentraciones de 97.9 ppm y 83.8 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, se encuentra dentro de los estándares normales, al correlacionarlos con los SRM no hay una anomalía representativa.

- Cesio (Cs) presenta concentraciones de 2.74 ppm y 1.96 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, al correlacionarlos con los valores de los SRM se encuentra que tienen unos valores muy bajos lo que nos indica una carencia de este elemento.

5.4.2 Metales Alcalinotérreos. Para el grupo de los Alcalinotérreos se encontraron los elementos:

- Bario (Ba) presentan concentraciones de 357 ppm y 550 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, al realizar la correlación con los SRM se encuentra que no representan una anomalía y que están por debajo de los niveles estándar.
- Berilio (Be) con concentraciones de 2.93 ppm y 1.58 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, están en concentraciones normales, por tanto no representan una anomalía importante o representativa.
- Calcio (Ca) con concentraciones de 1.27 % y 1.14 % para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, no representan una anomalía debido a que los niveles están por debajo de los SRM.
- Magnesio (Mg) con concentraciones de 0.91 % y 0.45 % para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente se relaciona que no son una anomalía debido a que los valores están por debajo de los SRM.

5.4.3 Metales de Transición. Para el grupo de los Metales de Transición se encontraron los elementos:

- Escandio (Sc) que presenta concentraciones de 18.05 ppm y 8.73 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, presentan concentraciones altas respecto a los SRM, por ende, es una pequeña anomalía
- Itrio (Y) que presenta concentraciones de 32.1 ppm y 22.1 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2, correlacionándolas con los estudios realizados por Kabata-Pendias (2001), se tiene un promedio de 24 ppm para suelos de diferentes lugares del mundo, por esto, no representa una anomalía importante o representativa
- Titanio (Ti) presenta concentraciones de 0.597 % y 0.421 % para las muestras ANT-1 y ANT-2 presentan una pequeña anomalía al estar un poco por encima de los SRM.
- Circonio (Zr) se presentan concentraciones de 116.0 ppm y 111.5 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2, y la correlación con los SRM muestra que están por debajo de los estándares, es decir, no representa una anomalía importante o representativa.
- Hafnio (Hf) con concentraciones de 3.76 ppm y 3.42 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente se encuentra que están por debajo de las concentraciones de los SRM, por tanto, no representan una anomalía representativa o importante.
- Vanadio (V) se encontraron concentraciones de 165.0 ppm y 62.7 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, correlacionándolos con los SRM encontramos que para ANT-1 podría representar una anomalía pequeña, pero para ANT-2 la concentración está por debajo de los estándares.
- Niobio (Nb) con concentraciones de 15.65 ppm y 10.95 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, correlacionándolas con los valores reconocidos por Kabata-Pendias (2001), se reconoce que para la muestra ANT-1 están un poco

elevados mientras que para la muestra ANT-2 están por debajo de los valores estándares encontrados en diferentes suelos muestreados alrededor del mundo.

- Tantalio (Ta) se encuentran concentraciones de 1.08 ppm y 0.71 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, al compararlos con los SRM se encuentra que están en los niveles estándares y no representan una anomalía importante o representativa.
- Cromo (Cr) con concentraciones de 77.6 ppm y 37.2 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, al realizar la correlación con los SRM se encuentra que están por debajo de las concentraciones estándares, es decir, que no representan una anomalía importante o representativa.
- Molibdeno (Mo) presenta concentraciones de 0.32 ppm y 0.34 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, correlacionando estos valores con los encontrados por Kabata-Pendias (2001), se encuentra que están muy por debajo de los niveles estándares, por lo tanto no representan una anomalía importante o representativa.
- Walframio (W)
- Manganeso (Mn) presenta concentraciones de 832 ppm y 318 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, se correlacionan con los SRM para encontrar que están en un nivel medio, por lo tanto, no representan anomalías importantes o representativas.
- Renio (Re) presenta concentraciones de -0.002 ppm y -0.002 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, según los estudios realizados por Kabata-Pendias (2001), se tiene que las concentraciones están por debajo de los estándares, por tanto no representa una anomalía representativa o importante.

- Hierro (Fe) con concentraciones 6.60 % y 2.27 % para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, se encuentra que para la muestra ANT-1 puede representar una pequeña anomalía, pero para la muestra ANT-2 está por debajo de los niveles SRM.
- Cobalto (Co) se encontraron concentraciones de 9.73 ppm y 5.43 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 que al correlacionarlas con los SRM no representa una anomalía representativa o importante debido a que están en los niveles intermedios.
- Níquel (Ni) con concentraciones de 10.85 ppm y 7.85 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 se correlacionan con los SRM, los niveles de concentración son normales y no representan anomalías representativas o importantes
- Cobalto (Co) se encontraron concentraciones de 5.49 ppm y 3.92 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2, con relación a las concentraciones de los SRM se tienen niveles muy por debajo de los estándares, por lo tanto, no representan anomalías.
- Plata (Ag) se encuentran concentraciones de 0.029 ppm y 0.035 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente.
- Zinc (Zn) con concentraciones de 115.5 ppm y 40.0 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2, en relación con los SRM, estas concentraciones están en valores estándares, no representando anomalías importantes o representativas.
- Cadmio (Cd) concentraciones de 0.095 ppm y 0.067 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, según los SRM no representan una anomalía importante o representativa debido a que están por debajo de los valores estándar.

5.4.4 Boroideos. Para el grupo de los Boroideos se encontraron los elementos:

- Aluminio (Al) con concentraciones de 4.72 % y 4.95 % para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, según los SRM no representan una anomalía importante o representativa debido a que se encuentran por debajo de los niveles estándar.
- Galio (Ga) presente con concentraciones de 12.35 ppm y 11.70 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, según los estudios realizados por Kabata-Pendias (2001), se encuentra que los valores de las dos muestras están por encima de los estándares por tanto respresenta una anomalía importante.
- Talio (Tl) con concentraciones de 0.329 ppm y 0.459 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2, la correlación con los SRM nos muestra que están por debajo de los valores estándar, por esto, no representan una anomalía importante o representativa.

5.4.5 Carbonoideos. Para el grupo de los Carbonoideos se encontraron los elementos:

- Germanio (Ge) presenta concentraciones de 0.25 ppm y 0.18 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, según los trabajos adelantados por Kabata-Pendias (2001), se correlacionan los valores y se determina que los valores de concentración de las dos muestras están por debajo de los estándares, por lo tanto, no representan una anomalía importante.
- Estaño (Sn) con concentraciones de 2.30 ppm y 1.53 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, correlacionando los valores encontrados por Kabata-Pendias (2001), se determina que no representan una anomalía importante debido a que están por debajo de los valores estándar.

- Plomo (Pb) con concentraciones de 17.05 ppm y 15.10 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2, según nos muestra los SRM estos valores representan los estándares, por lo tanto, no representan una anomalía importante o representativa.

