

Caracterización geomorfológica y calidad ambiental del arco de playa José Ignacio – Punta de Piedras (Departamento de Maldonado)

Trabajo Final de Licenciatura en Geología

Autor:

Joan Manuel González Quijano

Tutor: Dr. Cesar Goso Agilar

Co-Tutor: MSc. Marcos Tassano

Montevideo, Uruguay, 2021

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Cesar Goso orientador durante la realización de este trabajo final, por su apoyo tanto en el campo como en el gabinete y al MSc. Marcos Tassano por toda su ayuda y rigor científico como co-orientador.

A Romina Sanabria por su colaboración en la salida de campo, a la Dra Mirel Cabrera por sus consejos y aportes a la realización de este trabajo.

A el Lic. Roberto Russo por compartir y discutir la temática abordada en este trabajo.

Agradezco a mi madre por creer en mí siempre, a mis hermanos por ser un ejemplo para mí y a toda mi familia y amigos por siempre estar ahí.

A mi compañera de vida y carrera Eva Silva por su ayuda, su tolerancia y paciencia.

A mis compañeros de carrera con los cuales compartí esta experiencia y a los docentes del Instituto de Ciencias Geológicas por formarme como profesional.

Resumen

La costa atlántica uruguaya y sus playas resultan un atractivo turístico el cual genera un gran interés económico para el país, y es el escenario de numerosas áreas protegidas para la conservación del medioambiente. En este contexto el tramo de costa entre Punta Piedras y José Ignacio en el departamento de Maldonado, se encuentra en una zona influenciada directamente por las actividades de abastecimiento de petróleo del país, por su proximidad a la boya petrolera de la Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP). Estas playas presentan riesgos de derrames accidentales de petróleo. Además, existen acumulaciones de arenas negras, que dan lugar a dudas en la distinción entre dichas arenas y arenas contaminadas, lo que ha generado problemas de gestión y motiva el presente estudio.

Este trabajo caracteriza la sedimentología y geomorfología del arco de playa, mediante análisis sedimentológicos, mapas y perfiles. Así como, su estado de calidad ambiental tomando como indicador la dosis radioactiva y la contaminación por hidrocarburos.

Se presenta un mapa geomorfológico a escala 1:50.000 y otro a escala 1:20.000 del arco de playa Punta Piedras – José Ignacio, donde se señalan particularmente las zonas con acumulaciones de arenas negras. Dichas acumulaciones se presentan principalmente al Este de la desembocadura de la Laguna José Ignacio hasta la Punta José Ignacio. Las mismas pueden encontrarse a lo largo de todas las zonas de la playa con diferentes abundancias, y se las relaciona a tasas de dosis radiactivas por encima de la media mundial según el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) (2000).

Los depósitos del arco analizados de 19 muestras, están conformados por arenas subarcóicas medias a gruesas de buena a medianamente buena selección, con medias granulométricas que varían entre 893 y 254 μ m y medianas de 882 a 267 μ m. La composición mineralógica que le aporta el color negro característico a las arenas negras, son la ilmenita y otros óxidos metálicos. Estos minerales están presentes en las fracción fina y muy fina de la arena, su abundancia es minoritaria y variable entre un 1 y 10%, el resto es conformado principalmente por cuarzo y feldespatos.

La morfodinámica del arco es principalmente reflectivo, con pendientes que oscilan entre 5,3 y 10,8°, caracterizada por tener a lo largo del arco escarpes de erosión, un canal supramareal y formar parte de la barra de cierre de la laguna José Ignacio. No existe contaminación por petróleo o sus derivados en las playas del arco (al mes de julio de 2020). Del punto de vista radio ambiental en el arco existen zonas de alto fondo radiactivo, de 710 y 770 nGy.h⁻¹ asociados a acumulaciones de arenas negras, estos tenores no configuran riesgos radiológicos para la población en general según la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) (2007).

Índice

1. Introducción	1
1.1 Ubicación y consideraciones del área de estudio	2
2. Objetivos.....	5
2.1 Objetivo general	5
2.2 Objetivos específicos.....	5
3. Materiales y métodos	6
3.1 Actividades de gabinete.....	7
3.2 Actividades de campo.....	8
3.3 Actividades de laboratorio	8
4. Antecedentes.....	11
4.1 Unidades geológicas del área de estudio	11
4.1.1 Neoproterozoico.....	13
4.1.2 Pleistoceno	15
4.1.3 Holoceno.....	16
4.2 Marco Geomorfológico	20
4.2.1 Aspectos de la geomorfología litoral.....	20
4.2.2 Costa atlántica Uruguaya	22
4.2.3 Geomorfolología local	26
4.3 Aspectos ambientales.....	32
4.3.1 Arenas negras.....	32
4.3.2 Las fuentes de radiación natural y su registro	33
4.3.3 Contaminación por hidrocarburos en playas de arena	40
5. Resultados.....	44
6. Discusión	62
7. Conclusiones	66
8. Bibliografía.....	68
Anexo I	75
Anexo II.....	77

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio. Imagen satelital Google Earth, 2016....	2
Figura 2. Mapa de ubicación de los principales balnearios en el área de estudio. Imagen extraída del Visualizador de Catastro de la Dirección Nacional de Catastro , 2020.....	3
Figura 3. Ubicación de las áreas protegidas y la planta Terminal Este de ANCAP, en el área de estudio. Imagen satelital Google Earth, modificada en base a los datos de SNAP.....	4
Figura 4. Vista en detalle de diferentes diluciones de petróleo bajo luz UV.....	9
Figura 5. Fragmento del mapa geológico escala 1:100.000 de la zona de estudio. Fuente: Spoturno <i>et al.</i> (2012).....	12
Figura 6. Detalle de afloramiento de gneiss correspondiente al Complejo Cerro Olivo en Punta Piedras.....	13
Figura 7. Granito José Ignacio en José Ignacio.....	14
Figura 8. Principales zonas y componentes de una playa, modificado de GIOC (1998).....	21
Figura 9. Evolución reciente del Río de la Plata (López Laborde <i>et al.</i> , 2000).....	24
Figura 10. Deriva litoral desde Laguna Garzón hasta Punta José Ignacio, Imagen satelital Google Earth, (Alves, 2011).....	25
Figura 11. Mapa de tipos de suelo según los grupos CONEAT (RENARE-MGAP, 2020)...	27
Figura 12. Fragmento del mapa geomorfológico escala 1:50000 adaptado a la zona de estudio. Tomado de: Goso (2016).....	30
Figura 13. Fragmento del mapa de vulnerabilidad a la erosión a escala 1:50.000 de la zona de estudio. Tomado de Alves (2011).....	31
Figura 14. Series desintegrativas del ^{238}U y el ^{232}Th , las flechas en vertical representan desintegración alfa, las flechas en diagonal desintegraciones beta menos y en la parte inferior de cada isótopo está el tiempo de semidesintegración, en verde los isótopos padre y en azul los isótopos hijo que se utilizan para cuantificarlos (modificado de: Ferronsky y Polyakov, 2012).....	36
Figura 15. Esquema simplificado de un espectrómetro gamma (modificando de: Barrera, 2008)	37
Figura 16. Espectro gamma de una muestra propia de arena negra, (Muestra P7).....	38

Figura 17. Características geomorfológicas del Arco de playa Punta piedras - José Ignacio. a) Cordón dunar estabilizado por la vegetación y cortado por la ruta 10. b) Cárcavas estabilizadas por la vegetación. c) Laguna José Ignacio y Planicies asociadas. d) A la izquierda el escarpe de erosión, a la derecha el canal supramareal.....	45
Figura 18. Límites rocosos del arco Punta Piedras - José Ignacio. a) Gneiss de Punta piedras. b) Bandeado gnésico con feldespatos rotados (Punta Piedras). c) Punta José Ignacio. d) Bochas de granito con enclave (José Ignacio).....	47
Figura 19. Presencia de arenas negras. a) Zona de lavado y berma. b) Perfil en profundidad de la playa. c) Playa distal. d) Desembocadura de cañada. e) Base del escarpe de erosión. f) Dunas.....	49
Figura 20. Mapa de puntos de muestreo y perfiles.....	50
Figura 21. Vista panorámica al Oeste en la playa de Edén Rock.....	51
Figura 22. Perfiles de playa (7 de julio de 2020): a) Punta Piedras; b) Edén Rock; c) Laguna José Ignacio (incluye posplaya hasta la laguna); d) José Ignacio.....	52
Figura 23. Cambios en los parámetros granulométricos (Folk y Ward, 1957) según la zona de la playa y el lugar de muestreo ordenados de Oeste a Este. a) Mediana. b) Selección. c) Asimetría. d) Curtosis.....	54
Figura 24. Porcentaje de feldespatos en las muestras según zona de playa y el lugar de muestreo ordenados de Oeste a Este.....	55
Figura 25. Arenas negras vistas en lupa. a) Muestra P4Lav con baja proporción de minerales oscuros. b) Muestra P7, con alta proporción de minerales oscuros. c) Fracción pesada de una muestra con arena negra.....	56
Figura 26. Cambios en las actividades de ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K y el DR según la zona de la playa y el lugar de muestreo ordenados de Oeste a Este. a) Actividad del ^{226}Ra . b) Actividad de ^{40}K . c) Actividad del ^{232}Th . d) Tasa de dosis absorbida en el aire.....	59
Figura 27. Relación entre los valores promedio para cada transecta de Actividad de ^{40}K (escala a la izquierda) y el porcentaje de feldespatos en la muestra (Escala a la derecha)..	59
Figura 28. Matriz de dispersión e histogramas de las variables analizadas en las arenas. En base a los histogramas, se pueden observar 2 grupos de datos, correspondiente a la zona de "arenas blancas" (círculos naranjas) por un lado, y de "arenas negras" por otro (círculos negros).....	60

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de los tipos morfológicos de playa según el parámetro de Dean.....	22
Tabla 2. Características radiactivas del ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K (Ferronsky, 2015).....	34
Tabla 3. Tasas de exposición externa media mundial, calculadas a partir de diversas concentraciones de radionucleidos terrestres en el suelo (UNSCEAR, 2000).....	34
Tabla 4. Áreas de alta radiación de fondo natural (UNSCEAR, 2000).....	35
Tabla 5. Influencia del tipo de arena en la capacidad de retención de crudo de petróleo y derivados (Bergueiro, 1990).....	43
Tabla 6. Parámetros Morfológicos del arco de playa Punta Piedras - José Ignacio.....	51
Tabla 7. Resultado del análisis granulométrico según los parámetros de Folk y Ward (1957).....	53
Tabla 8. Resultados del estudio de composición, redondez y esfericidad	55
Tabla 9. Actividades de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K de las arenas muestreadas, tasas de dosis absorbida en el aire y dosis efectiva anual. En naranja las muestras separadas estadísticamente como “arenas negras”.....	58
Tabla 10. Coeficiente de correlación de Pearson y valor p para el grupo de datos “arenas blancas”. En verde se destacan las correlaciones con $p < 0.05$	61
Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson y valor p para el grupo de datos “arenas negras”. En verde se destacan las correlaciones con $p < 0.05$	61
Tabla 12. Coeficientes de correlación de Pearson ($p < 0.05$) de las variables estudiadas de los grupos de datos: Arenas negras y Arenas blancas.....	62

Abreviaturas

A	Actividad específica
AF	Arena fina
AG	Arena gruesa
AM	Arena media
ANCAP	Administración Nacional de Combustibles Alcohol y Portland
Ar	Argón
B	Berma estacional
Be	Berma estable
Bq	Bequerel
C	Canal
CIN	Centro de Investigaciones Nucleares
CPS	Cuentas por segundo
Cu	Cobre
DEAR	Dosis Radioactiva Efectiva Anual
DINAMIGE	Dirección Nacional de Minería y Geología
DR	Dosis Radioactiva
E	Escarpe de erosión
$\epsilon\gamma$	Eficiencia del detector
Fd	Feldespatos
FL	Fragmentos líticos
GIOC	Grupo de Oceanografía y de Costas
Gy	Grey
IAEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
ICRP	Comisión Internacional de Protección Radiológica
IDEuy	Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay
IGM	Instituto Geográfico Militar
INUMET	Instituto Uruguayo de Meteorología
ITOPF	Federación Internacional de Contaminación de Propietarios de Petroleros
Jl	José Ignacio
K	Potasio
KeV	Kilo electrón volt
L	Zona de lavado
MGAP	Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
MVOTMA	Ministerio de Vivienda Ordenamiento territorial y Medio Ambiente
Pb	Plomo
Pd	Playa Distal
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PP	Punta Piedras
P γ	Probabilidad de emisión gamma
Qz	Quarzo
Ra	Radio
RENATE	Dirección General de Recursos Naturales
SHOMA	Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada
SNAP	Sistema Nacional de Áreas Protegidas
Sv	Sievert
Th	Torio
U	Uranio
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UNSCLEAR	Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas
Ω	Parámetro de Dean

1. Introducción

Este estudio presenta los resultados del Trabajo Final de Grado para completar curricularmente los requisitos y así obtener el título de Licenciado en Geología.

Se fundamenta ante la necesidad de conocer las características morfológicas, morfodinámicas, mineralógicas y el estado de la calidad ambiental actual tomando como indicadores la contaminación por hidrocarburos y otros aspectos medioambientales de relevancia, del arco de playa Punta Piedras - José Ignacio, por situarse próximo a una boya petrolera.

El área de estudio reviste especial interés económico, turístico y ambiental, sumado a que se ubica en este tramo de costa el principal abastecimiento de petróleo en el país, donde han ocurrido derrames accidentales en el pasado reciente (El País 2019 y 2020; El Observador 2018).

Las acumulaciones de arenas negras en la playa son otro rasgo distintivo del área y son conocidas por relacionarse con zonas de altos fondos radiactivos naturales. Esta circunstancia ha traído problemas en situaciones de derrames de petróleo, dado que su aspecto ha llevado a la confusión en la identificación de derrames y ha dificultado las labores de limpieza.

La realización de estudios de base en este sentido resulta de suma importancia para la conservación de un bien natural: generan conocimiento de los recursos naturales costeros; permiten evaluar las posibles contribuciones humanas y prevenir accidentes; y contribuyen con información básica del medio físico como herramienta fundamental para la gestión.

1.1 Ubicación y consideraciones del área de estudio

El área de estudio comprende el arco de playa entre las puntas de José Ignacio y Piedras, en el departamento de Maldonado (Figura 1), el cual se extiende por unos 17 km. Esas puntas se localizan en las coordenadas: 34°54'12.46"S, 54°48'16.95"O para Punta Piedras y 34°50'30.54"S, 54°38'31.44"O para José Ignacio.

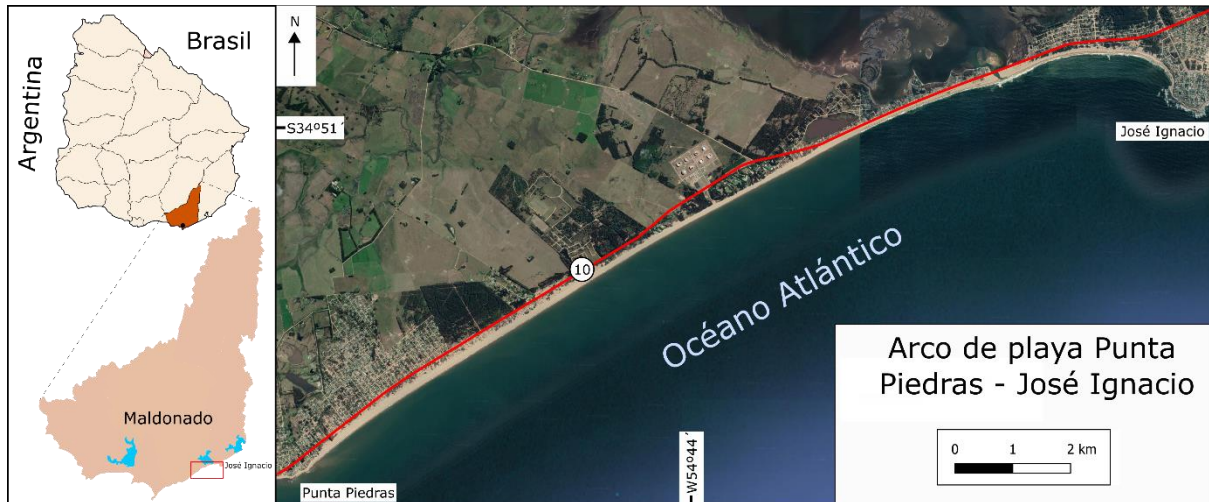


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio. Imagen satelital Google Earth, 2016.

Este sector forma parte de los 233 km de costa atlántica uruguaya, que se sitúan entre Punta del Este hasta el arroyo Chuy, estando en el extremo occidental del mismo.

La vía de acceso principal es la Ruta Nacional N° 10 cuyo trazado allí es lindero y paralelo a la costa, brindando acceso a todas las playas incluidas en el área. Los centros poblados (balnearios) que están comprendidos en el mismo son de Oeste a Este: Buenos Aires, El Chorro, San Vicente; Edén Rock, Santa Mónica y Faro de José Ignacio (conocido como José Ignacio) (Figura 2).



Figura 2. Mapa de ubicación de los principales balnearios en el área de estudio. Imagen extraída del Visualizador de Catastro de la Dirección Nacional de Catastro, 2021.

En Uruguay el turismo es una importante actividad económica. De acuerdo a la información provista por el Ministerio de Turismo (2018), significó el 8,6% del PIB del país, generando un total de 114.287 puestos de trabajo en 2018, siendo el 6,3% del conjunto de puestos totales de la economía. En este contexto el departamento de Maldonado aporta casi el 50 % de estas ganancias y significa el 12,3% de los puestos de trabajo directamente relacionados con esta actividad en el departamento cuyo principal atractivo turístico son las playas (Ministerio de Turismo, 2018).

La zona además reviste especial importancia ambiental por formar parte de la Red Física de Sitios de Interés, del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) (MVOTMA, 2015) específicamente el sitio E29 José Ignacio – Laguna Garzón, Ingresado al SNAP el 21/11/2014, cómo área de Importancia para la Conservación de Aves (IBAs) y la Reserva de Biósfera “Bañados del Este”, reconocida como tal por la UNESCO en el año 1976 (Figura 3).



Figura 3. Ubicación de las áreas protegidas y la planta Terminal Este de ANCAP, en el área de estudio. Imagen satelital Google Earth, modificada en base a los datos de SNAP.

En la zona a su vez, se destaca la infraestructura de almacenamiento y transporte de petróleo “Terminal Este” de la Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP). El mismo recibe el petróleo importado mediante la descarga de buques petroleros amarrados a una Monoboya de acero de 10 m de diámetro, diseño *Single Point Mooring*, situada geográficamente en lat $34^{\circ} 53' 5''$ S, long $54^{\circ} 42' 7''$ O a dos millas marinas (3600 m) de la costa atlántica. El petróleo es enviado por líneas submarinas a la Planta Terminal del Este para su almacenamiento y luego es bombeado a través de un oleoducto que recorre aproximadamente 170 km hasta la refinería en la Planta "La Teja" (Montevideo).

La ocurrencia de algunos accidentes como con el buque tanque “San Jorge”, acontecido el 8 de febrero de 1997 (Levine, 1997) y en particular las averías de la manguera de la boya petrolera de la ANCAP durante 2018, 2019 y 2020 (El País 2019 y 2020; El Observador 2018), evidencian que esta zona de Uruguay se encuentra expuesta a riesgos de derrames de petróleo y derivados, un riesgo ambiental común en las zonas marinas (Clark, 2001).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Caracterizar la sedimentología y geomorfología en el arco de playa Punta José Ignacio – Punta de Piedras (departamento de Maldonado), así como indicar su estado de calidad ambiental tomando como indicador la dosis radioactiva de las arenas negras.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar morfológicamente las playas en el arco Punta José Ignacio – Punta de Piedras, mediante perfiles y mapas, señalizando acumulaciones de arenas negras.
- Caracterizar los depósitos arenosos en ese arco en base a parámetros sedimentológicos.
- Caracterizar mineralógicamente los depósitos arenosos en el arco.
- Establecer una metodología y determinar en forma cualitativa la eventual contaminación por hidrocarburos.
- Efectuar un análisis de los depósitos de arenas negras (cuanti y cualitativo) y determinar su tasa de dosis radioactiva.

3. Materiales y métodos

Los materiales utilizados para desarrollar las distintas tareas fueron:

- Fotos aéreas del instituto geográfico militar escala (IGM) 1:20.000, año 1966. Rollo 60 N° 200, Rollo 62 N° 1, 2, 72, 73, 74, 76, 77, 78, 145, 146, 147, 150, 151 y 152
- Cartas topográficas a escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar:
 - F29/30 San Carlos - Punta del Este
 - E29 José Ignacio
- Imágenes satelitales de Google Earth versión 7.3.3
- Visualizador web de la infraestructura de datos espaciales del Uruguay (IDEuy)
- Estereoscopio
- Lupa binocular
- Estufa
- Nivel óptico Zeiss J32
- Tamizadora Retsch AS 200 Basic
- Tamices Retsch números 10–18–35–60–120 y 230
- Lupa binocular Zeiss Stemi 508
- Lámpara UV modelo UVGL-25 Mineralight® 254-366 nm
- Balanza Ohaus
- Detector gamma Canberra de germanio hiperpuro tipo-P
- Recipiente Marinelli de 250 ml
- Placas de Petri
- Gradistat 4.0
- Spyder Python 3.7

Para conseguir los objetivos planteados se llevaron a cabo una serie de actividades de gabinete, campo y laboratorio que se detallan a continuación.

3.1 Actividades de gabinete

Revisión bibliográfica de antecedentes en la zona costera, sobre su contexto geológico, geomorfología, geográfico y ambiental.

Mapeo geomorfológico

El mapeo se realizó a partir de la revisión de antecedentes de estudios geológico y geomorfológico y la fotointerpretación en base al relevamiento fotográfico realizado en el año 1966 por el IGM a escala 1:20.000 y el visualizador web de la infraestructura de datos espaciales del Uruguay (IDEuy, 2020), con el objetivo de definir unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio, y la realización de mapas geomorfológicos a escala 1:50.000 y 1:20.000. Por último, se realizó un control de campo para verificar la fotointerpretación, ubicación de depósitos de arenas negras, levantamiento de datos y documentación fotográfica.

Tratamiento estadístico

Se llevó a cabo el análisis estadístico para el estudio granulométrico que consistió en el cálculo de la moda, mediana y media, tanto como valores de selección, asimetría y curtosis. Para ello se utilizaron los coeficientes estadísticos de Folk y Ward (1957) utilizando el software Gradistat 4.0.

Se estudió también, las correlaciones entre las variables composicionales, granulométricas y radiométricas de las arenas utilizando la biblioteca Scypy en Spyder Python 3.7.

3.2 Actividades de campo

Muestreo y Perfiles

El muestreo consistió en la obtención de sedimento superficial (primeros 5 cm) de cada sub ambiente de playa (zona de lavado, berma, playa distal y duna) mediante 5 réplicas tomadas con un cilindro de 6cm de diámetro, según perfiles transversales a la línea de costa (muestras P1, P2, P3 y P4) y en sitios de acumulación de arenas negras (muestras P5, P6, P7), obteniendo aproximadamente 1 kg de sedimento por muestra. Las muestras fueron secadas en estufa a 50°C durante 2 días.

Los perfiles se levantaron mediante un nivel óptico marca Zeiss J32 y reglas graduadas, el ajuste por altura se realizó con niveles de referencia y la ayuda de modelos digitales de terreno consultados en el visualizador del IDEuy (2020). Se realizaron un total de cuatro perfiles de playa (Punta Piedras, Eden Rock, laguna José Ignacio y José Ignacio) (Figura 20). Los perfiles (Figura 22) y muestras se tomaron el 7 de julio del 2020, cuatro días posterior a una tormenta que subió la marea hasta los 2,4 m de altura en el mareógrafo de La Paloma (Administración Nacional de Puertos, 2020) (Figura 21).

3.3 Actividades de laboratorio

Análisis sedimentológico: granulometría y mineralogía

Se efectuó el tamizado en el laboratorio del Instituto de Ciencias Geológicas, con un equipo Retsch AS 200 Basic y tamices Retsch números 10–18–35–60–120 y 230, y cada fracción retenida fue pesada en una balanza Ohaus de 0,1g de precisión. Los resultados obtenidos del análisis mecánico se cargaron a una planilla Excel con la extensión Gradistat 4.0 donde se calcularon porcentajes relativos de cada subpoblación respecto a la muestra total, valorando los tamaños de los diferentes percentiles. La composición mineralógica de las arenas se determinó visualmente mediante análisis petrográfico con lupa binocular Zeiss Stemi 508, El recuento de componentes y especies minerales se realizó mediante comparadores visuales.

Determinación cualitativa de hidrocarburos

El área de estudio fue recorrida en su totalidad con el fin de identificar presencia o ausencia de contaminación por hidrocarburos, se empleó el análisis organoléptico y los métodos de observación siguiendo las metodologías recomendadas por ITOPF (2011) y COI-UNESCO (1984).

En el laboratorio se realizó tanto el método directo como el de extracción por solvente según lo propuesto por Colligian (1993). El procedimiento directo se realizó colocando una cantidad de 20 g aproximadamente de muestra homogeneizada en una placa Petri. Luego se realizó la visualización en una habitación oscura utilizando una lámpara UV modelo UVGL-25 Mineralight® 254-366 nm sobre las muestras y examinándose en busca de fluorescencia "seca". Posteriormente, se agregaron 5 ml de hexano calidad analítica, se agitó y trasvasó el solvente a otra placa de Petri, donde se repitió la observación. Se elaboró un control positivo con sedimentos contaminados con petróleo crudo, para el mismo se elaboraron diluciones de dicha muestra hasta alcanzar una fracción mínima de contaminante observable, estableciendo así un límite de detección de 1/400 partes de petróleo, para la extracción con solvente (ver Figura 4 y Anexo I).

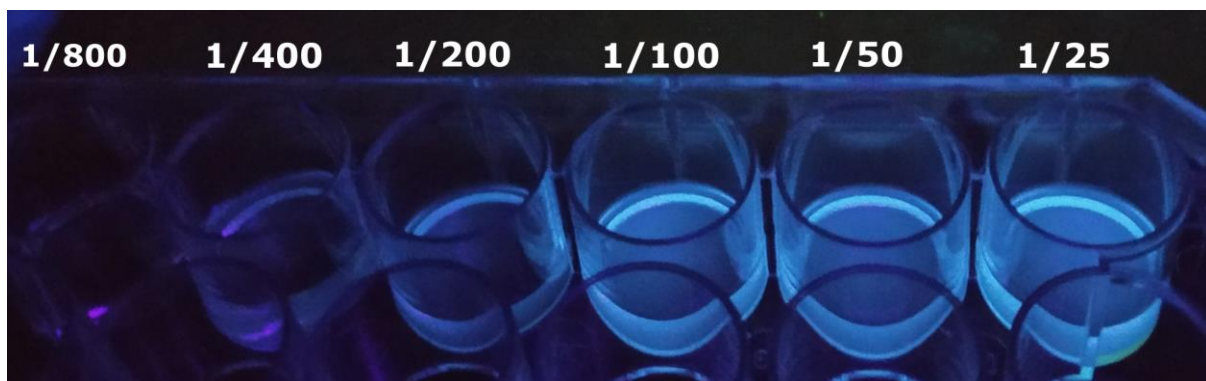


Figura 4. Vista en detalle de diferentes diluciones de petróleo bajo luz UV.

Espectrometría gamma

Las muestras de arena fueron secadas y cuarteadas para tomar una masa aproximada de 300 g (con balanza Ohaus de 0,1g de precisión) que se colocó en un recipiente Marinelli de 250 ml. El ^{222}Rn (gas noble, hijo del ^{226}Ra) alcanza el equilibrio radiactivo con todos sus productos secundarios a ^{210}Pb en siete vidas medias de ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3.82$ d). Por lo tanto, cada muestra se selló y almacenó durante 30 días para alcanzar el equilibrio secular entre ^{226}Ra y sus hijos antes de la medición.

Las actividades de los radionucleidos ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K fueron determinados en base a las actividades de ^{214}Pb a 295.2 keV y 351.9keV, ^{214}Bi a 609.3 keV para el ^{226}Ra ; de ^{212}Pb a 238.6 keV y ^{208}Tl a 583.1 keV para el ^{232}Th ; y de ^{40}K a 1460 keV para él mismo. Dichas mediciones se realizaron utilizando un detector gamma Canberra de germanio hiperpuro tipo-P con eficiencia relativa > 20% a 1,33 MeV, instalado en el Laboratorio de Radioquímica del Centro de Investigaciones Nucleares (CIN) con un tiempo de medición de 12h por muestra. La calibración del equipo en eficiencia y energía se realizó con un patrón IAEA 447 y se corrigieron las medidas por fondo y auto atenuación por densidad.

4. Antecedentes

4.1 Unidades geológicas del área de estudio

La costa atlántica uruguaya presenta una conformación geológica diversa, tanto aflorante como subaflorante. Este conjunto de rocas que forman los cerros y puntas rocosas de la costa, son también el sustrato de rocas sedimentarias y sedimentos Mesozoicos, Cenozoicos, y del Cuaternario reciente. Estas rocas y sedimentos representan la acción de procesos geológicos vinculados a cuencas marginales que se extienden en la actual plataforma continental, y que estuvieron controladas por subsidencia y oscilaciones del nivel del mar (eustasia) de origen tectónico y climático (Goso y Muzio, 2006).

Particularmente el área de estudio se encuentra en el Terreno Punta del Este. Este terreno está ubicado al Este de la zona de cizalla de Sierra Ballena y se compone de un basamento gnésico-migmatítico y secuencias supracorticales (Preciozzi *et al.* 1999). Dicho terreno es interpretado como un dominio exótico, tectónicamente yuxtapuesto al cinturón Dom Feliciano (Basei, *et al.* 2011).

En la Figura 5 se muestra la geología del área de estudio según Spoturno *et al.* (2012). Allí, se pueden observar rocas del Neoproterozoico, del Cenozoico y sedimentos actuales, los que se detallan a continuación.

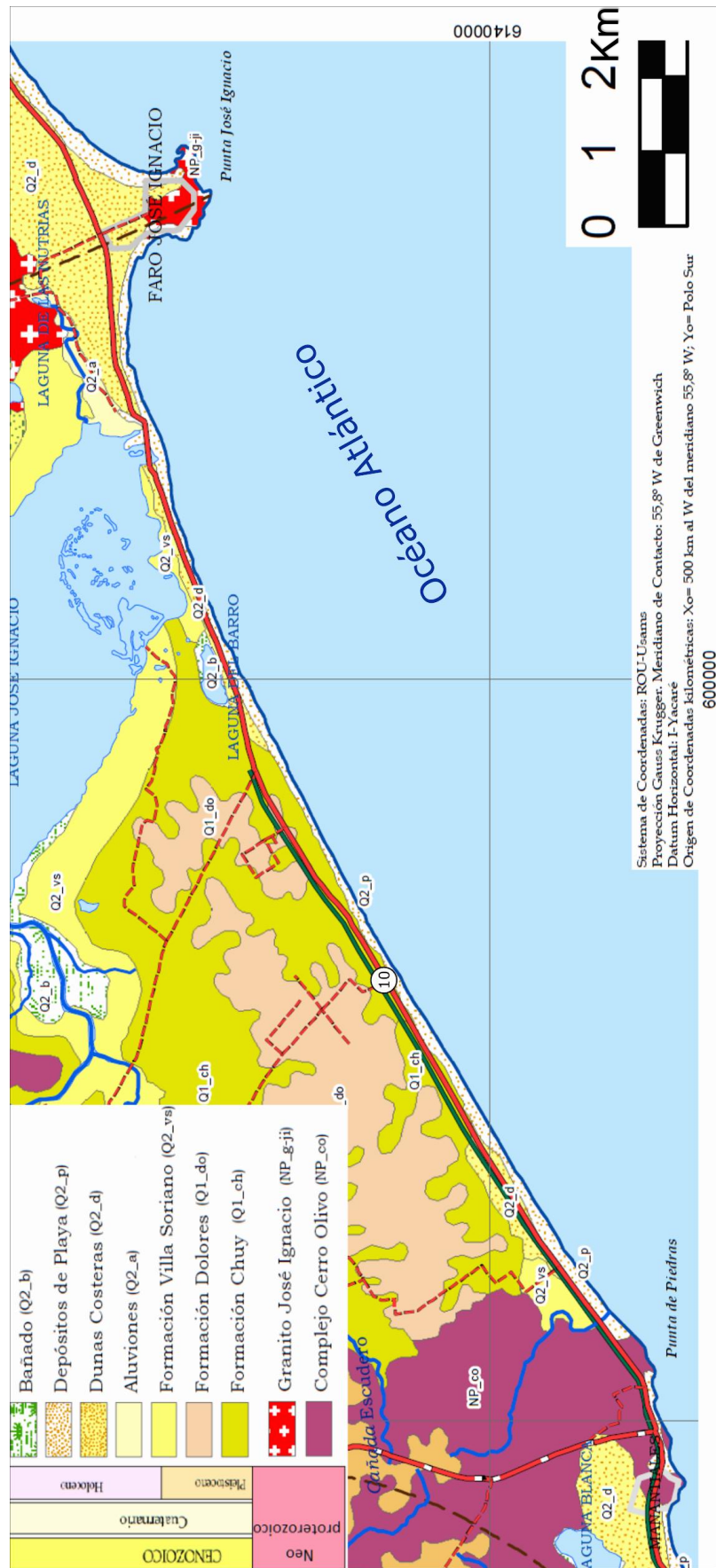


Figura 5. Fragmento del mapa geológico escala 1:100.000 de la zona de estudio. Fuente: Spoturno *et al.* (2012).

4.1.1 Neoproterozoico

Complejo Cerro Olivo

El complejo cerro olivo fue definido por Masquelin (2002), se compone de unidades litodémicas de un basamento migmatítico limitado por la Zona de Cizalla transcurrente de Sierra Ballena, al Oeste y por la zona de falla “Laguna de Rocha” al Este.

Según Oyhantçabal *et al.* (2009) y Lenz *et al.* (2011) este basamento es una asociación de rocas orto y paraderivadas con alta deformación dúctil (Figura 6) de edad Neoproterozoica, que presenta un evento magmático de edad 800-700 Ma, y un evento de metamorfismo de alto grado de edad 650 Ma.



Figura 6. Detalle de afloramiento de gneiss correspondiente al Complejo Cerro Olivo en Punta Piedras.

Granito José Ignacio

Este granito se incluye dentro de un grupo de cuerpos graníticos que se denominan Granitoides Tardipostectónicos, con edades comprendidas dentro del Cambro - Precámbrico Superior Moderno (Spoturno *et al.* 2012). La litología principal corresponde a un granito inequigranular, porfirítico, con matriz de grano grueso a muy grueso (Figura 7), integrada por cuarzo, feldespato alcalino blanco y rosado y plagioclasa; el máfico más abundante es biotita que se dispone en láminas aisladas y agrupada en librillos. Los fenocristales son de feldespato alcalino de color rosado y blanco (Preciozzi, *et al.* 1993), con una edad U-Pb en zircones de 567 +/- 4.1Ma según Lara *et al.* (2020).



Figura 7. Granito José Ignacio en José Ignacio.

Preciozzi *et al.* (1993) y Oyhantçabal (2005) reconocen otra facies que corresponde a un granito equigranular de grano grueso y coloración rojiza, similar a la matriz del granito anterior, aunque sin fenocristales. También se observaron facies graníticas de grano fino con muscovita y escasa biotita, a tendencia leucocrática, posiblemente recortando las facies anteriores.

4.1.2 Pleistoceno

Formación Chuy

Esta unidad litoestratigráfica fue definida (en tres episodios: Chuy I, II y III) por Goso (1972), y junto con depósitos de la Formación Dolores, forman parte de lo que geomorfológicamente se denomina Planicie Costera. Conforman una terraza alta, con desarrollo de barrancas parcialmente degradadas, discontinuas y cubiertas en parte por depósitos de dunas actuales.

De una manera general está compuesta por niveles métricos de arenas finas a gruesas, lentes y estratos de orden centimétrico a métrico de arenas muy gruesas a gravillosas, con algunas intercalaciones de limos y arcillas. Las arenas gruesas a gravillosas, son de color amarillento a blanquecino, mal clasificadas, subredondeadas a subangulosas con clastos monocristalinos de cuarzo, con matriz arenosa de cuarzo y minerales densos. Las arenas finas y medias son cuarzosas con frecuentes minerales densos, de buena clasificación, subredondeadas a subangulosas de color blanquecinas, amarillentas y amarronadas. Y los niveles finos limo-arcillosos con variable contenido de arena, son los menos frecuentes, presentan coloraciones gris verdosas a grises, ocasionalmente se reconocen nodulitos de 1 a 2 mm con halos de oxidación dispersos en la matriz (Preciozzi *et al.* 1985; Spoturno *et al.* 2012). En base a relaciones estratigráficas y edades numéricas esta unidad se ubica en el Pleistoceno Ubilla & Martínez (2016).

Formación Dolores

Esta unidad litoestratigráfica fue definida por Goso (1972) y está constituida por sedimentos limo arcillosos a arcillosos, fangos con variable contenido de fracciones arena, gravilla y grava. Con menor frecuencia se pueden observar limos loésicos y paleosuelos.

Los sedimentos limo arcillosos presentan una estructura compacta, masiva, color marrón en varias tonalidades, presentan ocasionales clastos de fracción arena y de composición cuarzo feldespática flotando en la matriz.