5.4.6 Grupo del Nitrógeno. Para el grupo del Nitrógeno se encontraron los elementos:

- Fósforo (P) presenta concentraciones de 0.065 % y 0.041 % para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, comparando con los SRM, los niveles de concentración son estándares, por ende, no representan una anomalía representativa o importante.
- Arsénico (As) con concentraciones de 10.60 ppm y 4.74 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, se tiene que, al correlacionarlos con los SRM, los niveles están en los estándares, por lo tanto, no representan una anomalía representativa.
- Antimonio (Sb) con concentraciones de 0.35 ppm y 0.31 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, al comparar las concentraciones con los SRM, se determina que están por debajo de los niveles estándares, por lo tanto, no representa una anomalía importante.
- Bismuto (Bi) con concentraciones de 0.185 ppm y 0.066 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, se correlacionan con los valores encontrados por Kabata-Pendias (2001) y se determina que están muy por debajo de los valores estándar, por lo tanto, no representan una anomalía importante o representativa.

5.4.7 Anfígenos. Para el grupo de los Anfígenos se encontraron los elementos:

- Azufre (S) presente con concentraciones de 0.76 % y 0.17 % en las muestras ANT-1 y ANT-2.

- Selenio (Se) presente con concentraciones de 0.4 ppm y 0.2 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, en correlación con los SRM se encuentra que están por debajo de los niveles de concentración estándares, por tanto, no representan una anomalía importante.
- Telurio (Te) presente con concentraciones de -0.04 ppm y -0.04 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2.

5.4.8 Lantánidos. Para el grupo de los Lantánidos se encontraron los elementos:

- Lantano (La) con concentraciones de 51.1 ppm y 51.6 ppm respectivamente para las muestras ANT-1 y ANT-2, al correlacionarlos con los SRM se determina que los valores son altos, posiblemente una anomalía de Lantánido.
- Cerio (Ce) presente con concentraciones de 117.5 ppm y 110.0 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, para los SRM se determina que están elevados los valores, por lo tanto, es una posible anomalía de Cerio.

5.4.9 Actínidos. Para el grupo de los Actínidos se encontraron los elementos:

- Torio (Th) con concentraciones de 13.8 ppm y 16.00 ppm respectivamente para las muestras ANT-1 y ANT-2, la correlación con los SRM indica unos valores estándares para la muestra ANT-1 y medianamente elevados para la muestra ANT-2, posible anomalía de Torio.
- Uranio (U) concentraciones de 2.49 ppm y 2.01 ppm para las muestras ANT-1 y ANT-2 respectivamente, según los SRM son valores por debajo de los estándares, por lo tanto, no representa una anomalía.

Tabla 7. Resultados análisis de ICP-MS para las dos muestras: ANT-1 y ANT-2

comparándolos con los SRM 2709a - San Joaquin Soil y el SRM 2710a - Montana 1 Soil.

ANÁLISIS	ELEMENTO	UNIDAD	ANT01	ANT02	SAN JOAQUIN SOIL	MONTANA I SOIL
ME-MS61L	Ag	ppm	0.029	0.035		
ME-MS61L	Al	%	4.72	4.95	7.37	5.95
ME-MS61L	As	ppm	10.60	4.74	10.5	1540
ME-MS61L	Ba	ppm	357	550	979	792
ME-MS61L	Be	ppm	2.93	1.58		
ME-MS61L	Bi	ppm	0.185	0.066		
ME-MS61L	Ca	%	1.27	1.14	1.91	0.964
ME-MS61L	Cd	ppm	0.095	0.067	0.371	12.3
ME-MS61L	Ce	ppm	117.5	110.0	42	60
ME-MS61L	Co	ppm	9.73	5.43	12	5.99
ME-MS61L	Cr	ppm	77.6	37.2	130	23
ME-MS61L	Cs	ppm	2.74	1.96	5	8.25
ME-MS61L	Cu	ppm	5.49	3.92	33.9	3420
ME-MS61L	Fe	%	6.60	2.27	3.36	4.32
ME-MS61L	Ga	ppm	12.35	11.70		
ME-MS61L	Ge	ppm	0.25	0.18		
ME-MS61L	Hf	ppm	3.76	3.42	4	7
ME-MS61L	In	ppm	0.069	0.042		7
ME-MS61L	K	%	2.34	2.22	2.11	2.17
ME-MS61L	La	ppm	51.1	51.6	21.7	30.6
ME-MS61L	Li	ppm	17.7	19.4		
ME-MS61L	Mg	%	0.91	0.45	1.46	0.734
ME-MS61L	Mn	ppm	832	318	529	2140
ME-MS61L	Mo	ppm	0.32	0.34		
ME-MS61L	Na	%	0.837	1.160	1.22	0.894
ME-MS61L	Nb	ppm	15.65	10.95		
ME-MS61L	Ni	ppm	10.85	7.85	85	8
ME-MS61L	P	%	0.065	0.041	0.0688	0.105
ME-MS61L	Pb	ppm	17.05	15.10	17.3	5220
ME-MS61L	Rb	ppm	97.9	83.8	99	117
ME-MS61L	Re	ppm	-0.002	-0.002		
ME-MS61L	S	%	0.76	0.17		
ME-MS61L	Sb	ppm	0.35	0.31	1.55	52.5
ME-MS61L	Sc	ppm	18.05	8.73	11.1	9.9

ME-MS61L	Se	ppm	0.4	0.2	1.5	1
ME-MS61L	Sn	ppm	2.30	1.53		
ME-MS61L	Sr	ppm	166.5	199.5	239	255
ME-MS61L	Ta	ppm	1.08	0.71	0.7	0.9
ME-MS61L	Te	ppm	-0.04	-0.04		
ME-MS61L	Th	ppm	13.80	16.00	10.9	18.1
ME-MS61L	Ti	%	0.597	0.421	0.336	0.311
ME-MS61L	Tl	ppm	0.329	0.459	0.58	1.52
ME-MS61L	U	ppm	2.49	2.01	3.15	9.11
ME-MS61L	V	ppm	165.0	62.7	110	82
ME-MS61L	W	ppm	0.788	0.806		190
ME-MS61L	Y	ppm	32.1	22.1		
ME-MS61L	Zn	ppm	115.5	40.0	103	4180
ME-MS61L	Zr	ppm	116.0	111.5	195	200

5.5 Caracterización y clasificación de las dos muestras

El continente Antártico posee un área menor de un 5 por ciento correspondiente a la capa superficial libre de hielo y nieve donde se encuentran en mayor medida depósitos sedimentarios y redistribución de estos como resultado del desgaste intensivo producto de las extremas condiciones climáticas (Tedrow y Ugolini, 1956).

Avsiuk (como se citó en Tedrow y Ugolini, 1956) considera que dadas las condiciones de muy bajas humedades relativas en todo el continente se producen efectos marcados en los procesos de evolución de los suelos que junto con las bajas temperaturas, la poca pluviosidad y vientos desecantes de altas velocidades se producen las condiciones desérticas y de frío extremo necesarias para catalogar las muestras obtenidas como muestras de suelo de desierto frío, esta definición se reafirma con los trabajos realizados por Campbell y Claridge (1969) donde realiza un trabajo comparativo de los diferentes suelos antárticos con los de otras regiones desérticas

del mundo y concluyen una fuerte correspondencia y similitud en varios aspectos comunes en estas zonas climáticas, de igual manera en base a las características presentes en la Antártica Mccraw considera (como se citó en Campbell y Claridge, 1969) catalogar en su totalidad los suelos del continente antártico como permafrost.

Considerando que se catalogaron las muestras ANT-1 y ANT-2 como suelos de desierto frío se deben tomar en consideración más características tanto fisicoquímicas, composicionales, así como también genéticas para poder caracterizar más específicamente los suelos de esta categoría. Las dos muestras fueron recolectadas en dos puntos con geomorfología similar tratándose de fondos de valle con génesis exógena de tipo fluvial teniendo la muestra ANT-1 en correspondencia al denominado arrollo de la traición y la muestra ANT-2 a la quebrada del muelle (Nozal et al 2010). No se ha encontrado datos de cuñas de hielo en la isla, debido a que en el verano las condiciones ambientales son totalmente áridas, como consecuencia, en la meseta baja se genera un descongelamiento de la nieve presente en el permafrost ocasionando que pierda la humedad, que es absorbida por el subsuelo o perdida en flujos aluviales y generando características de alta salinidad en algunos sectores (Fukuda, 1992; Kato, 1990)

La cartografía relacionada al territorio de la isla Marambio (Seymour) sugiere asignar una edad del cenozoico con periodo del cuaternario y época del holoceno a los suelos de las áreas donde se tomaron las muestras por tanto se considerarían materiales recientes muy arenosos y arcillosos, se determinó en los análisis un contenido abundante el sílice y muy bajo o casi nulo en carbono y sin humus lo que sugiere un aporte de materia orgánica despreciable considerándose esto como un factor preponderante en el proceso de clasificación, añadiendo a esto las muestras recolectadas evidencian presencia de acumulación de sales las cuales se precipitan con facilidad en posiciones bajas y que además con esto se refleja la aridez del

desierto, se muestra además un contenido considerable de elementos como Na, K, Ca, y Mg, por esto y por las características anteriormente descritas se plantea la clasificación de las dos muestras como suelos tipo Ahumico según la clasificación de suelos de desierto frío descrita por Tedrow y Ugolini, (1956).

Con objetivo de complementar y clasificar con mayor detalle las dos muestras se tomó como referencia el sistema de clasificación para suelos frígidos dividida en base a las zonas de suelos del Continente Antártico expuesta en Campbell y Claridge (1969), este sistema de categorización toma aspectos como el grado de humedad disponible, grado de desarrollo, composición y material parental. Partiendo de la ubicación de la recolección de las dos muestras en valles secos con clima adyacente a la meseta con cierto grado de humedad que proviene principalmente del derretimiento de las nevadas del verano y la evidencia de presencia de minerales como montmorillonita de los resultados analíticos de MEB (ver apéndice A y B, figuras 2 y 16) se puede clasificar con todo esto como un suelo de tipo zonal subdividido como suelo “subxerous” con un alto grado de desarrollo y material parental de tipo ígneo posiblemente de granitos o doleritas.

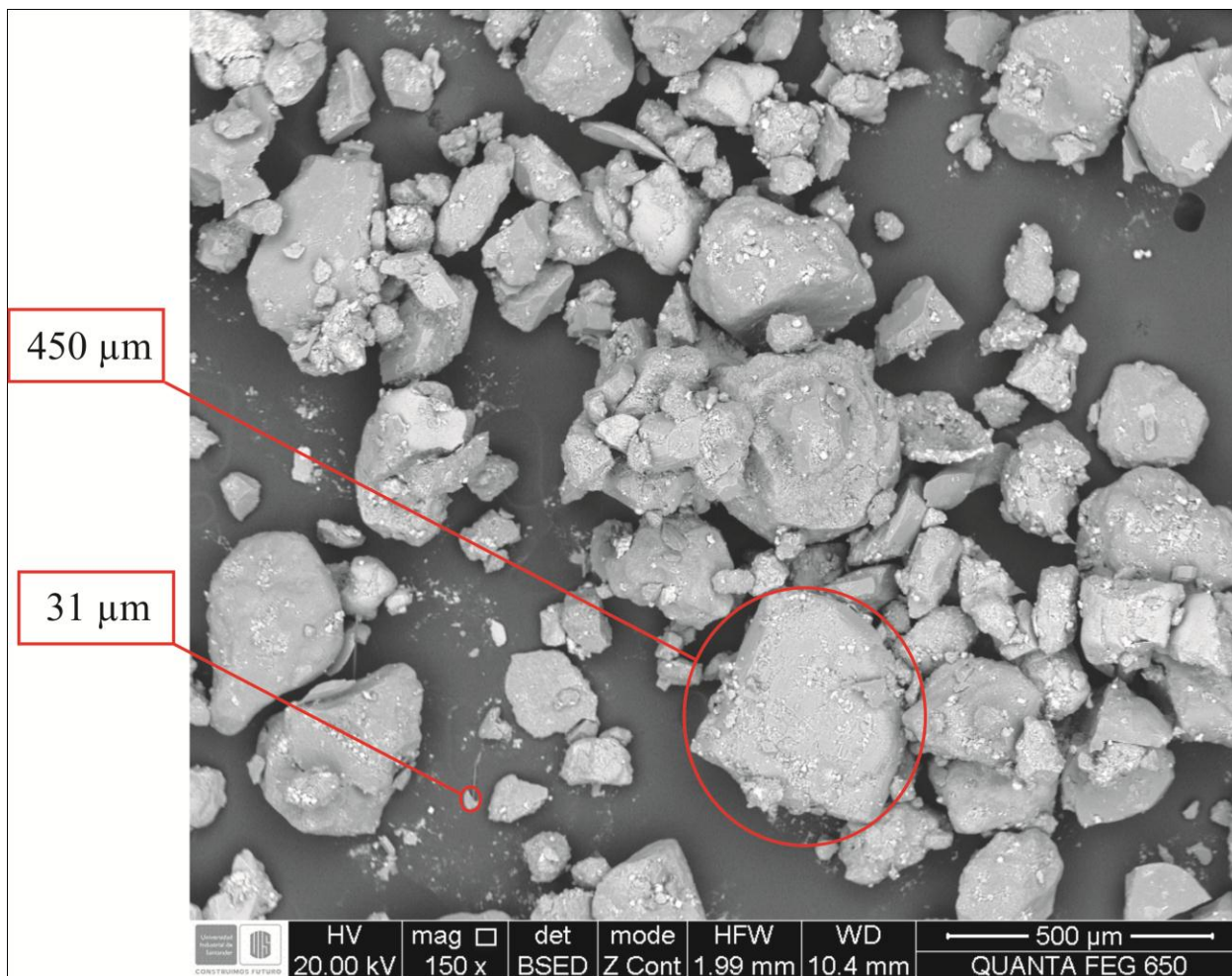


Figura 20. Imagen modificada de la muestra ANT-1 mostrando los diámetros de los granos más representativos para clasificarlos de acuerdo al tamaño del grado de Blott y Kenneth, (2012). Imagen modifica del apéndice A, figura 1.