Los fangos son de matriz limo arcillosa y limosa de color marrón de tonalidades variadas. Presentan abundante fracción: arena, gravilla y grava, suspendidas en la matriz, la composición es oligo a polimíctica. Por lo general son masivos, ocasionalmente presentan estructuras de sobrecarga y esbozos de estratificación por deslizamiento. Este tipo litológico es frecuente tanto hacia la base de la formación como en las zonas de cabeceras cercanas a los contactos con rocas más antiguas con detritos provenientes de materiales sedimentarios arenosos y del propio basamento granítico alterado (Spoturno *et al.* 2012). Martínez y Ubilla (2016) ubican a esta unidad en base a edades numéricas en el pleistoceno tardío al Holoceno temprano.

4.1.3 Holoceno

Formación Villa Soriano

Esta unidad, definida por Goso (1972) presenta sedimentos con una gran variabilidad textural, pero con predominio de las fracciones limo, arcilla y arena muy fina. Ocurren en forma subordinada las fracciones arenosas media y gruesa y ocasionalmente las gravillas y cantos.

Las fracciones arcilla y limo son de coloraciones negro, gris oscuro y verdoso, presentan ocasionales clastos de arenas medias y bioclastos. Las fracciones arenosas, tienen composición cuarzosa, son blanco-amarillentas; con escasa a nula matriz arcillosa, en las fracciones arena fina y media se observan concentraciones locales de minerales densos. Las fracciones grava, canto y bloque, tienen amplio predominio de variedades silíceas, ocasionalmente se reconocen cantos y bloques de pegmatitas, aplitas y otros líticos graníticos. Es muy frecuente en los niveles arenosos, la presencia de bioclastos partidos y enteros de moluscos bivalvos, especialmente del tipo Litoridina; estos bioclastos, aparecen, alternando con las fracciones arena, en niveles de orden decimétrico, en estructuras lenticulares o

formando parte de las fracciones arenosas y gravilosas (Spoturno *et al.* 2012). Según Martínez y Ubilla (2016) la edad de la Formación Villa Soriano, fue establecida, según criterios estratigráficos, faunísticos y edades numéricas mediante ^{14}C , dentro del Holoceno.

En la memoria descriptiva del mapa geológico escala 1:100000 del departamento de Maldonado, Spoturno *et al.* (2012) describen los siguientes depósitos para esta zona:

Depósitos de bañados

“Estos depósitos se localizan en las áreas de planicies muy bajas donde se reconocen dos tipos: los asociados a la faja costera, entre las barras de arena y los entalles de abrasión antiguos y los que se ubican en las zonas de curso inferior y desembocadura de las principales vías de drenaje, Por lo general, estas áreas, presentan una napa freática permanente, por encima de la superficial. Están constituidos por arcillas, limos y escasos horizontes de turba.

Las arcillas y limos son sedimentos de color gris oscuro y negro con escaso contenido de arena muy fina y abundante materia orgánica. Ocasionalmente se observan algunos horizontes turbosos, por encima de niveles limo-arcilloso. Se trata de abundantes restos de vegetales de bañado que se encuentran en proceso de mineralización. Son de color gris amarronada y ocurren asociados a abundante vegetación acuática.”

Depósitos de playa

“Ocupan la porción más distal de la Faja Costera, están distribuidos de forma longitudinal y paralela a la línea de costa, presentan gran influencia de las olas especialmente las generadas a partir del régimen de sudestadas. De la observación de esta costa, los sitios de acumulación son los que predominan.

La disposición de estas arenas, es de dos modalidades; entre la Barra del Arroyo Solís Grande y Punta del Este las acumulaciones ocupan las áreas de bahías,

mientras que, a partir de Punta del Este hasta por lo menos el límite con Rocha, los depósitos se disponen en una faja longitudinal, rectilínea y prácticamente continua, excepto la saliente de José Ignacio. Litológicamente, están compuestas por arenas finas hasta muy gruesas y gravillosas, blanco-amarillentas, cuarzo-feldespáticas, de regular a buena selección, con esporádicos clastos de naturaleza polimíctica. Su grado de redondez varía desde anguloso a redondeado. Las fracciones de arena poseen estratificación plano-paralela, cruzada de bajo ángulo y *ripples*.”

Depósitos de Dunas

“Se ubican en la faja costera desde la barra de playa hacia el interior del continente, cubriendo desde unas pocas hectáreas a varios kilómetros cuadrados, Se apoyan de manera transgresiva sobre los depósitos del cuaternario reciente y antiguo e incluso sobre áreas con rocas de basamento relativamente cercanas a la costa, aunque bastante por encima de los niveles de cota habituales.

Algunos de estos depósitos, especialmente los que se encuentran hacia el interior del continente, presentan procesos de edificación con incipiente desarrollo de suelo.

Litológicamente, se trata de arenas blancas, finas y medias, de muy buena selección, cuarzosa y bien redondeadas. Presentan estratificación plano-paralela, y estratificación cruzada de gran porte con *ripples* en sus flancos, clara estructura de dunas y dirección de transporte hacia el nor-noroeste.

La mayoría de los depósitos son activos (médanos móviles) aunque existe a pesar del incipiente desarrollo de suelo con vegetación herbácea, arbustiva y arbórea de tipo artificial.”

Depósitos aluvionales

“Están asociados a los entalles de los actuales cursos de agua, por debajo o encima de la napa de agua superficial, dependiendo en gran medida de los períodos de estiaje y de humedad. Según la dinámica fluvial se pueden encontrar en fase destructiva o de acumulación. Litológicamente presentan una gran variedad textural y composicional desde fracciones finas y medias (arcillas, limos, arenas y gravillas) hasta agrupamientos de líticos gruesos del tamaño (clastos y bloques).

Los materiales están poco a nada consolidados, son de composición cuarzo feldespática a arcósica de bajo redondeamiento, regular clasificación, clasto soportados y con desarrollo de estructuras de canal en acreción lateral granodecreciente. De manera subordinada, ocurren lentes y/o niveles de arcillas y barros, que por lo general están ocupando depresiones de canales abandonados. Los depósitos arenosos finos y limo arcillosos se concentran hacia la porción inferior de los principales cursos de agua, y en las redes de drenaje que se encuentran entallando rocas y sedimentos de líticos finos: arcillas y limos. Son de coloraciones grisáceas con moteados ocres ya que contienen abundante materia orgánica; localmente pueden observarse delgados niveles y lentes de arenas y gravillas, intercalados con las pelitas.”

4.2 Marco Geomorfológico

4.2.1 Aspectos de la geomorfología litoral

La geomorfología litoral según Bird (2000) se ocupa de la evolución de los modelados litorales (acantilados, franjas rocosas, playas, dunas, estuarios, *lagoons*, deltas), los procesos que inciden sobre los mismos y sus cambios. Esta disciplina puede abarcar diferentes escalas de trabajo desde fenómenos que ocurren de manera instantánea en pequeñas superficies hasta cambios regionales que pueden durar decenas de miles de años (Gutiérrez Elorza, 2008)

Las playas son acumulaciones de arena, grava o una mezcla de ambas, situadas en el límite del mar y el continente, en cuya dinámica interviene fundamentalmente el oleaje (Flor, 2004). Constituyen una morfología tridimensional que se estudia por cambios en su perfil (Gutiérrez Elorza, 2008).

El perfil de la playa es una medida precisa de la inclinación y del ancho de la playa, utilizando un punto fijo establecido, dicho perfil está sujeto a los cambios estivales y eventuales propios del sistema litoral. En la Figura 8 se representan diferentes zonas en las que se puede dividir el perfil de playa.

- *Escalón de playa*: zona de mayor pendiente que aparece en ocasiones en el límite inferior del frente de playa. Suele contener sedimentos más gruesos que en el resto del perfil.
- *Zona de lavado*: sector expuesto a la acción del flujo ascendente y descendente del oleaje.
- *Berma*: zona casi horizontal de la playa formada por la depositación de sedimentos debida a la acción del oleaje. Presenta un cambio brusco de pendiente hacia el mar, pueden existir diferencias entre el oleaje en invierno y verano, así como por eventos de tormenta (estacionales).
- *Zona intermareal*: abarca desde la parte exterior de la berma y el límite de descenso del oleaje en bajamar.
- *Playa distal*: Tramo superior de la playa, entre la cresta de berma y la línea tierra adentro, donde comienza la vegetación, o cambia la morfología al pasar

de un campo de dunas, un escarpe, o similar. Es una franja solo inundada por el agua en tormentas excepcionales.

- *Escarpe de playa*: Escalón vertical en la playa seca formado por la erosión de la berma a causa de un temporal.
- *Dunas Litorales*: Área constituida por arenas procedentes de la playa que se acumulan por encima de la marea alta.

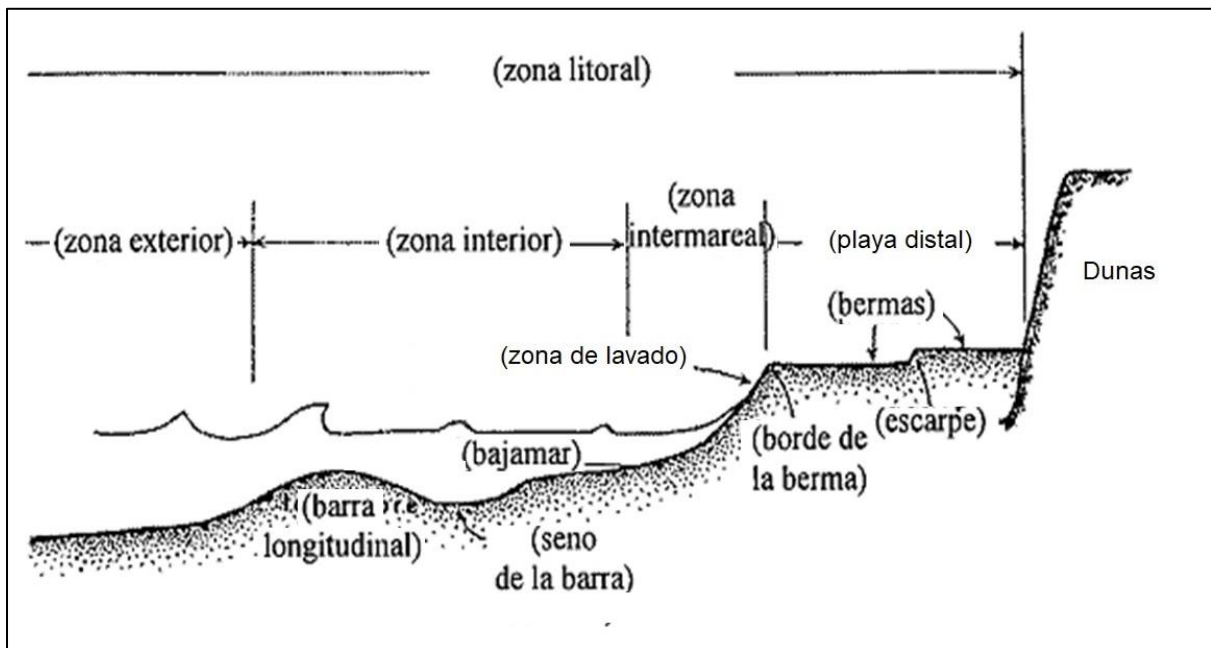


Figura 8. Principales zonas y componentes de una playa, modificado de GIOC (1998).

Para clasificar los diferentes morfotipos de playa se utiliza el parámetro de Dean (Ω) (Short 1996).

$$\Omega = \frac{Hb \times 100}{WsT}$$

Donde Hb es la altura de ola en rompiente (m), Ws es la velocidad de asentamiento de la partícula ($m \cdot s^{-1}$), y T es el período de ola (s).

Según esta clasificación, las playas pueden dividirse en disipativas ($\Omega > 6$), intermedias (Ω entre 1 y 6) o reflectivas ($\Omega < 1$) cuyas características son reflejadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los tipos morfológicos de playa según el parámetro de Dean.

Tipo de playa	Características
Playas disipativas $\Omega > 6$	<ul style="list-style-type: none"> - Arena fina - Gran altura de ola - Poca pendiente - Baja tasa de cambio - Barras
Playas intermedias $1 < \Omega < 6$	<ul style="list-style-type: none"> - Arena fina o media - Altura de ola media - Barras más acentuadas/ Barras anexadas a la playa
Playas reflectivas $1 > \Omega$	<ul style="list-style-type: none"> - Arena media o gruesa - Altura de ola pequeña - Mucha pendiente - Baja tasa de cambio - Bermas, cúspides, escalón

4.2.2 Costa atlántica Uruguaya

La costa atlántica uruguaya se extiende desde el A° Chuy hasta Punta del Este aproximadamente, y se define geomorfológicamente por playas arenosas con puntas rocosas de escasa extensión, que definen playas con diferentes dinámicas y características, Además de las playas, la zona costera comprende también ambientes de lagunas, lomadas, planicies y campos de dunas.

Este ambiente es dominado por olas de alta energía, conformando arcos entre puntas rocosas con playas mayoritariamente reflectivas. Los arcos de playa se presentan con morfologías variadas, y es posible observar geformas que denotan la acción de procesos erosivos que vienen actuando desde el Holoceno (Gómez Pivel, 2006).

La línea de costa actual puede ser entendida por los cambios relativos del nivel del mar durante el Holoceno, los cuales se pueden resumir en 4 episodios principales (Figura 9) (López Laborde *et al*, 2000):

- **Antes de 14.000 a.A.P.** (años antes del presente). El mar se encontraría aproximadamente a -150 m existiendo una amplia planicie costera sobre la que se desarrolló un sistema de ríos de llanura con fajas meandrosas, lagunas y bañados. La mayoría de estos ríos construyeron deltas y algunos de ellos alcanzaron el actual borde de la plataforma continental habiendo estado, incluso, conectados con cañones submarinos.
- **Entre 11.000 y 6.000 a.A.P.** Comienza el ascenso del nivel del mar y la migración lateral de la línea de costa. Hacia el final del periodo se produce una estabilización del nivel del mar que permite la construcción de un complejo de isla barrera que cierra, parcialmente, al actual Río de la Plata obligándolo a desaguar hacia el Norte.
- **Entre 6.000 y 4.000 a.A.P.** El mar invade el resto de las tierras bajas y el valle del Río de la Plata creando un sistema de bahías poco profundas de ambiente predominantemente salobre (las actuales lagunas costeras), en cuyo interior se forman cordones litorales y niveles de playa elevados.
- **Desde los 4.000 a.A.P.** Se produce una estabilización del nivel del mar que crea una microfacies regresiva; la costa se transforma en una costa de acreción con el desarrollo de barras, cordones de playa y campos de dunas bajo condiciones hidráulicas costeras similares a las actuales. Durante los últimos milenios el mar y las condiciones climáticas sufren cambios o alteraciones seculares que producen ciclos alternados erosivos y constructivos.

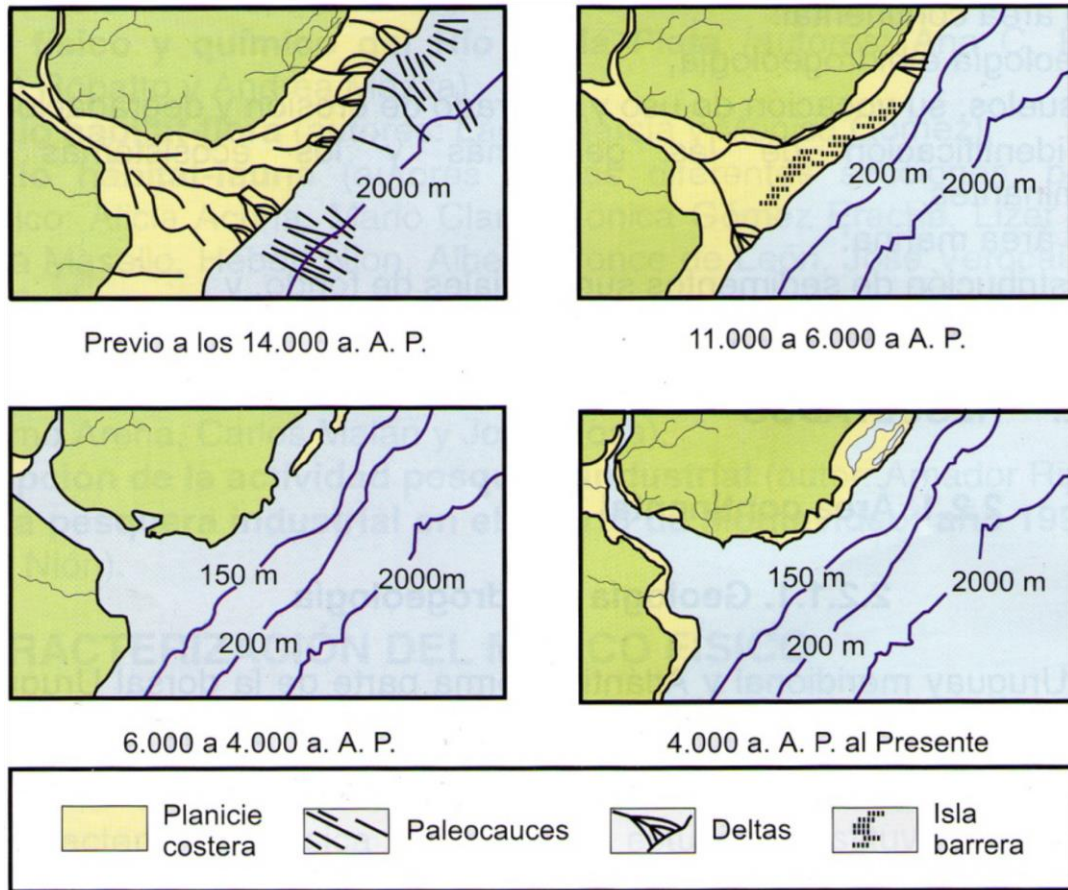


Figura 9. Evolución reciente del Río de la Plata (López Laborde *et al*, 2000)

Actualmente la deriva litoral de la costa atlántica uruguaya presenta un punto de inflexión ubicado en el tramo Cabo Polonio – Punta del Diablo. Al SW de Cabo Polonio la dirección de la deriva tiene una resultante neta SW-W. Desde el Norte de Punta del Diablo hasta al menos el puerto de Rio Grande (Brasil) la dirección es NE (Panario y Gutiérrez, 2006).

El transporte litoral tiende a acumular sedimentos en las puntas rocosas que interceptan la deriva, de esta manera la corriente queda subsaturada de material provocando erosión al otro lado. Este efecto acumulación/erosión se puede observar claramente en Punta José Ignacio (Figura 10) según Goso (2016).