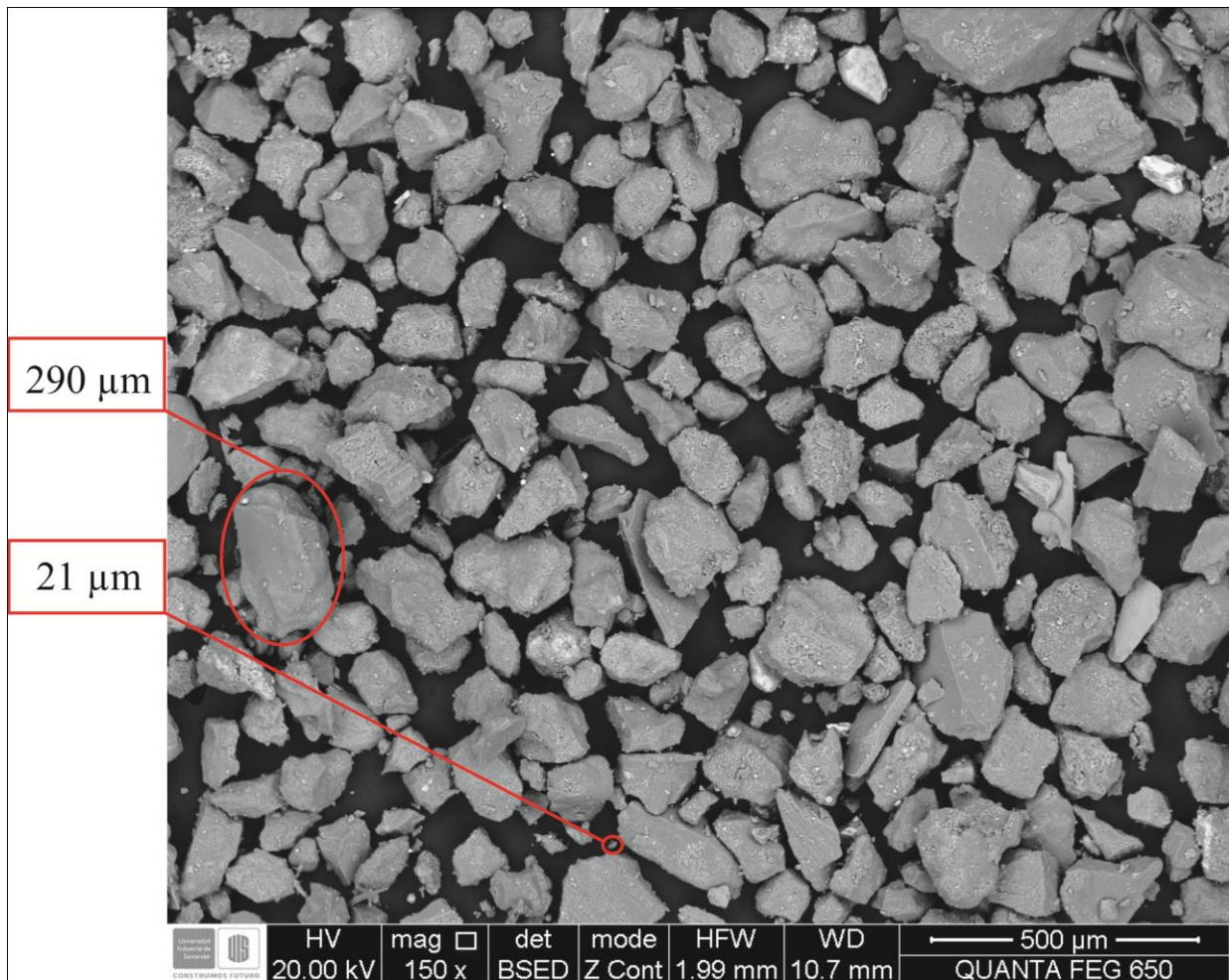


Figura 21. Imagen modificada de la muestra ANT-2 mostrando los diámetros de los granos más representativos para clasificarlos de acuerdo al tamaño del grado de Blott y Kenneth, (2012). Imagen modifica del apéndice B, figura 12.

En la tabla 8 se sintetiza la información de las características físicas de tamaño de grano, calibrado y color las dos muestras.

Para la muestra ANT-1 se tiene que el tamaño de grano está comprendido entre 31 μm -450 μm por lo tanto se tiene un rango de clasificación entre limos gruesos a arenas medias en el cual predomina el tamaño arena fina, para la muestra ANT-2 está comprendido entre los valores de

21 μm - 290 μm por lo tanto se tiene un rango de clasificación entre limos medios a arenas finas en el cual predomina el tamaño arena fina según la tabla de tamaños de grano de Blott y Kenneth, (2012). En cuanto al calibrado se determinó que la muestra ANT-1 se tiene que es mal calibrado y para la muestra ANT-2 se determinó que es bien calibrado según la tabla de calibrado de Nichols, (2009). Para determinar el color se usó la tabla de colores de Rock-Color Chart Committee (1963) y se relacionó la muestra ANT-1 con un color marrón mate rojizo con código: 5YR 5/3 y la muestra ANT-2 con un color naranja opaco con código: 5YR 6/4. En la estimación de la forma de grano en términos de redondez y esfericidad según el cuadro de Pettijohn et al (1987) se tiene que la muestra ANT-1 posee en mayor medida granos angulares esféricos y la muestra ANT-2 posee granos subangulares con baja esfericidad.