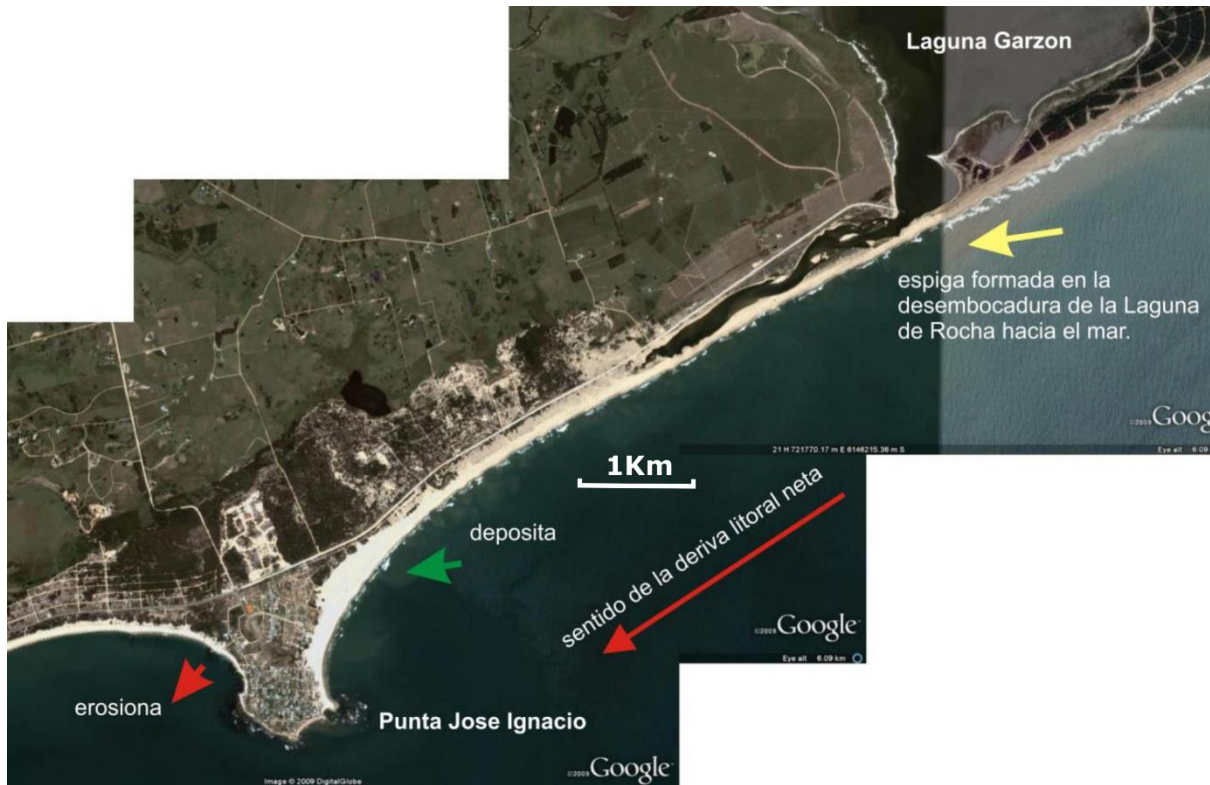


Figura 10. Deriva litoral desde Laguna Garzón hasta Punta José Ignacio, Imagen satelital Google Earth, (Alves, 2011).

En la costa se conforman dos compartimentaciones geomorfológicas diferentes: las Tierras Altas que agrupan distintos elementos pertenecientes al Basamento; y las Tierras Bajas compuestas por la planicie costera constituida por planicies aluviales Internas, barreras y sistemas de barreras-lagunas (de Norte a Sur la laguna Negra, Castillos, Rocha, Garzón y José Ignacio) y la Plataforma Continental. Los controles morfogenéticos son predominantemente depositacionales, producto de procesos subsidentes diferenciales a lo largo del Cenozoico, en donde hubo una importante tasa de acomodación sedimentaria (Goso *et al*, 2011).

Las playas arenosas son el elemento geomorfológico costero predominante en la costa atlántica. Así lo atestiguan los 200 km de playas repartidos en 20 arcos, mostrando variadas granulometrías, con predominio de las fracciones medias hasta muy gruesas y gravilosas principalmente en el sector SW. Hay una tendencia general de disminución de la granulometría hacia el NE. La composición mineralógica es relativamente uniforme predominando el cuarzo (que llega a 98%) sobre los feldespatos plagioclásicos (hasta 9%) y alcalinos (hasta 5%), con porcentajes reducidos (hasta 4%) de fragmentos líticos, a excepción de algunas localidades donde

aparecen concentraciones de minerales opacos (Goso, 2016). Parece haber consenso entre los autores que existen playas morfológicamente reflectivas y disipativas (Panario y Gutierrez 2006; Lercari y Defeo 2006). Su distribución es con predominio de las playas disipativas a intermedias en el sector NE y reflectivas a intermedias hacia el SW de la costa atlántica (Gómez Pivel, 2006).

4.2.3 Geomorfología local

El territorio uruguayo se ubica principalmente dentro de la clasificación climática de Köppen-Geiger como "Cfa", tipo C: de clima templado, moderado y lluvioso (temperatura de más bajas entre -3° y 18°C), subtipo f: Clima de temperie húmeda (la lluvia es irregular), subtipo a: variedad específica de temperatura (temperatura mes más cálido superior a 22 grados centígrados). En Maldonado la temperatura promedio es 16.5°C , y la precipitación es de 1040 mm al año (INUMET, 2020).



Figura 11. Mapa de tipos de suelo según los grupos CONEAT (RENARE-MGAP, 2020).

En la Figura 11 se muestra el mapa de tipo de suelos según los grupos CONEAT de la dirección nacional de recursos naturales (RENARE) del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) (MGAP, 2018). De los cuales en la zona de estudio se presentan los siguientes:

2.11a (beige claro)

Brunosoles Subéutricos Háplicos, arenoso franco gravillosos y franco gravillosos, superficiales, pedregosos (Regosoles).

3.12 (beige)

Gleysoles Háplicos Melánicos/Ócricos de texturas variables, generalmente arenosas, salinos y ligeramente salinos (Gley-húmicos salinos).

5.4 (verde)

Suelos desarrollados de materiales cristalinos, y en parte, de sedimentos limo-arcillosos poco potentes y discontinuos que los recubren. Son moderadamente profundos y superficiales, de texturas francas.

7.1 (gris)

Litsoles Éutricos (Subéutricos) Melánicos, muy superficiales, de color pardo grisáceo muy oscuro, textura franco arenosa.

7.2 (violeta)

Inceptisoles Melánicos/Úmbricos (Regosoles) moderadamente profundos, de textura franco arenosa, color pardo muy oscuro.

9.1 (naranja)

Brunosoles Éutricos y Subéutricos, Típicos o Lúvicos moderadamente profundos y pseudolíticos, de color pardo oscuro a negro, textura franco arcillo limosa.

10.7 (rosado)

Brunosoles Subéutricos Lúvicos (Praderas Pardas) y Argisoles Subéutricos Melánicos Abrúpticos (Praderas Planosólicas), de color pardo oscuro, textura franca a franco limosa.

Según el Atlas de Cobertura de Suelo del Uruguay (Álvarez, *et al.* 2015), los usos y cobertura de suelo en el área de estudio son principalmente herbáceo natural (pastoreo) y la plantación forestal, con áreas urbanas y suburbanas representadas por los balnearios, un área de equipamiento urbano representado por la Terminal Este de ANCAP y áreas descubiertas representadas por las playas y puntas rocosas.

El arco de playa que comprende este estudio se extiende desde Punta Piedras a punta José Ignacio, abarca una longitud de 17 km, conformados por una estrecha faja arenosa bordeada por la urbanización escasa, bosques artificiales, campos de dunas y la laguna costera José Ignacio. La costa se extiende con dirección ENE, las barrancas (recostadas a las playas actuales, paralelas a la línea de costa, pero alejadas de ella o marginando las lagunas litorales) y las “cárcavas” constituyen rasgos distintivos. Por último, la Punta José Ignacio representa un frente rocoso que sobresale unos 2.0 km de la orientación general de la línea de costa (López, 2005).

La Laguna de José Ignacio se genera por el cierre de una bahía o microestuario al que llegan aguas de los arroyos José Ignacio y de Sosa. Ocupa una planicie muy rasa que se sitúa entre 0 y 5 m de altitud. Tiene una superficie de 13 km² y un perímetro de 26,3 km, con el eje mayor relativamente perpendicular a la costa. La barra se proyecta y ensancha hacia el océano y muestra hacia el interior barras de *inlet* (flujo) que la vuelven somera. Muestra una salida directa al mar en una zona de playa relativamente baja y expuesta a los eventos de tormentas (Goso, 2016).

Según Evia y Gudinas (2000), el paisaje se encuentra muy modificado por la expansión urbana con varias zonas forestadas que dejan "manchas" de bañados. Según la campaña realizada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas entre los años 1976 y 1978, el área de estudio presenta playas rectilíneas de dirección N60E, pendientes en torno a 8,6%, arenas pobremente seleccionadas con una media poblacional de 0,8mm y un P90 de 1,93mm. Tanto el tamaño de grano como el grado de selección disminuye gradualmente hasta la playa de José Ignacio para luego aumentar desde Arachania hacia el Este (MTO, 1979)

En estudios más recientes sobre el área se describe desde el balneario Buenos Aires, una playa rectilínea de unos 10 km de largo, hasta la laguna Garzón, definida en su

límite Este por la punta de José Ignacio. En los primeros kilómetros la playa se presenta con un extenso campo de dunas con alturas promedio de 1,5 – 2 m, un frente de playa ancho con arena de granulometría gruesa cuarzo - feldespática, pendiente elevada, y con alta energía de olas. Hacia la mitad de este tramo rectilíneo comienzan a disminuir la pendiente y el ancho de la playa, el cordón de dunas frontal se presenta con una escarpa de erosión, y el campo de dunas es atravesado por la ruta (Figura 12) (Alves, 2011).

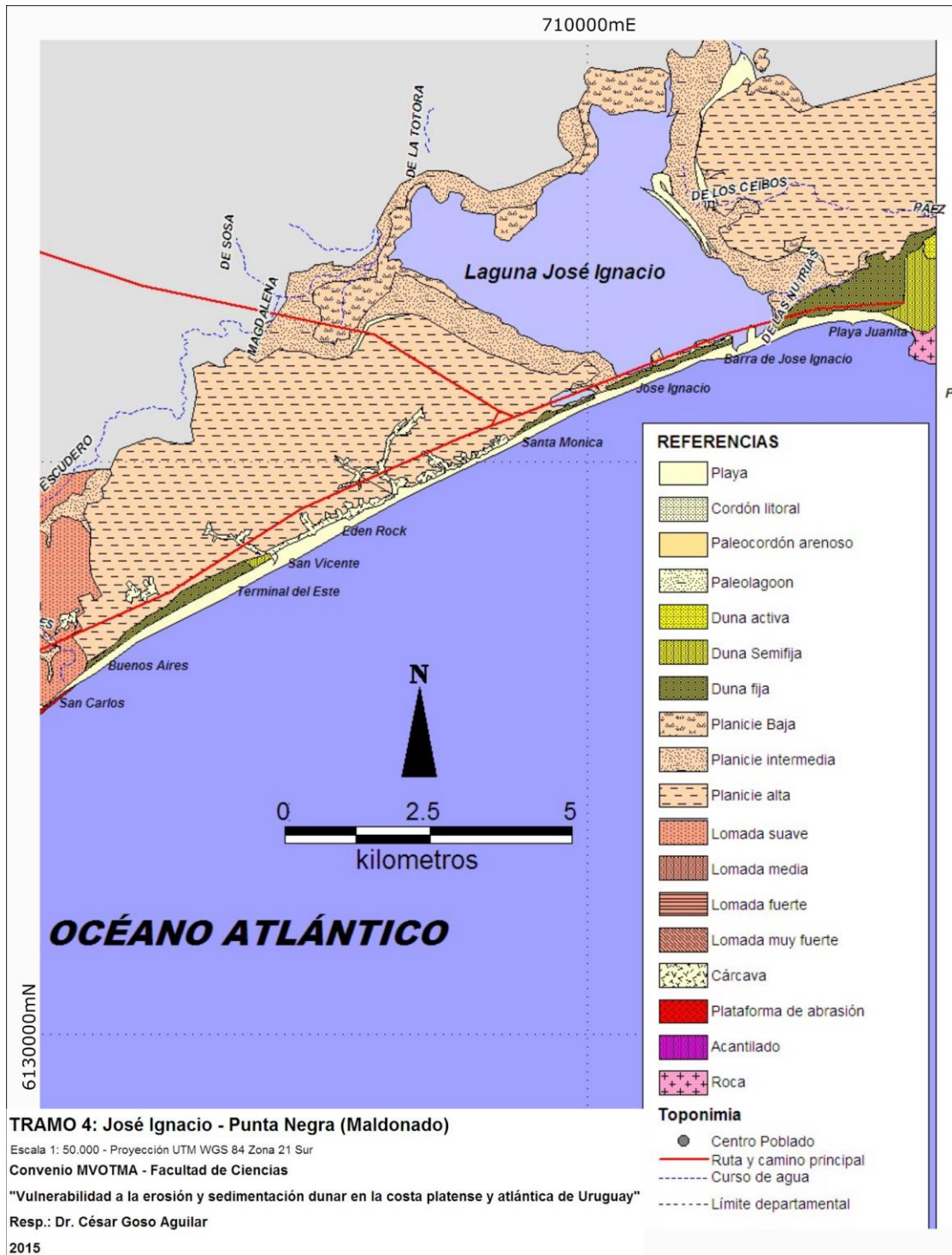


Figura 12. Fragmento del mapa geomorfológico escala 1:50000 adaptado a la zona de estudio.

Tomado de: Goso (2016).

En cuanto a la mineralogía de las arenas de playa para el área de José Ignacio, ha sido definida como arena heterogénea de nula consolidación, moderadamente seleccionada, de granos redondeados a subredondeados, de baja esfericidad. Su composición mineralógica: cuarzo, feldespato potásico, microclina con presencia de óxidos. Los líticos son en su mayoría de origen ígneo, accesoriamente de origen metamórfico (Benitez, 2016).

Desde el punto de la vulnerabilidad a la erosión es diversa a lo largo del arco de playa siendo la parte central la más comprometida y los extremos menos vulnerables (Alves, 2011) (Figura 13).

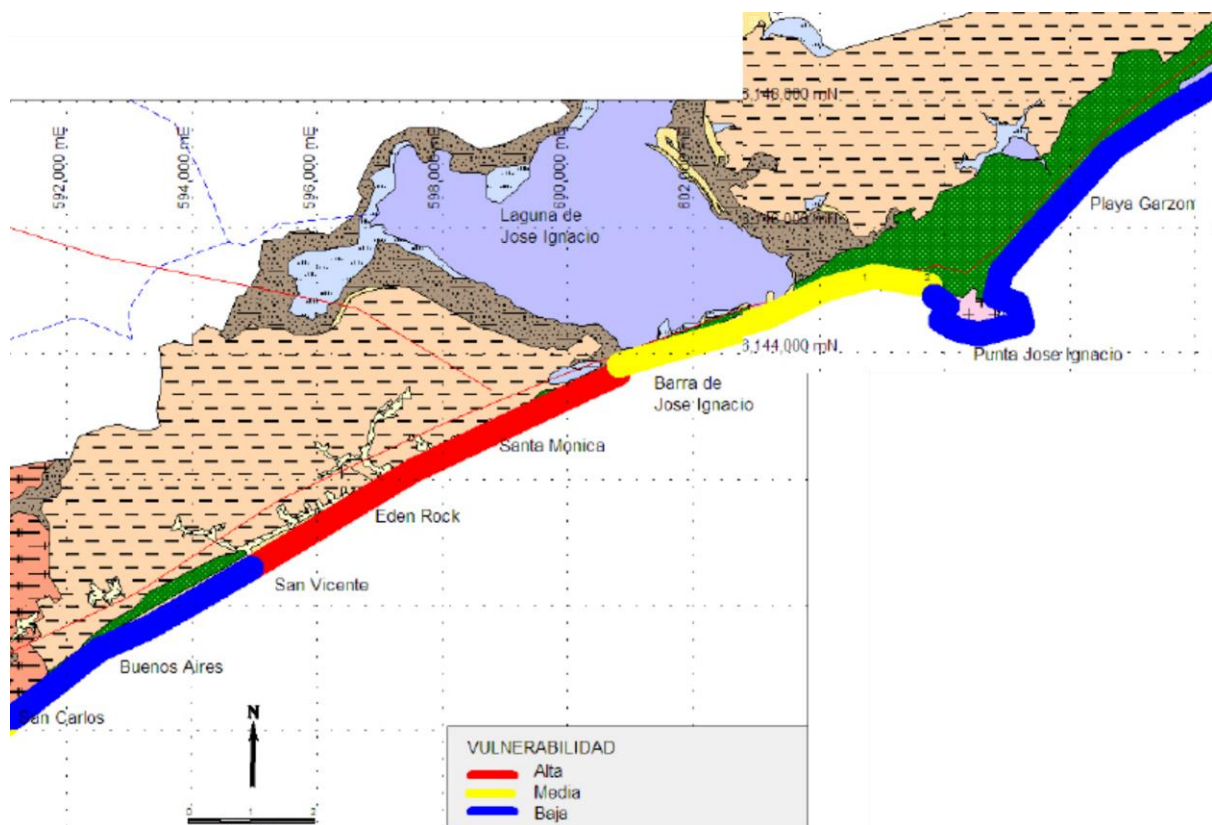


Figura 13. Fragmento del mapa de vulnerabilidad a la erosión a escala 1:50.000 de la zona de estudio. Tomado de: Alves (2011).

4.3 Aspectos ambientales

4.3.1 Arenas negras

Las “arenas negras” son componentes de algunas playas y reciben esa denominación debido a que están constituidos por una relación más alta de lo normal de minerales densos y de colores oscuros tales como: ilmenita, rutilo, circón y monacita. Estos minerales presentan una densidad mayor a 4 g.mL^{-1} por lo que se acumulan en placeres asociados a arenas cuarzo-feldespaticas de mayor tamaño de grano (Ferrando, *et al.* 2003).

Los estudios realizados en nuestro país sobre la temática de arenas negras comienzan con estudios de la Facultad de Ingeniería (Goñi, 1950). Desde entonces en Uruguay se reconocen depósitos de arenas negras en numerosos puntos a lo largo de la costa rioplatense y atlántica, en las localidades de Chuy, Coronilla, Punta Loberos, Angostura, La Paloma, La Pedrera, Aguas Dulces, Atlántida entre otros, las cuales han sido objeto de estudios prospectivos (ANCAP, 1967; DINAMIGE, 2002). Dichas prospecciones se definen como placeres costeros, de edad Holocénica, acumulado en ambientes de playa y mayoritariamente dunas. Con un contenido de minerales densos con tenores promedio del 2,8 % y una asociación mineralógica de la fracción pesada de: Ilmenita (60 %), Circón (5%), Rutilo (1%) y Monacita (0.6 %) confirmándose además la presencia de granate, estauroлита, magnetita, titanita y turmalina para los depósitos de aguas dulces. Demostrando reservas probadas par la zona de Aguas Dulces-Valizas de 933.543 toneladas de minerales (DINAMIGE 2002).