Tabla 8. *Características físicas de las muestras ANT-1 Y ANT-2.*

CARACTERÍSTICA	ANT-1	ANT-2
Tamaño de grano	Arena fina	Arena fina
Calibrado	Mal calibrado	Bien Calibrado
Color	Marrón mate rojizo con código: 5YR 5/3	Naranja opaco con código: 5YR 6/4
Redondez	Angular	Subangular
Esfericidad	Alta	Baja

6. Discusión

Esta investigación nos muestra un gran avance para el conocimiento radiométrico de la Isla Marambio, generando datos iniciales que sirven de aporte a las investigaciones del Programa Antártico Colombiano (PAC) y la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), dichos datos obtenidos

consisten inicialmente en la realización de espectrometría gamma con objetivo de determinar las radiaciones ionizantes producto de las emisiones electromagnéticas de mayor energía con las frecuencias más altas conocidas y longitudes de onda más cortas correspondientes a radiación gamma capaz de penetrar en la materia más profundamente que la radiación alfa y la beta, por tanto es aquella que representa mayor interés para la salud operacional en la Isla debido a que altas y constantes emisiones de este tipo de radiación pueden causar graves daños al núcleo de las células. Trabajos realizados en condiciones similares sobre este continente enfocados en la determinación de radiactividad ambiental gamma producto de la actividad cósmica regional se destaca el trabajo de Gonzáles (1999) realizado sobre la estación científica Antártica Peruana Machu Picchu ubicada en la Isla Rey Jorge la cual posee ambientes muy similares a los presentes en la Isla Marambio, en este trabajo mencionado se realiza gama espectrometría con las respectivas calibraciones de los equipos basados en el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) al igual que se procedió para los análisis de las muestras ANT-1 y ANT-2 pero para tomar dosis radiactivas de referencia usan la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) pero para una mejor correlación con los datos obtenidos se dispuso la norma 18-1434 del ministerio de minas y energía la cual cuenta como respaldo o entidad referente en trabajos realizados en radiometría por el Servicio Geológico Colombiano. Posterior a esto con intención de determinar las fases minerales presentes en las muestras que pudieron generar algún tipo de aporte radiactivo con elementos como U, Th y K y con objetivo además de caracterizar y clasificar las muestras a través de las fases cristalinas minerales se procedió a realizar análisis mediante Microscopia Electrónica de Barrido generando los respectivos espectros EDS de cada uno de los 10 puntos analizados de cada muestra y se compararon con espectros de referencia de Severin, (2005) y Atlas SEM Chevron Company, (2003), coetáneo a esto se desarrolló análisis

de Difracción de Rayos X para precisar las proporciones y contenido de cada fase cristalina, estos dos análisis de MEB y DRX se han realizado de manera conjunta en varios trabajos de caracterización de material geológico sobre las Islas de las cuencas James Ross entre ellas Marambio como lo son los trabajos de Tatur, (1993) y Gazdzicki (2004) los cuales de manera general complementan estos dos análisis para caracterización de unidades litológicas. Además de caracterizar radiométricamente y mineralógicamente se consideró importante la determinación de alguna posible anomalía geoquímica que pudiera expresar el aporte de algún elemento de interés en especial radiométrico, por tanto se realizó análisis de inducción de masas acoplados inductivamente (ICP-MS) tal como se sugiere realizar en los trabajos de Scolari (1998) pero en este caso se mantuvo como referencia la guía de suelos Norteamericanos de Pendias, (2001). Los análisis realizados en el presente trabajo corresponden a metodologías realizadas anteriormente en el continente Antártico pero cada una enfocada a unos objetivos separados tanto de radiometría, búsqueda de anomalías como de caracterización de unidades pero es en este trabajo donde se pretende integrar múltiples análisis y así complementar el análisis de las muestras desde diferentes perspectivas tanto radiométricas como de caracterización geológica.

Las muestras se definieron por sus características composicionales halladas como suelos de desierto frío ahúmico además de suelos “subxerous” debido a su abundante sílice, bajo o nulo carbono sin humus con la alternancia de humedad generada en valles secos además del alto grado de desarrollo y material parental de tipo ígneo posiblemente debido al aporte de granitos o doleritas según los trabajos de guía de clasificación de suelos Antárticos de Tedrow y Ugolini (1956) Campbell y Claridge (1969).

Sin embargo, para soportar de una mejor manera los resultados se requieren más puntos de muestreos para generar reproducibilidad de esta investigación, al sólo tener dos muestras de suelo nos genera datos puntuales limitando la caracterización radiométrica de la geología de la zona de estudio a los denominados depositos superficiales por Montes et al, (2010). Las dosis de radiactividad y la composición geoquímica de las muestras indican que la radiometría es estable, por lo tanto, se resuelve la hipótesis principal.

7. Conclusiones

Los valores de dosis de radiación medidos emitidos por las muestras ANT-1 y ANT-2 muestran valores dentro de los límites normales de tolerancia radiactiva para personal operativo debido a que los valores $0.1017 \mu\text{Sv/h}$ y $0.0969 \mu\text{Sv/h}$ respectivamente no sobrepasan los valores estipulados por la Resolución 18-1434 del Ministerio de Minas y Energía el cual corresponde a dosis permitidas de exposicion de 0.1140 Micro sievert por hora [$\mu\text{Sv/h}$].

Los valores de concentración de radionúclidos de origen natural se encuentran dentro de los estándares de concentración normales para materiales geológicos, además las concentraciones de estos elementos obtenidas son demasiado pobres como para considerar un deposito con rentabilidad económica debido a que en el caso del U y Th se obtuvieron valores de 4 y 3.8 ppm para el U y 13,3 y 12.5 ppm en el caso del Th y para que se consideren como rentables deberían poseer una concentración mínima a partir de 100 ppm.

Mediante los resultados de DRX Y análisis MEB se considera que la concentración obtenida de K se confiere a minerales caracterizados como la illita y el aporte de U y Th a fases minerales

de monacitas que además están relacionadas con una cantidad muy mínima de elementos como tierras raras.

Se realizó análisis de ICP-MS con la finalidad de encontrar algún tipo de anomalía geoquímica mineral, si bien ninguno de los elementos caracterizados arrojó un valor anormal con respecto a los estándares se encontró el cesio solamente un poco elevado pero no hasta el punto para considerarse anomalía geoquímica.

Si bien en las muestras analizadas los niveles de radiación emitidos en relación con la salud operacional no poseen ningún riesgo, sí se debe tener en cuenta en cuanto a la radiactividad natural se refiere debido a que la emisión del terreno puede intervenir o afectar la estimación de radiación de esta, por tanto en el caso de generar simulaciones con objetivo de determinar radiometría de fondo se deberán considerar los valores emitidos por el suelo que podrían generar algún margen de error considerable.

Se pudo corroborar mediante los análisis de MEB, DRX e ICP-MS que las características tanto minerales como composicionales de las muestras corresponden con suelos de desierto árido como se esperaría encontrar en superficies del territorio Antártico, además se determinó que los sedimentos encontrados poseen tamaños finos a muy finos con cierta presencia de minerales arcillosos.

Se determinó mediante los análisis de MEB, DRX e ICP-MS que los materiales que dieron origen a los suelos muestreados muy posiblemente poseen una proveniencia o un aporte ígneo muy significativo, pudiéndose determinar esto mediante las fases minerales caracterizadas que en su mayoría son de proveniencia ígnea y además por la relación composicional de Th / U la cual evidencia un aporte de este tipo.