Para la zona de estudio la primera y única referencia de la presencia de dichas arenas en José Ignacio fue hecha por Goñi en 1952.

En los últimos años las arenas negras han tomado interés a nivel mundial en materia de turismo por representar un posible riesgo radiológico debido a su alto contenido en radionucleidos (Veiga, *et al.* 2006; Kaiser, *et al.* 2014; Shuaibu, *et al.* 2017). En este sentido existen trabajos nacionales que abordan estos aspectos en diferentes localidades como los balnearios de Aguas Dulces y Atlántida (Noguera, *et al.* 2013; Curvelo y Nóvoa, 2015; González, *et al.* 2016) cuya dosis efectiva anual máxima

reportada (Atlántida) es de $6,3 \text{ mSv.año}^{-1}$, valor que duplica la dosis efectiva anual promedio mundial de fuentes naturales.

4.3.2 Las fuentes de radiación natural y su registro

Las exposiciones externas a las radiaciones ionizantes surgen en parte de radionucleidos terrestres presentes en niveles traza en todos los suelos. Los niveles específicos están relacionados con los tipos de rocas de las que se originan los suelos. Los niveles más altos de radiación están asociados con las rocas ígneas, como el granito, y los niveles más bajos con las rocas sedimentarias. Sin embargo, hay excepciones, ya que algunas lutitas, las rocas fosfáticas y las arenas negras tienen un contenido relativamente alto de radionucleidos (UNSCEAR, 2000).

La descomposición de los radionucleidos naturales en el suelo produce un campo de radiación gamma-beta en el mismo y cruza a la interfaz aire, para producir exposiciones a los humanos. Los principales factores que determinan la tasa de exposición a un individuo en particular son las concentraciones de radionucleidos en el suelo, el tiempo que se pasa al aire libre y la protección de los materiales. Se han realizado muchos estudios para determinar los niveles de fondo de radionucleidos en los suelos, que a su vez pueden estar relacionados con las tasas de dosis absorbidas en el aire (ICRU, 1994; Saïto y Jacob, 1995). Esto último puede medirse directa y fácilmente, estos resultados proporcionan una evaluación aún más extensa de los niveles de exposición de fondo en diferentes países. Todas las mediciones espectrométricas indican que los tres componentes principales del campo de radiación externa, son los radionúclidos emisores de rayos gamma en las series del ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K (Tabla 2 y 3), que realizan contribuciones aproximadamente iguales a la dosis de radiación gamma incidente externamente a los individuos en situaciones típicas tanto al aire libre y en interiores (UNSCEAR, 2000).

Tabla 2. Características radiactivas del ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K (Ferronsky, 2015).

Elemento	Hijo estable	Vida media (años)	Tipo de desintegración	Abundancia relativa (%)
^{40}K	^{40}Ar	$1,3 \times 10^9$	β (88%)	0,0118
^{232}Th	^{208}Pb	$1,39 \times 10^{10}$	$6\alpha + 4\beta$	100
^{238}U	^{206}Pb	$4,51 \times 10^{10}$	$8\alpha + 6\beta$	99,28

Tabla 3. Tasas de exposición externa media mundial, calculadas a partir de diversas concentraciones de radionucleidos terrestres en el suelo (UNSCEAR, 2000).

Radionúclido	Concentración promedio en suelo ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Coeficiente de dosis ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ por $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Tasa de dosis absorbida en el aire ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$)	
			Valor medio	Ponderado por Población
^{40}K	400	0,0417	17	18
^{232}Th	30	0,604	18	27
^{238}U	35	0,462	16	15
Total			51	60

Un rango típico de variabilidad para las tasas de dosis absorbidas en el aire (DR) es de 10 a 200 $\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$, con los valores medios mundiales oscilando entre 18 y 93 $\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$. Los valores ponderados por población dan una DR promedio al aire libre de la radiación gamma terrestre de 60 $\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$, aunque existen áreas de alto fondo natural que se enumeran en la Tabla 4. Para el caso de las arenas negras puede explicarse en parte el alto fondo por el abundante contenido de minerales de monacita en las arenas de las playas. Los minerales de monacita $[(\text{Ce}_4\text{LaTh})\text{PO}_4]$ son fosfatos de tierras raras, con densidades de 4,8 a 5.5 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ e incorporan cantidades significativas de radionúclidos naturales, especialmente los de las series del Torio y el Uranio (Omar y Hassan, 2002). Está asociado con niveles altos de radiación terrestre, ejemplo Guarapari en Brasil, Yangiang en China, los estados de Kerala y Madras en India y el delta del Nilo en Egipto (UNSCEAR, 2000).

Tabla 4. Áreas de alta radiación de fondo natural (UNSCEAR, 2000).

País	Zona	Características de la zona	Tasa de dosis absorbida en el aire a (nGy.h ⁻¹)
Brasil	Guarapari	Arenas monacíticas	90-170 (calles) 90-90 000 (playas)
	Mineas Gerais	Intrusivos volcánicos	340 promedio
China	China Yangjiang	Partículas de monacita	370 promedio
Egipto	Delta del Nilo	Arenas monacíticas	20-400
Francia	Región central	Área granítica	20-400
	Región Sur oeste	Minerales de uranio	10-10 000
India	Delta del Ganges	Arenas monacíticas	200-4 000

Los radioisótopos ^{238}U y ^{232}Th son emisores Alfa. Para obtener su actividad específica por medio de emisiones gamma se utilizan radioisótopos hijos de su cadena desintegrativa (Figura 14), que emiten energías con altas probabilidades de emisión dentro del rango óptimo de medida para un espectrómetro gamma. Para la cadena desintegrativa del ^{238}U la actividad del ^{226}Ra con las emisiones del ^{214}Pb a 295.2 keV (19,3%) y 351,9 keV (37,6%), ^{214}Bi a 609,3 keV (46,1%); para la cadena desintegrativa del ^{232}Th los hijos: ^{212}Pb a 238.6 keV (43,3%) y ^{208}Tl a 583.1keV (84,5%), y finalmente el ^{40}K se mide por su propio decaimiento a 1460.8 keV (11%).

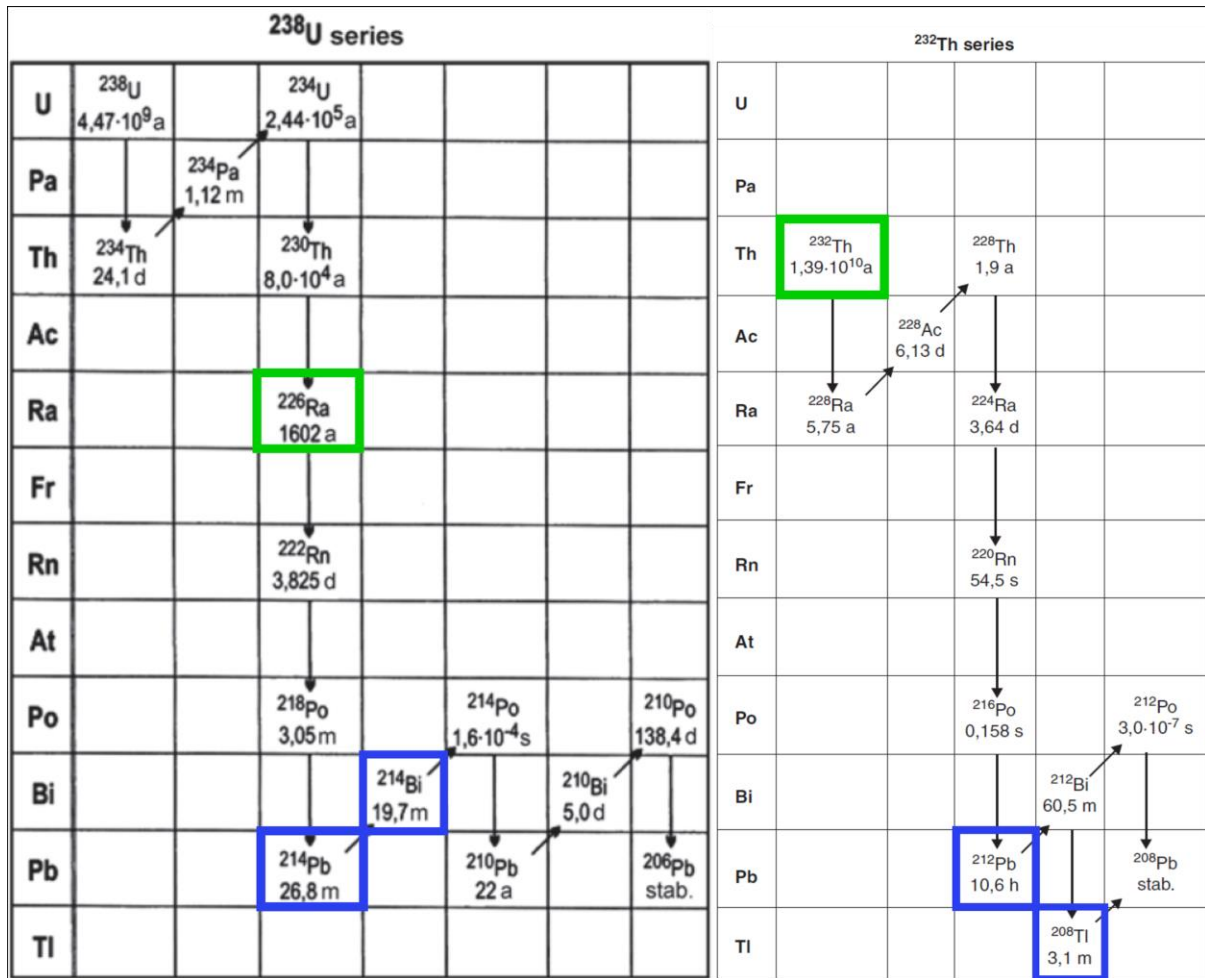


Figura 14. Series desintegrativas del ²³⁸U y el ²³²Th, las flechas en vertical representan desintegración alfa, las flechas en diagonal desintegraciones beta menos y en la parte inferior de cada isótopo está el tiempo de semidesintegración, en verde los isótopos padre y en azul los isótopos hijo que se utilizan para cuantificarlos (modificado de: Ferronsky y Polyakov, 2012).

La espectrometría gamma es una técnica cuali-cuantitativa, multielemental, no destructiva de alta resolución que consiste en la obtención del espectro de las radiaciones gamma, emitidas por los isótopos radiactivos.

El sistema de espectrometría gamma consta de un conjunto de dispositivos especialmente diseñados para la medida de fotones gamma en muestras con bajo nivel de actividad. El principal elemento del sistema de medida es el detector, consistente en un cristal semiconductor de germanio de alta pureza, el cual es enfriado con nitrógeno líquido para minimizar las corrientes de pérdida que se generan a temperatura ambiente, que reducen la resolución energética. El detector está conectado a una fuente de voltaje que se encarga de establecer el campo

eléctrico en el interior del detector y a un amplificador de señal. A su vez está blindado con un revestimiento interior de cobre y uno exterior de plomo que minimiza el fondo radiactivo natural (Figura 15).

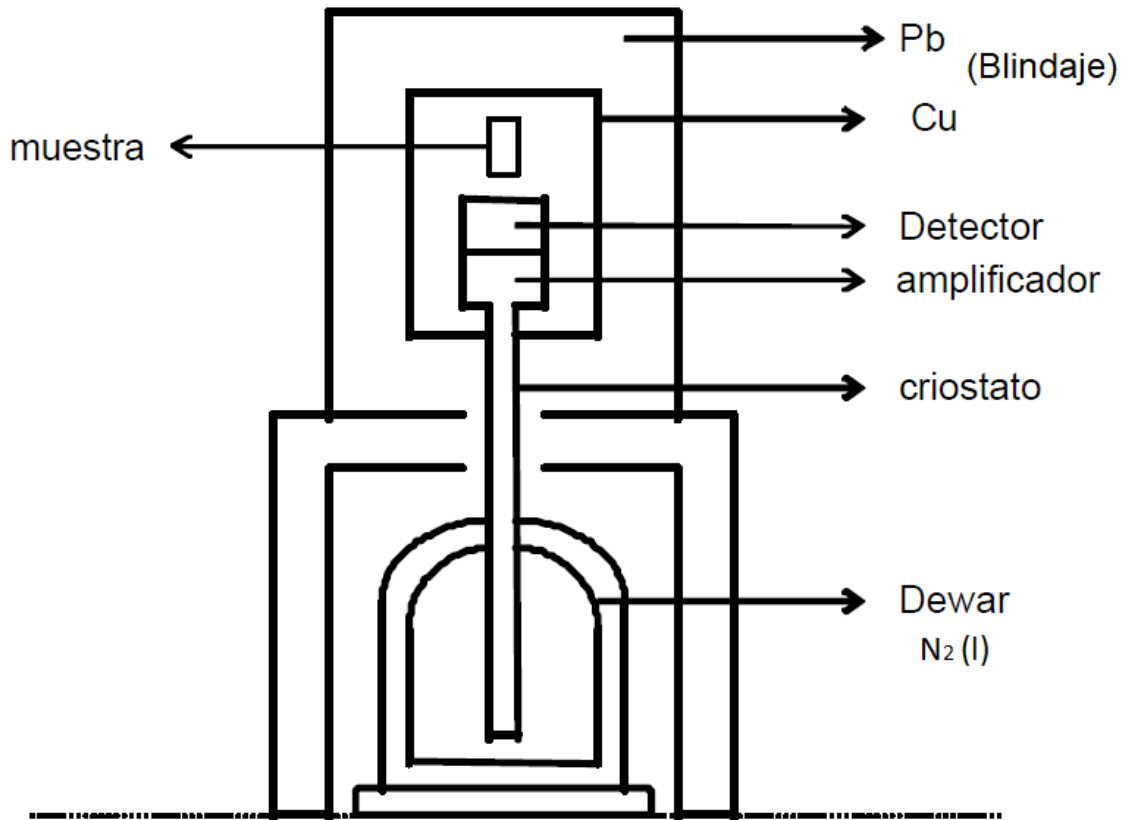


Figura 15. Esquema simplificado de un espectrómetro gamma (modificando de: Barrera, 2008).

La radiación gamma procedente de la muestra interacciona con el detector mediante los procesos característicos de altas energías: efecto fotoeléctrico, Compton o producción de pares (Tassano, 2019). La energía depositada por el fotón se transforma en portadores de carga, que bajo la acción del campo eléctrico generan un pulso de corriente proporcional a dicha energía. Estas señales dependen de la energía (longitud de onda) y del número de fotones gamma a detectar. El sistema de manejo de pulsos es un circuito electrónico que da forma a los pulsos, los cuenta y los clasifica. Por tanto, las señales electrónicas se convierten en un espectro de impulsos. Este espectro de pulsos (Figura 16) representa el número y la distribución de la energía de los fotones gamma (Barrera, *et al.* 2008).

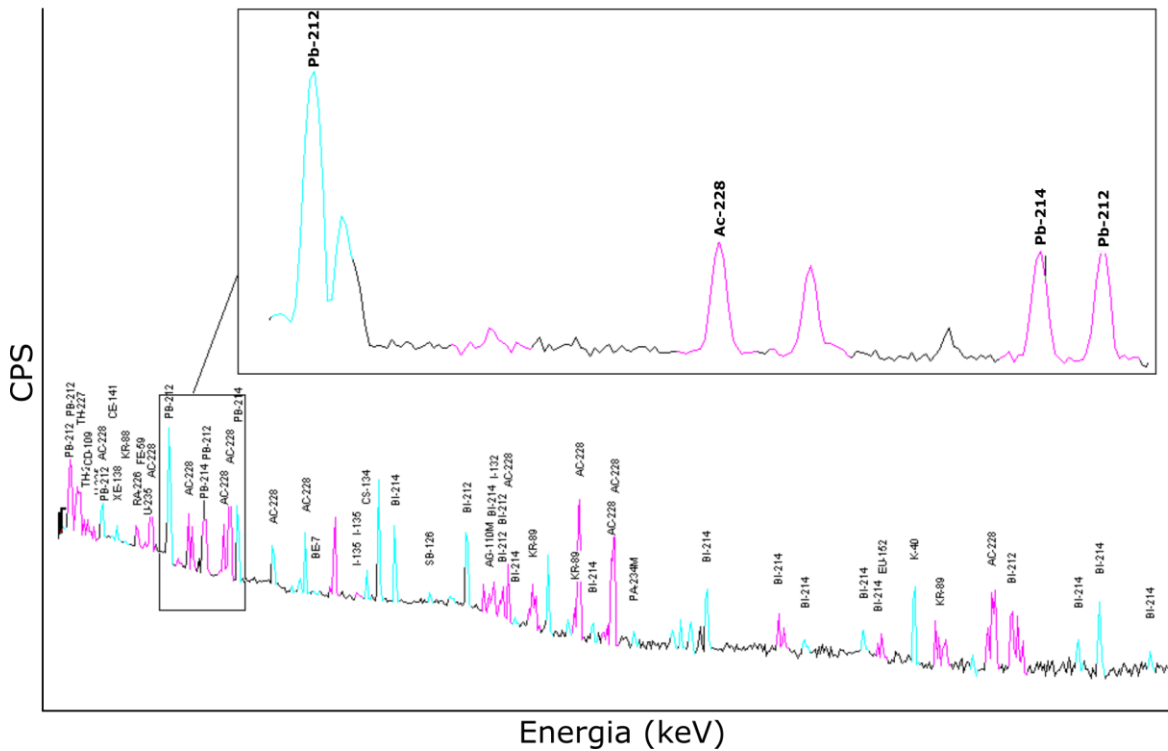


Figura 16. Espectro gamma de una muestra propia de arena negra, (Muestra P7).

La actividad de los radionucleidos se calcula utilizando la siguiente ecuación expresada en $Bq.kg^{-1}$ (Becquerel (Bq) unidad internacional para desintegraciones radiactivas por segundo (cps)).

$$A(Bq.kg^{-1}) = \frac{CPS}{\epsilon \gamma \times P_{\gamma} \times W \times t \times Fat}$$

Donde A es la actividad específica, CPS es el recuento neto de desintegraciones radiactivas por segundo de la muestra experimental, $\epsilon\gamma$ es la eficiencia del pico del detector a la respectiva energía de rayos gamma, P_{γ} probabilidad de emisión gamma correspondiente, W es la masa de la muestra en kilogramos, t es el tiempo de medición y Fat es el factor de atenuación.

La determinación cuantitativa de los radioelementos presentes en las muestras requiere el conocimiento de la eficiencia del sistema (ϵ), que mide la relación entre la tasa de recuento del detector y la tasa de emisión de la muestra, para cada energía gamma. La eficiencia depende de una gran cantidad de factores relacionados con el

fenómeno de la detección de la radiación, como la energía, la composición y geometría de la muestra y del detector, así como su posición relativa. También depende de la presencia de materiales entre ambos, por tanto, se necesita obtener la calibración en eficiencia del sistema muestra-detector; la misma se determina experimentalmente a través de la medida de un patrón que contiene multielementos emisores gamma de actividad conocida (Barrera, *et al.* 2008).

Los factores de conversión para transformar las actividades específicas $A(^{40}\text{K})$, $A(^{226}\text{Ra})$ y $A(^{232}\text{Th})$, en la tasa de dosis absorbida en el aire (a 1 m sobre el suelo) (DR en $\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) se calculan mediante el método de Monte Carlo y los valores son: (UNSCEAR, 2000).

$$\text{DR (nGy}\cdot\text{h}^{-1}) = 0,0417A(^{40}\text{K}) + 0,462A(^{226}\text{Ra}) + 0,604A(^{232}\text{Th}).$$

Para estimar la dosis efectiva anual de la radiación gamma externa (DEAR en $\text{mSv}\cdot\text{año}^{-1}$), se necesita el factor de conversión de la dosis absorbida en el aire a dosis efectiva en el tejido ($0,7 \text{ Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$) y el tiempo de exposición:

$$\text{DEAR mSv}\cdot\text{año}^{-1} = \text{DR nGy}\cdot\text{h}^{-1} \times 8760 \text{ h}\cdot\text{año}^{-1} \times 0,7 \text{ Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$$

4.3.3 Contaminación por hidrocarburos en playas de arena

Uno de los riesgos ambientales más peligrosos y comunes en las zonas marinas y costeras del mundo son los accidentes por derrames de petróleo (Clark, 2001). El petróleo es un líquido natural oleaginoso e inflamable, constituido por una mezcla de hidrocarburos (compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno), que se extrae de formaciones geológicas y del que se obtienen productos utilizables con fines energéticos o industriales, como la gasolina y el queroseno (Gluyas y Swarbrick, 2003).

Para la Federación Internacional de Contaminación de Propietarios de Petroleros (ITOPF) los derrames de hidrocarburos pueden provocar una amplia variedad de impactos en el medio marino a corto y mediano plazo, los cuales pueden resultar graves para el medio ambiente y las personas que habitan cerca de la franja costera contaminada, afectando sus medios de subsistencia y su calidad de vida, a través de uno o más de los siguientes mecanismos:

- Asfixia con efectos en las funciones fisiológicas.
- Toxicidad química que genere efectos letales y subletales o provoque el deterioro de funciones celulares.
- Cambios ecológicos, principalmente la pérdida de organismos clave de una comunidad y la conquista de hábitats por parte de especies oportunistas.
- Efectos indirectos, como por ejemplo la pérdida de hábitat o refugio y la eliminación resultante de especies con importancia ecológica.

La mayoría de los hidrocarburos derramados flotan sobre la superficie del mar y se diseminan sobre amplias zonas por efecto del oleaje, los vientos y las corrientes. La naturaleza y duración de los efectos de un derrame de hidrocarburos dependen de una amplia variedad de factores, que incluyen: la cantidad y el tipo de hidrocarburos derramados, su comportamiento en el medio marino, la velocidad con la que el contaminante se diluya o disipe mediante procesos naturales, la ubicación del derrame en cuanto a las condiciones meteorológicas, la composición biológica del entorno afectado, las técnicas de limpieza idóneas y la eficacia con la que se realicen,

la degradación química y las características físicas como la geomorfología. De esta manera las costas rocosas y arenosas por exposición a los efectos abrasivos de la acción del oleaje y las corrientes mareales implica que sean las más resistentes a los efectos de un derrame, y normalmente permite que la autolimpieza se realice de forma más rápida y natural (puede durar de 1 a 3 años) que en otros ambientes (ITOPF, 2011b).

Identificar un derrame en una zona costera puede parecer fácil ya que el crudo es normalmente un líquido de color negro cuando está fresco. No obstante, sus propiedades cambian a medida que los hidrocarburos se meteorizan con el transcurso del tiempo o al ser mezclados con arena, ya que puede asumir una consistencia no pegajosa, también pueden cubrirse rápidamente con capas adicionales de arena debido a mareas posteriores o al viento. A lo que debemos sumar diversas características y procesos que se producen de forma natural y que pueden confundirse con hidrocarburos como: turba en áreas de marismas, líquenes sobre rocas, algas marinas varadas y materia de origen vegetal, partículas de madera quemada, polvo de carbón y arena negra. (ITOPF, 2011a).

Uno de los métodos químicos de análisis empleados para detectar en forma global una fracción de hidrocarburos en sedimentos es el que hace uso de la fluorescencia (Método básico de iluminación y de extracción por solvente); de esta manera, se puede identificar, sin precisar su composición química u origen (COI-UNESCO 1984, Burns, 1993). El material contaminado se expone a frecuencias de radiación ultravioleta (UV), que excita las moléculas aromáticas en los hidrocarburos a una longitud de onda de 365nm hasta obtener una emisión fluorescente en una gran variedad de colores (amarillo, azul, verde, blanco o marrón). Tiene la capacidad de detectar concentraciones muy bajas de hidrocarburos en agua, normalmente hasta un nivel de $1,0 \mu\text{g.l}^{-1}$ sobre el terreno, $0,1 \mu\text{g.l}^{-1}$ en el laboratorio y $1,0 \text{mg.kg}^{-1}$ en sedimentos siempre que se realice la calibración con la muestra de una fuente conocida (ITOPF, 2011c).

Como se menciona anteriormente en Uruguay el petróleo es importado y es gestionado por ANCAP, la cual tiene su punto de abastecimiento sobre la zona de estudio. En reiteradas ocasiones como consecuencia de derrames de hidrocarburos en el área de influencia de la boya petrolera, ha sido necesaria la remoción de arenas

empetroladas. En dicho escenario, durante estos procedimientos de remediación por extracción de las arenas superficiales de la zona intermareal afectada, se han removido también arenas negras. En determinadas ocasiones las arenas negras pudieron ser afectadas frente a los derrames de hidrocarburos, mientras que en otros escenarios de derrames fueron confundidas por su aspecto y en ocasiones removidas por el Servicio de Playas de la Comuna local.

En cuanto los efectos medioambientales de un derrame de petróleo en playas arenosas existen dos fenómenos que se producen directamente sobre la geomorfología de la playa.

Tipo morfodinámico (Playas reflectivas, intermedias y disipativas)

Una vez llegado un contaminante, las características de las playas reflectivas sirven para una rápida desaparición del hidrocarburo acumulado. La reducida amplitud intermareal determina una limitada superficie de acumulación de contaminantes; la elevada movilidad sedimentaria y el fuerte hidrodinamismo ligado al oleaje y las mareas, generan un flujo continuo de agua superficial e intersticial que “lava” de forma continua los hidrocarburos, tanto en la superficie como en profundidad del sedimento. En playas disipativas la gran amplitud intermareal y la reducida pendiente determinan una superficie que permite la acumulación de grandes cantidades de hidrocarburos. Por contra, la granulometría fina y la menor movilidad sedimentaria ligada a un hidrodinamismo menos turbulento que en playas reflectivas, dará lugar a una menor probabilidad de penetración de hidrocarburos en la columna sedimentaria, si bien, por las mismas razones, los procesos de lavado de los hidrocarburos que hayan quedado sepultados, serán más lentos y prolongados. (Antia, 1993; Bermúdez, *et al.* 2003).

Infiltración de hidrocarburos

Cuando un crudo de petróleo o un producto derivado se derrama sobre el suelo o arena una parte de aquél se esparce, mientras que otra parte penetra en el mismo. La relación entre el esparcimiento y la penetrabilidad depende entre otros factores del tamaño y composición del sedimento, del contenido en agua del mismo y del tipo de crudo derramado. La capacidad de retención es mínima para la arena gruesa, seguida por la arena fina; mientras que la arena media es la que presenta el mayor valor, esta secuencia se cumple también para el volumen retenido y para el volumen infiltrado de

todas las mezclas (Tabla 5). Sin embargo, si la arena tiene retenida agua de mar, tal como sucede en las capas más inferiores de las playas, la capacidad de retención de los hidrocarburos disminuye (Bergueiro, *et al.* 1990).

Tabla 5. Influencia del tipo de arena en la capacidad de retención de crudo de petróleo y derivados (Bergueiro, *et al.* 1990).

Arena (tipo)	volumen arena (cm ³)	Mezcla Hidroc. (cm ³)	Volumen Infiltr. (cm ³)	Volumen Retenido (cm ³)	Capacidad Retención l.cr.m ⁻³ ar
Normal	400	Maya	53.00	111.00	277.50
Media	400	Maya	56.00	118.00	295.00
Gruesa	400	Maya	49.00	91.00	227.50
Normal	400	Zakum	33.50	84.50	211.25
Media	400	Zakum	43.00	86.00	215.00
Gruesa	400	Zakum	28.00	79.50	198.75
Normal	400	Irán P.	49.00	101.00	252.50
Media	400	Irán P.	59.20	110.00	275.00
Gruesa	400	Irán P.	37.30	96.00	240.00
Normal	400	Gas Oil	76.00	101.50	253.75
Media	400	Gas Oil	96.00	105.50	263.75
Gruesa	400	Gas Oil	68.00	74.00	185.00
Normal	400	Super	50.30	63.45	158.63
Media	400	Super	51.30	65.50	163.75
Gruesa	400	Super	49.20	58.60	146.50

5. Resultados

A partir de Punta Piedras comienza una playa rectilínea, de unos 11 km de largo, hasta la Laguna José Ignacio, donde se comienza a cerrar el arco hasta su límite Este por la punta de José Ignacio. El frente de playa se hace más angosto al Este, al igual que la pendiente que disminuye en el mismo sentido. La zona media del arco presenta dos rasgos distintivos, uno es un escarpe de erosión que corta las dunas y el otro es un canal supramareal. En el tramo final del cierre del arco, desde la playa de la Juanita hasta la punta de José Ignacio existen acumulaciones de arenas negras que se pueden encontrar en cualquier subzona de la playa. Paralelo a la playa se presenta un extenso campo de dunas de unos 100 m de ancho y con alturas de hasta 5 m, que reduce su ancho hasta ser truncada en la zona media del arco por barrancas y cárcavas, Finalmente, el campo de dunas continúa y aumenta su superficie hacia el Este, con dunas estabilizadas por la vegetación y/o modificada por la urbanización (Anexo II). Las zonas altas son en general planas con cárcavas de amplitud variable, actualmente vegetadas, que se extienden desde la costa hasta un kilómetro en el territorio. Al NNE se encuentra la laguna costera (*Lagoon*) José Ignacio, que posee una barra que se abre intermitentemente y es rodeada por una planicie baja delimitada por un frente de abrasión (Figura 17, Anexo II).

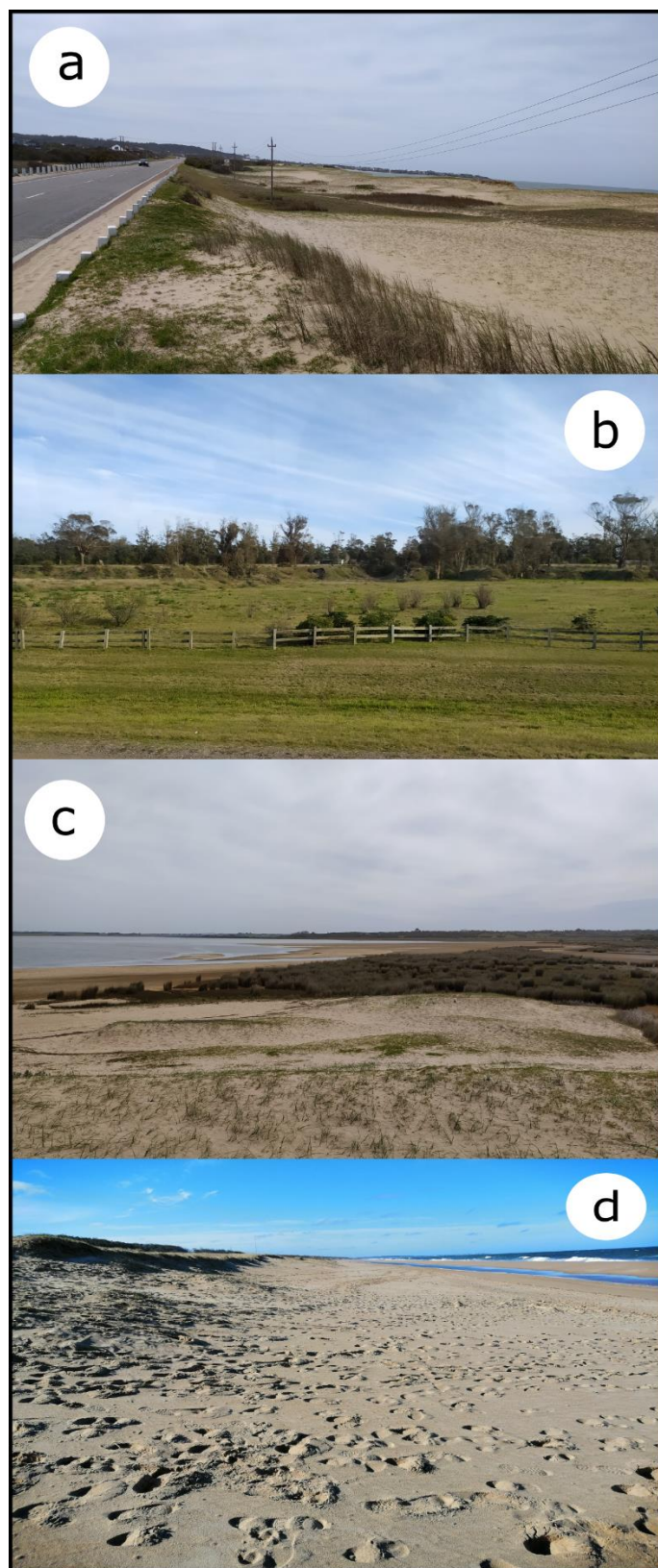


Figura 17. Características geomorfológicas del Arco de playa Punta piedras - José Ignacio. a) Cordón dunar estabilizado por la vegetación y cortado por la ruta 10. b) Cárcavas estabilizadas por la vegetación. c) Laguna José Ignacio y Planicies asociadas. d) A la izquierda el escarpe de erosión, a la derecha el canal supramareal.

El arco es limitado por dos promontorios rocosos: al Oeste el de Punta Piedras y al Este por la punta de José Ignacio. Los afloramientos en Punta Piedras (Figura 18, a y b) cubren unos 250 m de costa y sobresalen unos 100 m desde la misma, presentando colores de alteración naranjas y negro. Están conformados por gneisses de composición granítica, con foliaciones promedio al N285/69 al NE con estiramiento dúctil de cuarzo y feldespatos, feldespatos rotados dextralmente y recristalización de los mismos, además se presentan de forma subordinada migmatitas. La punta rocosa de José Ignacio sobresale dos kilómetros de la orientación general del arco, los afloramientos se extienden por un kilómetro de costa, en forma de bochas (Figura 18, c y d). Están formados por un granito inequigranular porfírico, compuesto por cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasa y biotita automorfa como principal accesorio, los fenocristales son de feldespato alcalino, sub automorfos con macla simple. En el afloramiento se presentan enclaves máficos aislados y es cortado por diques apliticos sub verticales de rumbos generales Norte-Sur.



Figura 18. Límites rocosos del arco Punta Piedras - José Ignacio. a) Gneiss de Punta piedras. b) Bandeo gnésico con feldespatos rotados (Punta Piedras). c) Punta José Ignacio. d) Bochas de granito con enclave (José Ignacio).

Se observaron acumulaciones de arenas negras desde el balneario la Juanita hasta el final de la playa en la punta rocosa de José Ignacio (Figura 19). Las mismas aparecen dispersas desde las dunas hasta la zona de lavado, se pueden encontrar como manchas, sábanas, de forma difuminada, formando tramas entrelazadas en las desembocaduras de cañadas o laminada en perfil (Figura 19). Se encontraron a profundidades de hasta un metro sobre la playa.



Figura 19. Presencia de arenas negras. a) Zona de lavado y berma. b) Perfil en profundidad de la playa. c) Playa distal. d) Desembocadura de cañada. e) Base del escarpe de erosión. f) Dunas.

En el mapa geomorfológico se identificaron: Planicies altas y bajas, dunas estabilizadas, playa, playa con arenas negras, cárcavas y puntas rocosas (Anexo II).

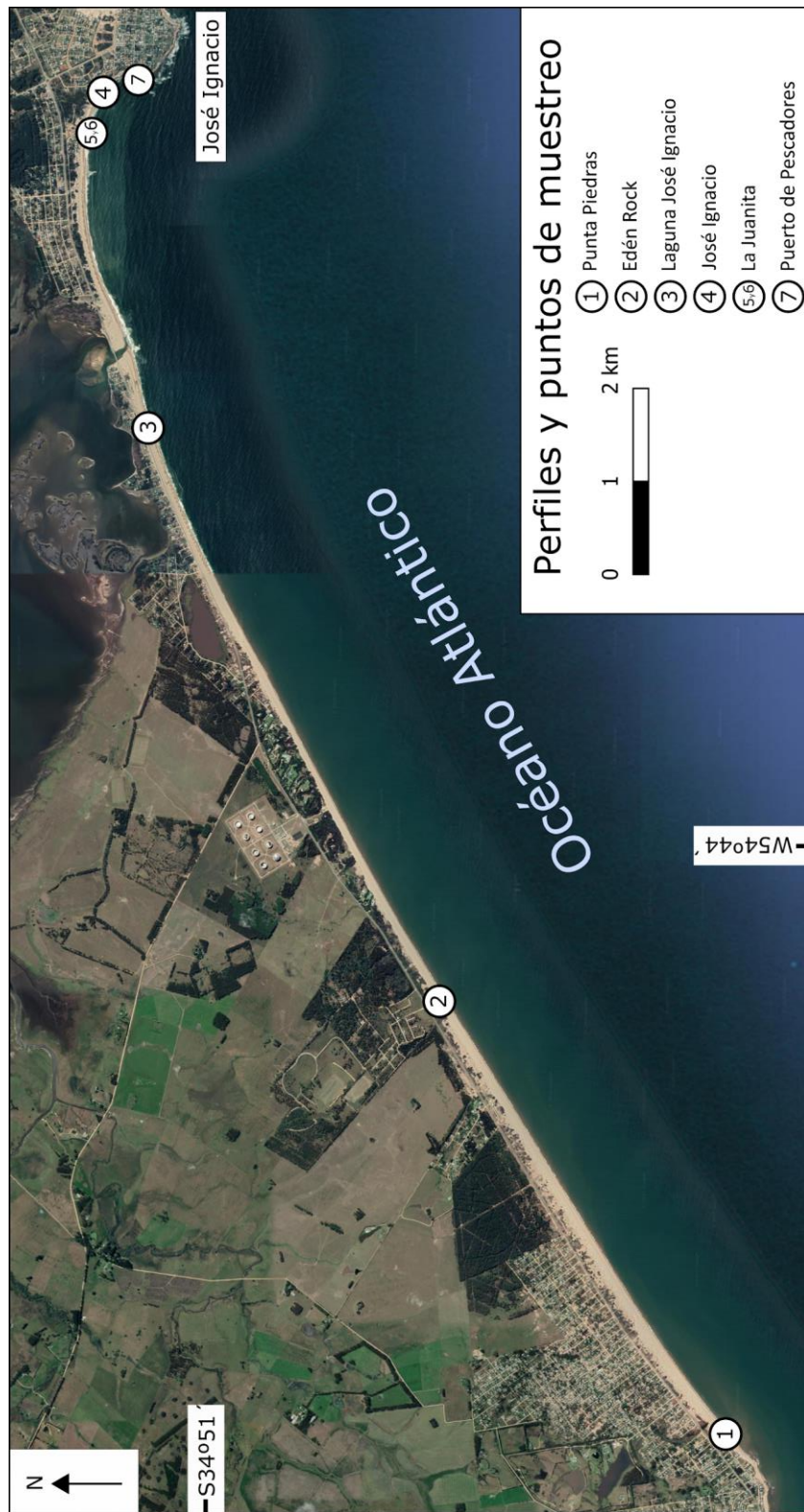


Figura 20. Mapa de puntos de muestreo y perfiles. Imagen satelital Google Earth, 2016.