8. Recomendaciones

La sugerencia más acorde a este tipo de proyectos es la necesidad de muestrear y analizar un mayor número de muestras que le aporten un valor más representativo al trabajo y con esto poder sustentar con mayor propiedad las conclusiones que se puedan generar.

Se recomienda realizar mayores sondeos de radiactividad en suelos y rocas mediante espectrometría gamma in-situ y aquellas áreas que generen mayor interés generar muestreos para analizar de la manera en que se llevó a cabo en el presente trabajo y así tener conceptos mucho más amplios de las temáticas de estudio.

Los resultados de este trabajo serían de gran utilidad para considerar en posteriores investigaciones acerca de la radiación de fondo y determinar con exactitud las variaciones que esta produce en la toma de datos y en la radiación natural total presente en el área de estudio.

Referencias Bibliográficas

- Andersson, J. G., 1906. On the geology of Graham Land. Geological Institute. University of Upsala, Bulletin, 7: 19-71. Upsala.
- Blott, S. J. y Pye, K. (2012), Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. *Sedimentology*, 59: 2071-2096. DOI:10.1111/j.1365-3091.2012.01335.x.
- Buen día NOTICIA. (2017). Aniversario de la firma del tratado Antártico. [Figura]. Recuperada de: <http://buendianoticia.com/nota/8868/aniversario-de-la-firma%20del-tratado-antartico>.
- Silva, A. A., Mirta A. F., Velasco, I y Rey, Carmen. (2009). Cap Libro. *La península Antártica: un nuevo horizonte para las ciencias hídricas*. En Silva, A. A. (1), *El agua en el norte de la Península Antártica* (17 – 30). Buenos Aires: Vázquez Mazzini Editores.
- Bockheim J.G. (2015) Cap Libro. *Soil-Forming Factors in Antarctica*. In: Bockheim J. (eds) *The Soils of Antarctica*. World Soils Book Series. Springer, Cham.
- Comité para la Protección del Medio Ambiente. (2016). *Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente*. Disponible en: https://www.ats.aq/documents/keydocs/vol_1/vol1_4_AT_Protocol_on_EP_s.pdf.
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2010). Dosis de Radiación / CSN (Sumario 3). Recuperado de: <https://www.csn.es/documents/10182/914805/Dosis%20de%20radiaci%C3%B3n>.

- Silva, A. A., Mirta A. F., Velasco, I y Rey, Carmen. (2009). Cap Libro. *La península Antártica: un nuevo horizonte para las ciencias hídricas*. En Silva, A. A. (1), *El agua en el norte de la Península Antártica* (17 – 30). Buenos Aires: Vázquez Mazzini Editores.
- Bockheim J.G. (2015). Cap Libro. *Soil-Forming Factors in Antarctica*. In: Bockheim J. (eds) *The Soils of Antarctica*. World Soils Book Series. Springer, Cham.
- Comité para la Protección del Medio Ambiente. (2016). *Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente*. Disponible en: https://www.ats.aq/documents/keydocs/vol_1/vol1_4_AT_Protocol_on_EP_s.pdf.
- Cox K.G. (1988) Continental Flood Basalts. *Petrology and Structural Geology*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers 3, 239-271. 10.1007/978-94-015-7805-9 disponible en: <https://www.springer.com/gb/book/9789027728067>.
- Campbell, I.B. y Claridge, G. G. C. (1969). A classification of frigid soils—the zonal soils of the antarctic continen. *Soil Science*, 107(2), 75-85. Recuperado de https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1969/02000/A_CLASSIFICATION_OF_FRIGID_SOILS_THE_ZONAL_SOILS.1.aspx.
- Silva, A. A., Mirta A. F., Velasco, I y Rey, Carmen. (2009). Cap Libro. *La península Antártica: un nuevo horizonte para las ciencias hídricas*. En Silva, A. A. (1), *El agua en el norte de la Península Antártica* (17 – 30). Buenos Aires: Vázquez Mazzini Editores.
- Bockheim J.G. (2015). Cap Libro. *Soil-Forming Factors in Antarctica*. In: Bockheim J. (eds) *The Soils of Antarctica*. World Soils Book Series. Springer, Cham.

- Comité para la Protección del Medio Ambiente. (2016). Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente. Disponible en: https://www.ats.aq/documents/keydocs/vol_1/vol1_4_AT_Protocol_on_EP_s.pdf.
- Silva, A.A. (2009). Aguas superficiales y subterráneas en el área norte de la península Antártica. Cap Libro. En Silva, A.A. (1), El agua en el norte de la Península Antártica. (17-30). Buenos Aires: Vasquez Mazzini Editores. Recuperado de: <https://fundacionazara.org.ar/el-agua-en-el-norte-de-la-peninsula-antartica/>.
- Caroli, S., Senofonte, O., Caimi, S., Robouch, P., Pauwels, J., & Kramer, G. N. (1998). Certified reference materials for research in Antarctica: the case of marine sediment. *Microchemical journal*, 59(1), 136-143. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026265X98915843>.
- Dalziel, I.W.D., Lawver, L Y Murphy, J. (2003). Plumes, orogenesis, and supercontinental fragmentation. *Earth and Planetary Science Letters*. 178, 1-11. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00061-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00061-3).
- Del Valle, R. A., Elliot, D. H. and Macdonald, D. I. M., 1992. Sedimentary basins on the east flank of the Antarctic Peninsula: proposed nomenclature. *Antarctic Science*, 4: 477-478. Cambridge.
- Elliot D.H. & T.A. Tautman, 1982. Lower Tertiary strata on Seymour Island, Antarctic Peninsula: 287-297. In C. Craddock (ed.), *Antarctic Geoscience*. University of Wisconsin Press, Madison. Citado en: Silva, A.A. (2009). El agua en el norte de la península Antártica. Buenos Aires, Argentina: Fundación de Historia Natural Félix de Azara. Recuperado en <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article-abstract/10/10/547/187850>.

- Fox A. J. y Cooper A. P. (1994). Measured properties of the Antarctic ice sheet derived from the SCAR Antarctic digital database, *Polar Record* 30 (174), 201-206. Recuperado de: <https://doi.org/10.1017/S0032247400024268>.
- Fitzgerald P. (2002). Tectonics and landscape evolution of the Antarctic plate since the breakup of Gondwana, with an emphasis on The West Antarctic Rift System and the Transantarctic Mountains. *Antarctica at the close of a millenium. Royal Society of New Zealand Bulletin* 35, 453-469. Reculerado de: <http://www.geology.cwu.edu/facstaff/tim/g501/pdf/Fitzgerald2002.pdf> ISBN: 1-877264-06-7.
- Fukuda, M & Strelin, Jorge & Shimicawa, K & Takahashi, N & Sone, T & Trombotto, Dario. (1992). Permafrost Ocurrence of Seymour Island and James Ross Island, Antarctic Peninsula. *Recent Progress in Antarctic Earth Science, Editorial Yoshida.* 1. 745-750. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/285876205_Permafrost_Ocurrence_of_Seymour_Island_and_James_Ross_Island_Antarctic_Peninsula.
- Fundación Marambio, (2018). Fundación de la Base Aérea Vicecomodoro Marambio. Lugar de la publicación: Fundación Marambio. Recuperado de: <http://www.marambio.aq/antecedentes.html>.
- Fox, M., Purucker, M. E., Olsen, N., Mosegaard, K. (2005). Heat Flux Anomalies in Antarctica Revealed by Satellite Magnetic Data. DOI: 10.1126/science.1106888.
- Greenpeace. (2012). Campaña nuclear Uranio combustible de los reactores atómicos y la industria militar. Recuperado de: <https://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2008/8/uranio.pdf>.