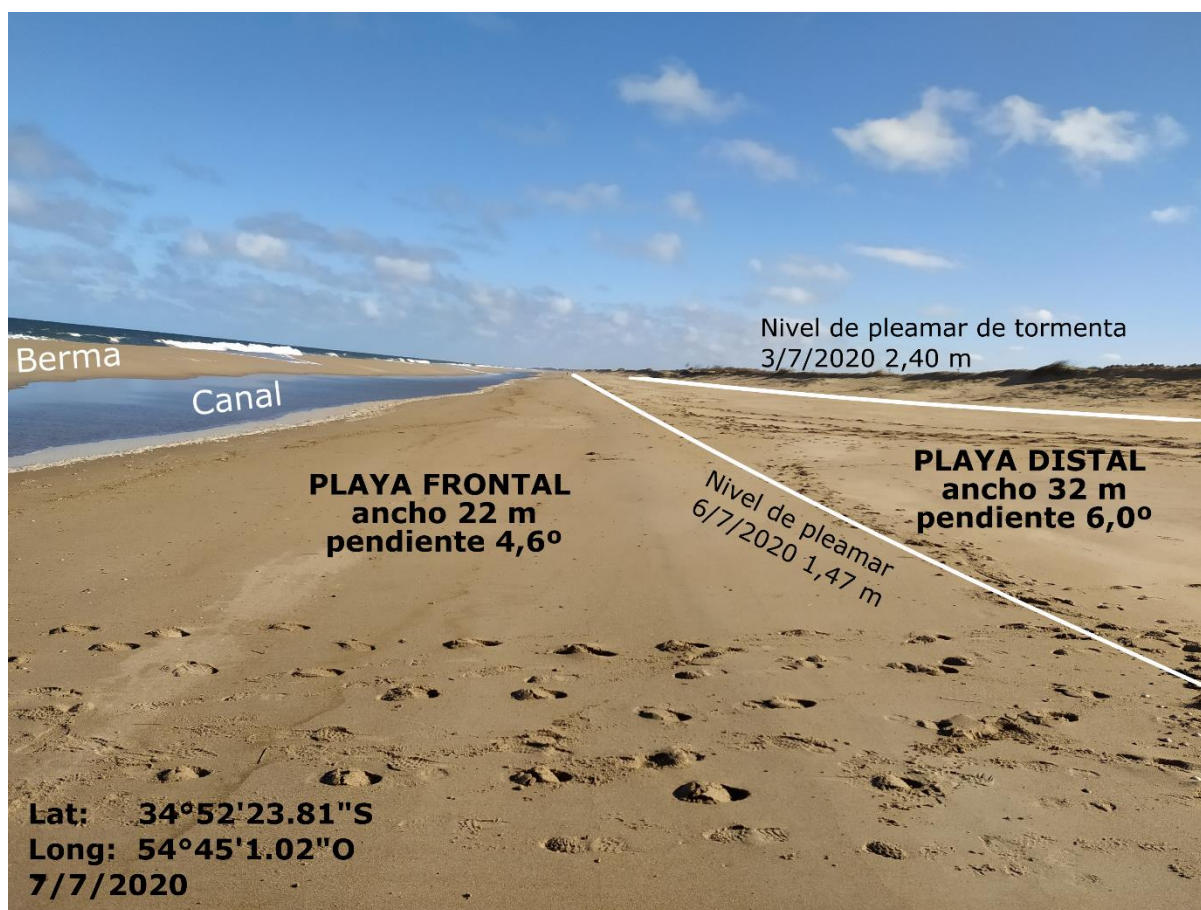


Figura 21. Vista panorámica al Oeste en la playa de Edén Rock.

Las pendientes totales desde la línea de costa hasta la cota superior de la playa distal son 5,3°, 10,8°; 10,0°; y 6,5° para los perfiles 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Presentan bermas estacionales bien definidas, escarpes de erosión que cortan las dunas y un canal supramareal en los perfiles 2 y 3 que se extiende por casi toda la zona rectilínea del arco (Tabla 6).

Tabla 6. Parámetros Morfológicos del arco de playa Punta Piedras - José Ignacio.

Playa	Perfil	Ancho playa distal (m)	Formas	Berma estable	Berma estacional	Canal	Pendiente (°)	Altura de duna (m)	Cota cresta (m)	Cota pie (m)
Punta Piedras	1	8,5	Concava	NO	SI	NO	5,3	1,3	4,9	3,6
Eden Rock	2	32,0	Concava	NO	SI	SI	10,8	2,8	9,3	6,5
Laguna José Ignacio	3	35,0	Concava	SI	SI	SI	10,0	1,7	5,9	4,2
José Ignacio	4	19,0	Plana	NO	SI	NO	6,5	2,2	8,5	6,3

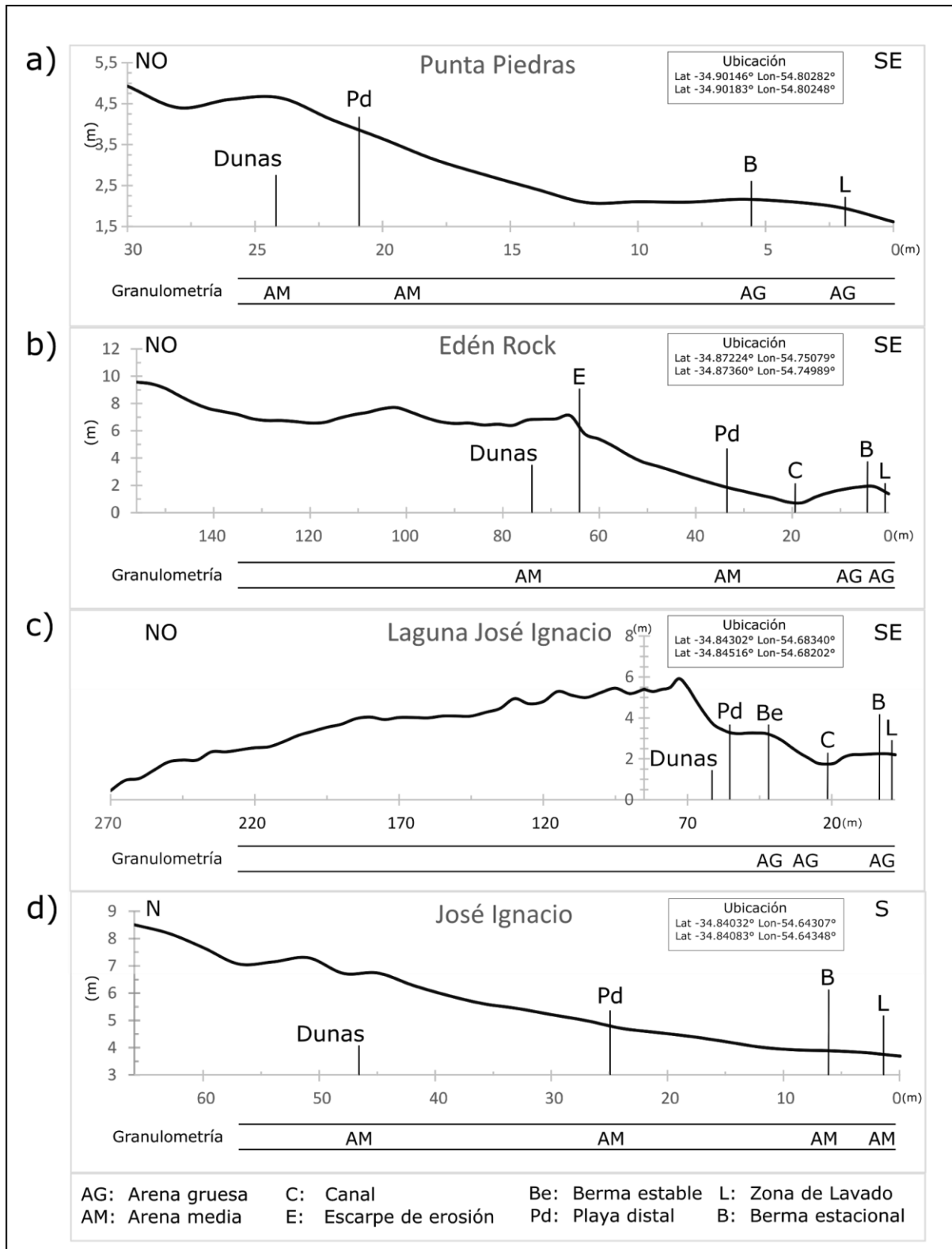


Figura 22. Perfiles de playa (7 de julio de 2020): a) Punta Piedras; b) Edén Rock; c) Laguna José Ignacio (incluye posplaya hasta la laguna); d) José Ignacio.

El análisis granulométrico de las 19 muestras tomadas está expresado en la Tabla 7. Todas las muestras tienen un carácter unimodal con buena a moderadamente buena selección, con asimetrías positivas a levemente negativas, curtosis leptocúrtica a platicúrtica y medias que varían entre 893 y 254 μm .

Tabla 7. Resultado del análisis granulométrico según los parámetros de Folk y Ward (1957).

Localidad	ID	Zona	Moda	Mediana μm	Media μm	Selección σ_1	Asimetría sk_1	Curtosis kg
Punta	P1Lav	Lavado	AG	690	674	1,00	0,08	0,87
Piedras	P1Ber	Berma	AG	882	893	0,77	0,07	0,93
	P1Dis	Playa distal	AM	568	593	0,99	-0,06	0,87
Eden Rock	P1Dun	Dunas	AM	300	284	0,61	0,20	0,82
	P2Lav	Lavado	AG	716	722	0,75	0,001	1,23
	P2Ber	Berma	AG	722	722	0,82	0,02	1,10
	P2Dis	Playa distal	AM	561	572	0,86	-0,10	0,86
Laguna José Ignacio	P2Dun	Dunas	AM	371	382	0,61	-0,09	1,30
	P3Lav	Lavado	AG	722	722	0,54	-0,02	1,33
	P3Ber	Berma	AG	679	679	0,49	0,11	1,19
José Ignacio	P3Dis	Playa distal	AG	665	658	0,49	0,19	1,11
	P3Dun	Dunas	AG	662	632	0,63	0,13	1,27
	P4Lav	Lavado	AM	347	347	0,34	0,04	0,80
La Juanita	P4Ber	Berma	AM	341	341	0,41	0,15	1,06
	P4Dis	Playa distal	AM	327	319	0,49	0,23	1,12
	P4Dun	Dunas	AM	334	334	0,45	0,17	1,12
Puerto de pescadores	P5	Lavado	AM	354	354	0,53	0,00	1,33
	P6	Dunas	AM	267	254	0,71	0,18	0,82
	P7	Playa distal	AM	338	342	0,96	-0,15	1,45

En la Figura 23 se representa gráficamente el comportamiento de los parámetros granulométricos (Mediana, selección, asimetría y curtosis) a lo largo del arco. Las granulometrías más gruesas están asociadas al tramo rectilíneo del arco, y las más finas al cierre del mismo. La selección mejora de Oeste a Este, existe una tendencia general a las granulometrías más finas (asimetría positiva), y una curtosis leptocúrtica en la zona central del arco y platicúrtica hacia sus extremos.

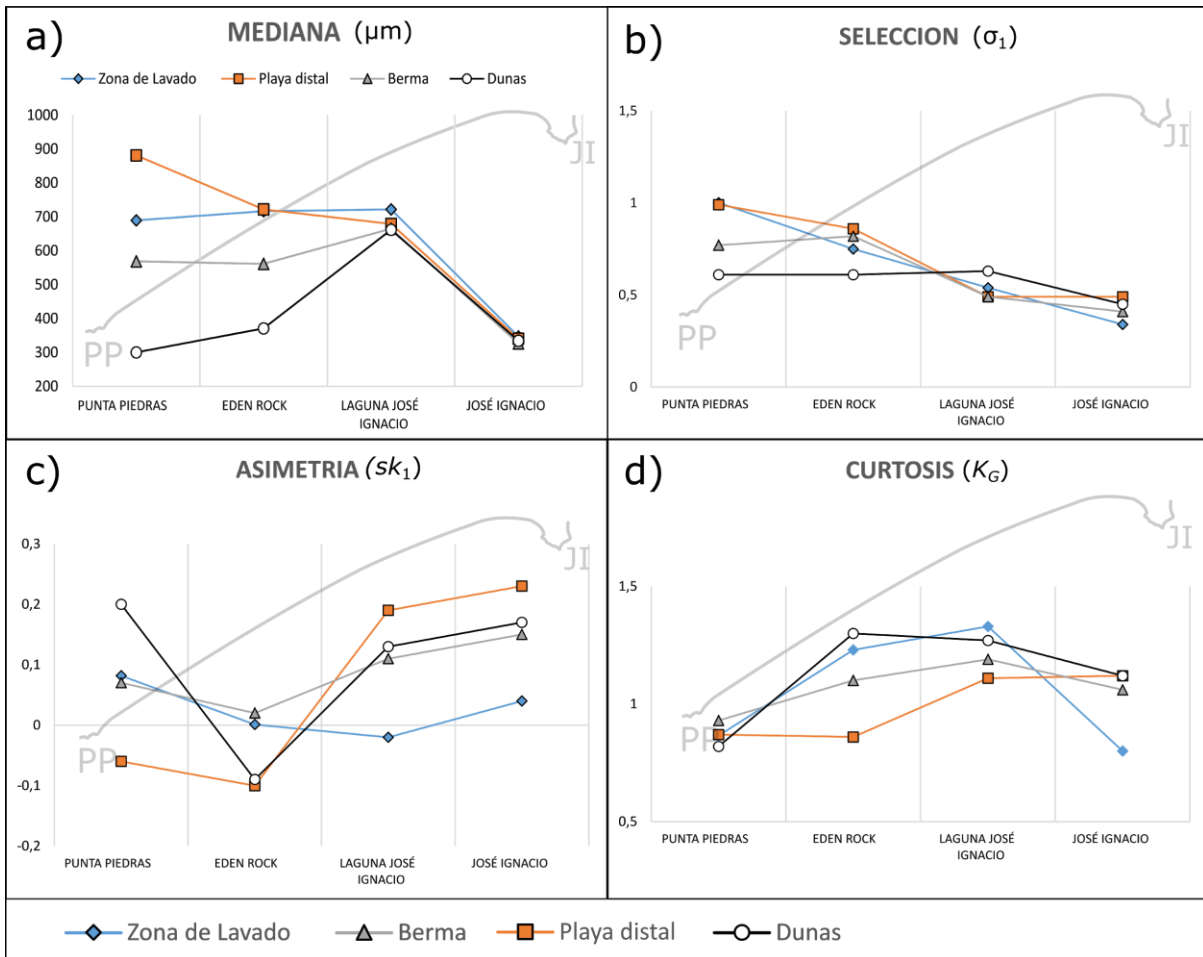


Figura 23. Cambios en los parámetros granulométricos (Folk y Ward, 1957) según la zona de la playa y el lugar de muestreo ordenados de Oeste a Este. a) Mediana. b) Selección. c) Asimetría. d) Curtosis.

Las muestras según la clasificación de Folk *et al.* (1970) son arenas sub arcósicas a excepción de la muestra P7 la cual es una sublitarenita (Tabla 8), los fragmentos líticos son principalmente ígneos y los minerales accesorios dominantes son: Ilmenita, y otros óxidos. El porcentaje de feldspatos disminuye de Oeste a Este (Figura 24), mientras que los porcentajes de cuarzo y fragmentos líticos se mantienen constantes, a excepción de la muestra P7.

Tabla 8. Resultados del estudio de composición, redondez y esfericidad.

ID	Redondez	Esfericidad	Composición (%)		
			Qz	Fd	FL
P1Lav	Redondeado	Media	88	11	1
P1Ber	Redondeado	Media	90	10	-
P1Dis	Redondeado	Media	92	8	-
P1Dun	Redondeado	Media	90	10	-
P2Lav	Redondeado	Media	92	7	1
P2Ber	Redondeado	Media	93	6	1
P2Dis	Redondeado	Media	92	7	1
P2Dun	Redondeado	Buena	89	10	1
P3Lav	Redondeado	Media	94	5	1
P3Ber	Redondeado	Media	92	6	2
P3Dis	Redondeado	Media	93	6	1
P3Dun	Redondeado	Buena	92	7	1
P4Lav	Muy redondeado	Buena	94	5	1
P4Ber	Muy redondeado	Buena	95	4	1
P4Dis	Muy redondeado	Buena	95	4	1
P4Dun	Muy redondeado	Buena	95	4	1
P5	Muy redondeado	Buena	93	5	2
P6	Muy redondeado	Buena	90	7	3
P7	Redondeado	Media	85	5	10

Qz: Cuarzo, Fd: Feldespatos, FL: Fragmentos Liticos

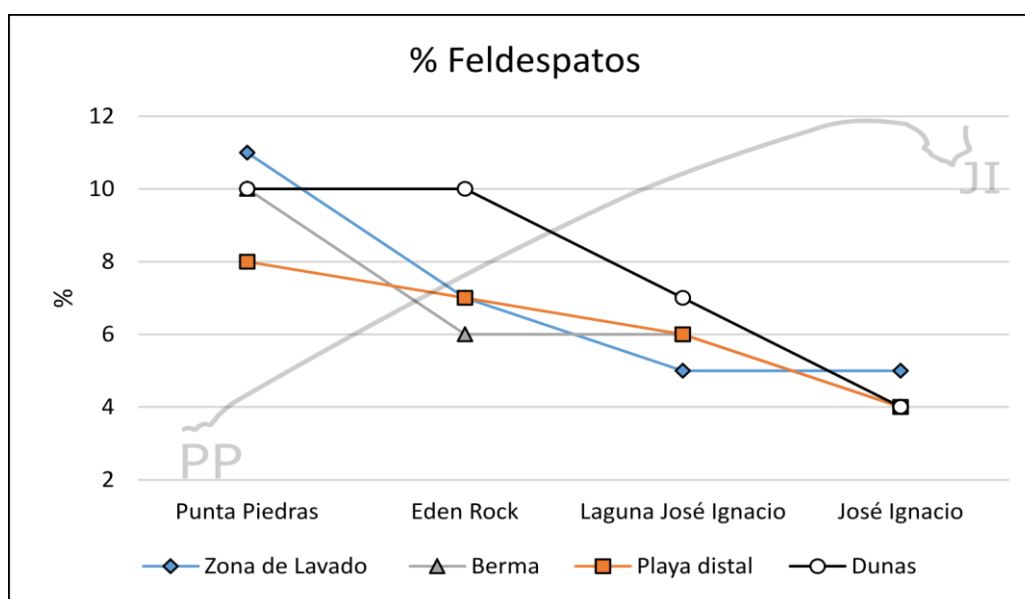


Figura 24. Porcentaje de feldespatos en las muestras según zona de playa y el lugar de muestreo ordenados de Oeste a Este.