- González, S., Osoreo, J., Martínez, J., López, E., & Jara, R. (2002). Radiactividad ambiental en la estación científica antártica peruana Machu Picchu 1999–2000. Recuperado de: <http://dspace.ipen.gob.pe/bitstream/ipen/283/1/Pag.%20338-341%20-%20ICT%201998-2001.pdf>.
- Hernández, R. (2010). Metodología de la investigación. México D.F, Mexico: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Ineson, J. R. (1989). Coarse-grained submarine fan and slope apron deposits in a Cretaceous back-arc basin, Antarctica. *The journal of the international Association of Sediments*. Volumen 36 Issue5 739-819. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1989.tb01747.x>.
- Jones R. R. y Tanner; G. P.W. (1995). Strain partitioning in transpression zones. *Journal of Structural Geology*, Volume 17, Issue 6,1995,Pages 793-802. DOI: [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(94\)00102-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)00102-6).
- Kato, K., Corte, M. A. y Fukuda, M. (1990). Chemical and isotopic characteristics of ice from an ice-wedge in seymour island (isla vcom. marambio), antarctic peninsula región. https://nopr.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=2632&item_no=1&page_id=13&block_id=21
<http://id.nii.ac.jp/1291/00002632/>.
- Kellogg K. S. y Rowley, P. D. (1989). Structural geology and tectonics of the Orville Coast region, southern Antarctic Peninsula, Antarctica. U.S. Geological Survey. 25 p. ISBN: 9781287016571.
- Leng, Yang. (2008). Materials characterization. Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods. United Kingdom: JOHN WILEY & SONS. Recuperado en DOI: 10.1002/9780470823002.

- Lawver L. A., Gahagan L. M. y Coffin M. F. (1992). The development of paleosea ways Around antártica. The antarctic paleoenvironment: a perspective on global change antarctic research series 56, 7-30. DOI: 10.1029/AR056p0007.
- Lawver L. A., Royer J.Y., Sandwell D. A. y Scotese C. T. (1991). Evolution of the Antarctic en: Geological Evolution of Antarctica. Inglaterra: Cambridge. ISBN: 0521188903.
- Llano, G. A., The terrestrial life of the Antarctic, Sci. American, 207, 213-230, 1962.
- Mantilla, A. E., Bueno, R. (2014). INTERPRETACIÓN PETROFÍSICA AVANZADA Fundamentos & Aplicaciones. Recuperado de: <https://www.petrogroupcompany.com/uploads/890545265263.pdf>.
- Melgarejo J. C. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Boletín de la sociedad económica mexicana, 62(1), 1-23. Recuperado de: www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222010000100002.
- Milne A. J. y Millar I. L. (1989). The significance of mid-Palaeozoic basement in Graham Land, Antarctic Peninsula. Journal of the Geological Society; 146 (2): 207–210. DOI: <https://doi.org/10.1144/gsjgs.146.2.0207>.
- Maneilly, W. A., Harrinson, S. M., Piervy B. A. y Storey, B. C. (1987). Structural evolution of the magmatic arc in northern Palmer island, Antarctic Peninsula. American Geophysical Union. DOI: <https://doi.org/10.1029/GM040p0209>.
- Macdonald, D. I. M. y Butterworth P. J. (1990). The Stratigraphy, Setting and Hydrocarbon Potential of the Mesozoic Sedimentary Basins of the Antarctic. DOI: <https://doi.org/10.1306/St31524C8>.
- Marensi, S. A., Santillana, S. N., & Rinaldi, C. A. (2015). Stratigraphy of the La Meseta Formation (Eocene), Marambio (Seymour) Island, Antártica. Publicación Electrónica de

la Asociación Paleontológica Argentina, 5(1).
<http://www.peapaleontologica.org.ar/index.php/peapa/article/viewFile/185/191> ISSN
2469-0228.

Ministerio de Minas y Energías. 2002. Resolución No. 18 1434. Recuperado de:
<https://www.minminas.gov.co/documents/10180/23517/20914-1695.pdf>.

Nasa. (2018). Main magnetosphere. [Figura]. Recuperada de:
https://www.nasa.gov/images/content/741654main_magnetosphere-orig_full.jpg

Nichols, G. (2009). Sedimentology and Stratigraphy, second edition. Recuperado de
<https://raregeologybooks.files.wordpress.com/2014/09/sedimentology-and-stratigraphy-by-gary-nichols.pdf>. ISBN 978-1-4051-3592-4.

Nozal, F., Montes, M., Santillana, y Serrano, M. (2010). Mapa geomorfológico de la isla marambio (Seymour). Instituto Antártico Argentino.

Nichols, G. (2009). Sedimentology and stratigraphy. New Jersey, Estados Unidos: Wiley-Blackwell. Recuperado de:
<https://raregeologybooks.files.wordpress.com/2014/09/sedimentology-and-stratigraphy-by-gary-nichols.pdf>.

Nozal, F., Montes, M., Santillana, S. y Martín-Serrano, A. (2007). Cartografía geomorfológica 1:10.000 en la isla Marambio (mar de Weddell). Recuperado de:
<http://mail.dna.gov.ar/CIENCIA/SANTAR07/CD/PDF/GEORE831.PDF>.

Organización Meteorológica Mundial. (2017). La Organización Meteorológica Mundial verifica las temperaturas máximas alcanzadas en la región de la Antártida. Ginebra, Suiza. Agencia especializada de la ONU. Recuperado de

<https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-organizaci%C3%B3n-meteorol%C3%B3gica-mundial-verifica-las-temperaturas-m%C3%A1ximas>.

Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. (2012). Sand and sandstone. Springer Science & Business Media. DOI 10.1007/978-1-4612-1066-5 recuperado de <https://www.springer.com/gb/book/9780387963501>.

Paterson, S. R., Vernon, R. H. y Tobisch O. T. (1989). A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. *Journal of Structural Geology*, Volume 11, Issue 3, Pages 349-363, DOI: [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90074-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90074-6).

Programa Antártico Colombiano. (2016). Informe II expedición de Colombia a la Antártida “Almirante Lemaître”, Verano Austral 2015-2016. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/318725660_Informe_II_Expedicion_de_Colombia_a_la_Antartida_Almirante_Lemaitre.

Programa Antártico Colombiano. (2015). Primera expedición científica de Colombia en la Antártida (reporte de crucero) verano austral 2014/2015. Recuperado de: http://www.cco.gov.co/docs/antartico/reporte_crucero_f.pdf.

Programa Antártico Colombiano. (2017). Informe de la III Expedición Científica de Colombia a la Antártida “Almirante Padilla”, Verano Austral 2016-2017. Recuperado de: <http://www.cco.gov.co/docs/publicaciones/informe-iii-expedicion.pdf>.

Pettijohn, F.J., Potter, P.E. & Siever, R. (1987) Sand and Sandstone. New York, Estados Unidos:Springer-Verlag. Recuperado de: <https://www.springer.com/us/book/9780387963501>.

- Rock-Color Chart Committee. (1963). Rock Color Chart: With Genuine Munsell Color Chips. Geological Society of America. Recuperado de <http://munsellstore.com/files/CIPA000110/05C599.pdf>.
- Rinaldi, C. A., Massabie, A., Morelli, J., Rosenrman, L. H. and del Valle, R. A., 1978. Geología de la isla Vicecomodoro Marambio, Antártida. Contribucion Instituto Antártico Argentino, 217: 1-37. Buenos Aires. Recuperado de: <http://www.peapaleontologica.org.ar/index.php/peapa/article/viewFile/185/191>.
- Rubin, M. J., The Antarctic and the weather, Sci. American, 207, 84-94, 1962. Morton J. Rubin Scientific American Vol. 207, No. 3 (September 1962), pp. 84-97 Published by: Scientific American, a division of Nature America, Inc. Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/24936667> Page Count: 14 http://www.jstor.org/stable/24936667?seq=1#page_scan_tab_contents.
- Scianna, E.Y. (2005). Determinación y posible extracción de Torio y Galio en los lodos rojos del cerro los Pijiguaos (Tesis de pregrado). Universidad Simón Bolívar, Sartenejas. Recuperado de: <http://159.90.80.55/tesis/000130474.pdf>. Servicio Geológico Colombiano. (2016). Informe técnico de la comisión No. 2043 de 2016.
- Storey B. C., Vaughan A. P. M. y Millar I. L. (1996). Geodynamic evolution of the Antarctic Peninsula during Mesozoic times and its bearing on Weddell Sea history. In: Storey, B. C.; King, E. C.; Livermore, R. A. ed. Weddell Sea tectonics and Gondwana breakup. Special Publication, London, Geological Society. Pp. 87–103. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(97\)83543-9](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(97)83543-9).

- Storey B.C., Pankhurst R. J. y Johnson, A. C. (1994). The Grenville Province within Antarctica: a test of the SWEAT hypothesis. *Journal of the Geological Society, London*, 151, 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1144/gsjgs.151.1.0001>.
- Solis, J. (2011). Desarrollo de un sistema económico para monitorear radón en instalaciones industriales y de vivienda. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*. 14. 73-80. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/316441925_Desarrollo_de_un_Sistema_Economico_para_Monitorear_Radon_en_Instalaciones_Industriales_y_de_Vivienda?_sg=oQARvaP4OP7a39m1SOYDYXck3pCVEbOoYhyff6jlBbx16Gx97joKipIWsmVsandG9SqeSRjdg.
- Suarez, E., Fernández, J. A., Baeza, A., Moro, M. A., Garcia, D., Pozo, J. M., & Lanaja, J. M. (2000). Proyecto MARNA. Mapa de Radiación Gamma Natural. Recuperado de: <https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04-02+Proyecto+Marna.+Mapa+de+radiaci%C3%B3n+gamma+natural>.
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). Informe de resultados análisis de uranio (238u), torio (232th) y potasio (40k) mediante la metodología de espectrometría gamma proyecto de exploración de minerales energéticos zona de estudio Zapatoaca – Santander. Recuperado de: http://recordcenter.sgc.gov.co/B21/456_17%20Exp_Gama_K_U_Th/Documento/PDF/AnexoO_Informe_Espectrometria.pdf.
- Storey, B. C. y Alabater, T. (1991). Tectonomagmatic control on Gondwana break-up models: evidence from the proto-pacific margin of Antarctica. *British Antarctic*

- Survey, Natural Environment Research Council, Cambridge, United Kingdom DOI: <https://doi.org/10.1029/91TC01122>.
- Tedrow, J. C. F., and Ugolini, F. C. 1960 Antarctic Soils. In “Antarctic Soils and Soil Forming Processes”. J. C. F. Tedrow (ed.) Am. Geophys. Un.: 161—177. DOI:10.1029/AR008
- Silva, A.A. (2009). El agua en el Norte de la Península antártica. Recuperado de: <https://fundacionazara.org.ar/el-agua-en-el-norte-de-la-peninsula-antartica/>.
- Tatur, A., Barczuk, A., Del Valle, R., Sletten, R., & Kicińska, E. (1993). On Seymour Island, Antarctica. Polish Polar Research, 14(2), 153-168. Recuperado de http://www.polar.pan.pl/ppr14/1993-2_153-168.pdf.
- Thomson, M. R. A., Crane, J. A. y Thomson, J. W. (1991). Geological Evolution of Antarctica. Cambridge University Press. ISBN: 0521372666 El artículo que está en este libro: Pankhurst, R. J. & Rowley, P. D., 1991. Rb-Sr study of Cretaceous plutons from southern Antarctic Peninsula and eastern Ellsworth Land, Antarctica. Libro.
- Universidad de Granada. (2018). Radiactividad tema 7. [Figura]. Recuperado de <http://www.ugr.es/~amaro/radiactividad/tema7/img81.gif>
- Vaughan, A. P.M y Millar I. L. (1996). Early cretaceous magmatism during extensional deformation within the Antarctic Peninsula Magmatic Arc. Journal of South American Earth Sciences, Volume 9, Issues 1–2, 1996, Pages 121-129, DOI: [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(96\)00032-6](https://doi.org/10.1016/0895-9811(96)00032-6).
- Vaughan, D. G.; Marshall, G. J., Connolley, W. M., King, J. C., Mulvaney, R. M. (2001). Devil in the detail. Science (en inglés) 293(5536): 17779. PMID 11546858. doi:10.1126/science.1065116.

Wever, H.E., Millar, I.L. y Pankhurst, R.J. (1994). Geochronology and radiogenic isotope geology of Mesozoic rocks from eastern Palmer Land, Antarctic Peninsula: crustal anatexis in arc-related granitoid genesis, *Journal of South American Earth Sciences* 7, 1, 69-83. DOI: [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(94\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0895-9811(94)90035-3).