Se identificó la presencia de arenas negras en las muestras P4Lav, P4Ber, P4Dis, P4Dun, P5, P6 y P7, los minerales oscuros asociados a este color se encuentran en mayor proporción en la fracción fina y muy fina (Figura 25). Mineralógicamente se trata principalmente de ilmenita y rutilo lo que da a la arena su coloración característica, sin embargo, en la misma fracción de minerales densos se encuentran circón y monacita (Figura 25).

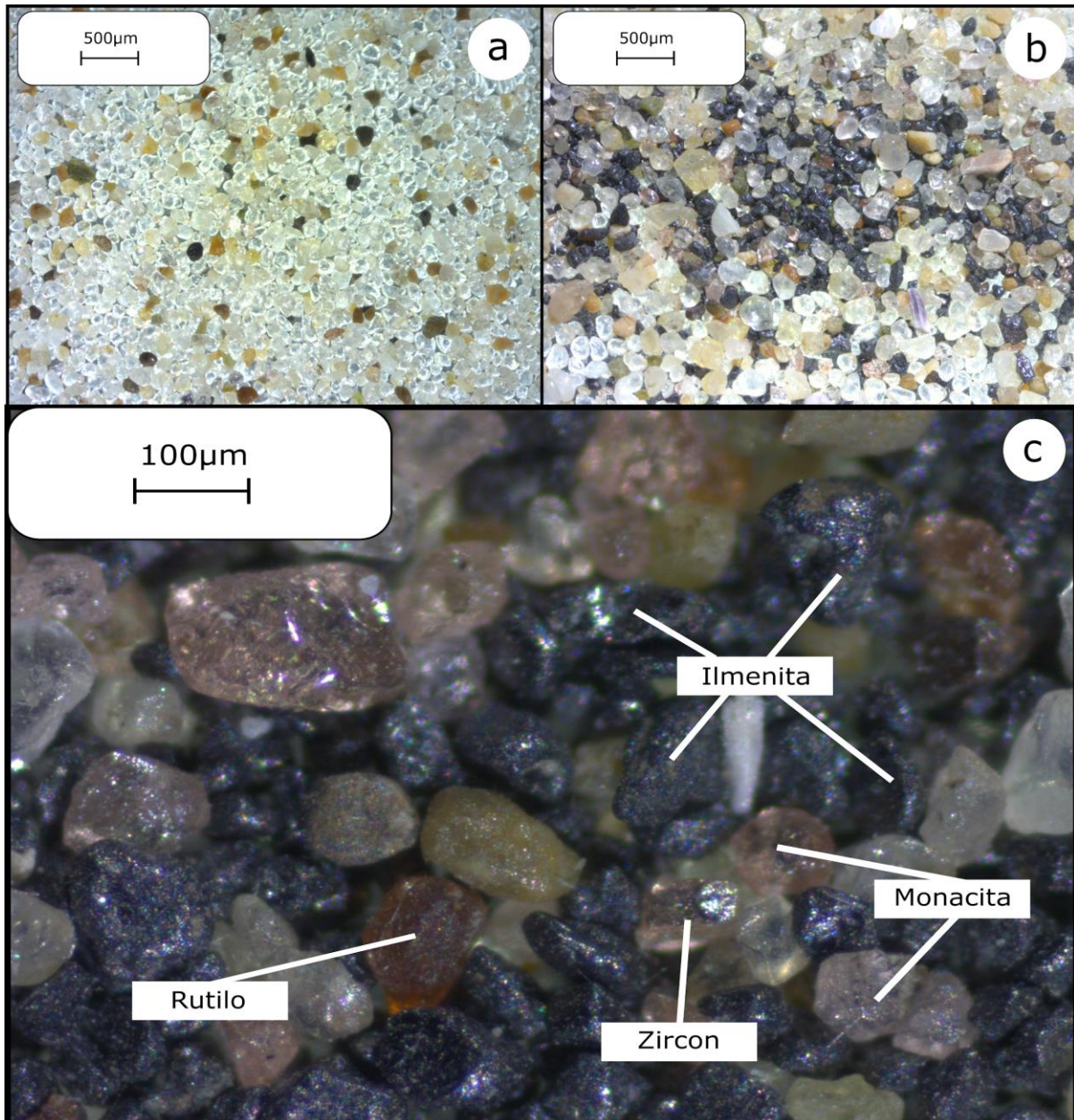


Figura 25. Arenas negras vistas en lupa. a) Muestra P4Lav con baja proporción de minerales oscuros. b) Muestra P7, con alta proporción de minerales oscuros. c) Fracción pesada de una muestra con arena negra.

Se calculó el parámetro de Dean para cada playa donde se tomaron perfiles, utilizando las tablas de Gibss *et al.* (1971) para obtener la velocidad de asentamiento de la partícula (Ws), la altura promedio de las olas (H_b) fue tomada del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) (2020) y el período de las olas (T) fue tomado en campo. Los resultados fueron 0,98; 0,87; 0,90 y 1,35 para Punta Piedras, Edén Rock, Laguna José Ignacio y José Ignacio respectivamente.

En cuanto a la contaminación por petróleo y derivados, tanto en las playas del arco como en las acumulaciones de arenas negras, a nivel de campo no se encontraron indicios de derrames de ninguna índole. De todas formas, se efectuaron análisis de laboratorio a las muestras recogidas, los cuales descartaron dicha contaminación con un nivel de detección de 1/400 partes de petróleo (Anexo I).

Los datos obtenidos por la espectrometría gamma (Tabla 9) muestran actividades del ^{226}Ra y ^{232}Th similares entre las muestras de Punta Piedras, Edén Rock y Laguna José Ignacio, con un leve aumento en las muestras de José Ignacio y un claro aumento en las muestras tomadas directamente en zonas de acumulación de arenas negras (P5, P6 y P7). La actividad del ^{40}K disminuye de Oeste a Este (Figura 26).

Tabla 9. Actividades de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K de las arenas muestreadas, tasas de dosis absorbida en el aire y dosis efectiva anual. En naranja las muestras separadas estadísticamente como “arenas negras”.

ID	Localidad	Concentraciones (Bq.kg^{-1})			DR (nGy.h^{-1})	DEAR (mSv.año^{-1})
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	Tasa de dosis absorbida en el aire	Tasa de dosis efectiva anual
P1Lav	Punta	4,4±0,5	7,4±0,7	956±51	46±4	0,28±0,03
P1Ber	Piedras	4,6±0,8	8±1	1005±63	49±6	0,30±0,04
P1Dis		5,2±0,8	11±1	798±51	42±5	0,26±0,03
P1Dun		4,6±0,6	6,1±0,7	527±31	28±3	0,17±0,02
P2Lav	Eden Rock	4,0±0,6	6,8±0,8	909±51	44±5	0,27±0,03
P2Ber		4,2±0,6	7,0±0,8	914±51	44±5	0,27±0,03
P2Dis		5±1	8,7±1	792±51	41±5	0,25±0,03
P2Dun		4,5±0,6	9,5±1	643±37	35±3	0,21±0,02
P3Lav	Laguna	4,4±0,5	9,4±0,9	702±38	37±3	0,23±0,02
P3Ber	José	4,2±0,8	7±1	738±50	37±5	0,23±0,03
P3Dis	Ignacio	3,9±0,5	6,7±0,7	758±41	37±3	0,23±0,02
P3Dun		4,3±0,5	11±1	591±34	33±3	0,21±0,02
P4Lav	José	6±1	7,2±0,9	176±14	15±2	0,09±0,01
P4Ber	Ignacio	7,2±0,8	17±2	157±11	20±2	0,12±0,01
P4Dis		10±1	23±2	137±7	24±2	0,15±0,01
P4Dun		10±1	27±3	135±11	26±3	0,16±0,02
P5	La Juanita	17±2	82±7	240±16	67±6	0,41±0,04
P6		220±16	1095±86	160±10	770±55	4,7±0,3
P7	Puerto de pescadores	188±16	1011±84	286±26	710±61	4,4±0,4

La DR varía entre 15 y 770 nGy.h^{-1} , la DEAR varía entre 0,09 y 4,7 mSv.año^{-1} , siendo los valores que superan los promedios mundiales las muestras P5, P6 y P7 (Tabla 9).

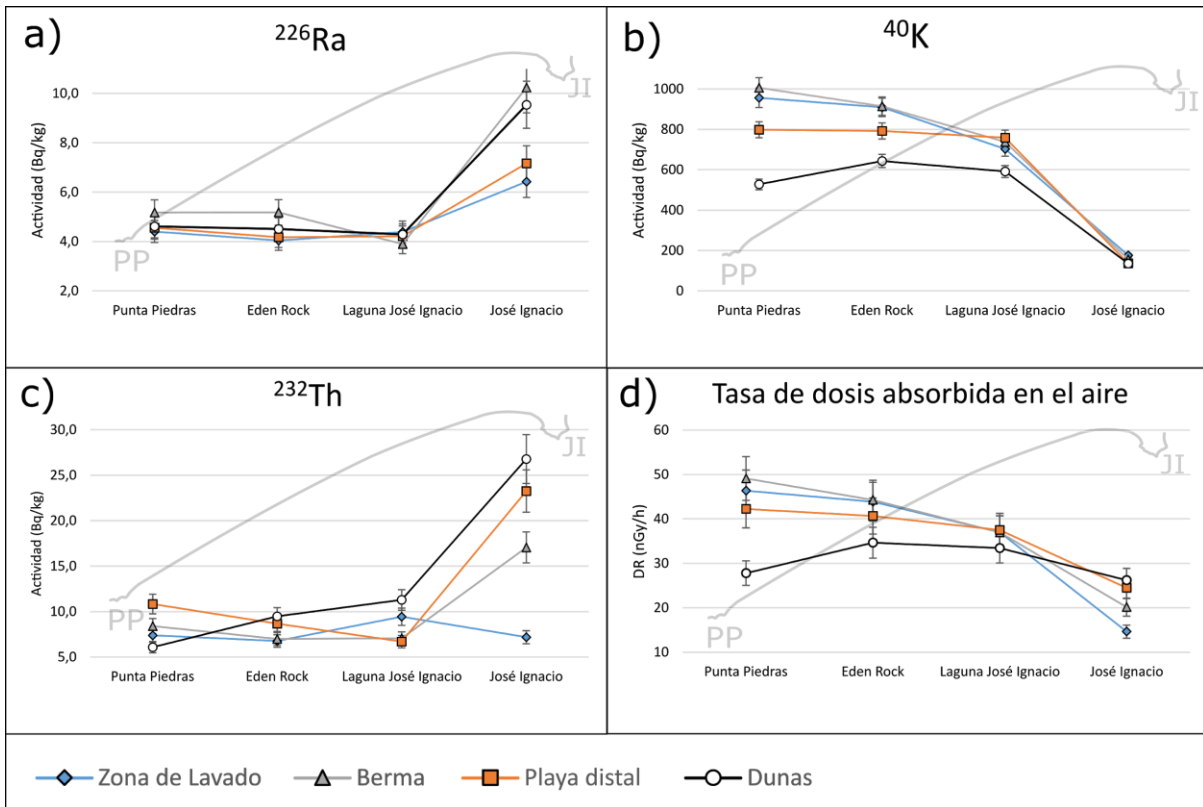


Figura 26. Cambios en las actividades de ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K y el DR según la zona de la playa y el lugar de muestreo ordenados de Oeste a Este. a) Actividad del ^{226}Ra . b) Actividad de ^{40}K . c) Actividad del ^{232}Th . d) Tasa de dosis absorbida en el aire.

En la figura 27 se destaca el comportamiento del porcentaje de feldespatos en las muestras y la actividad del ^{40}K , ambos disminuyen en forma similar de Oeste a Este.

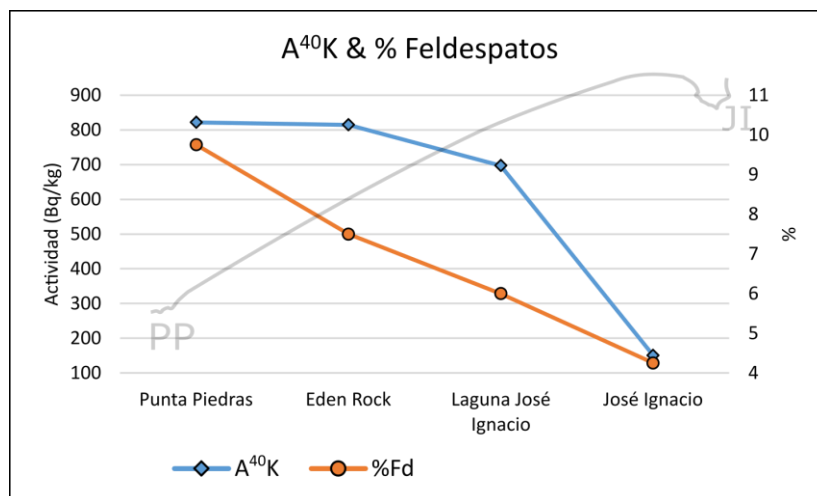


Figura 27. Relación entre los valores promedio para cada transecta de Actividad de ^{40}K (escala a la izquierda) y el porcentaje de feldespatos en la muestra (Escala a la derecha).

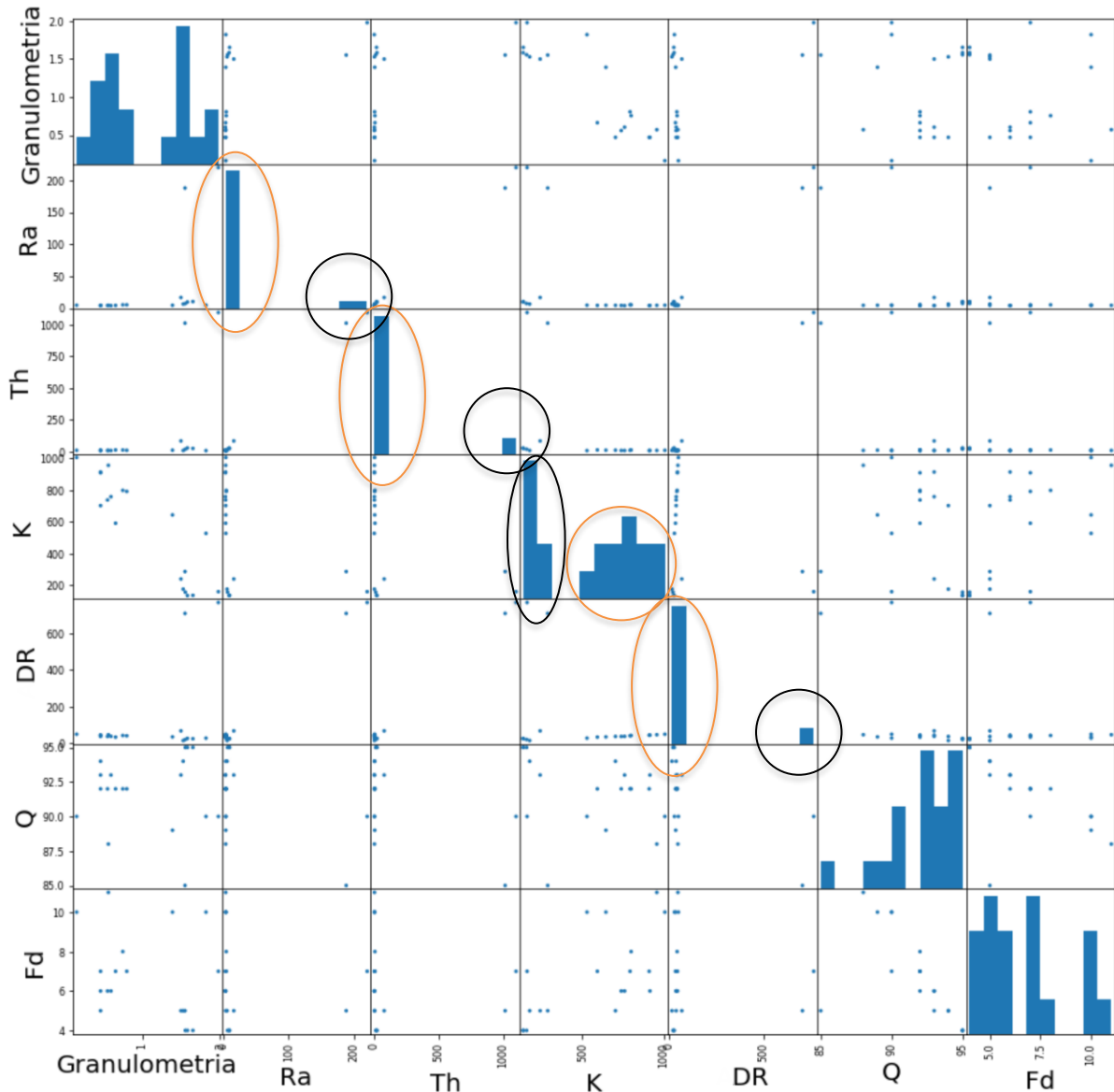


Figura 28. Matriz de dispersión e histogramas de las variables analizadas en las arenas. En base a los histogramas, se pueden observar 2 grupos de datos, correspondiente a la zona de "arenas blancas" (círculos naranjas) por un lado, y de "arenas negras" por otro (círculos negros).

En la matriz de dispersión e histogramas de las variables estudiadas (Figura 28), Se reconocieron dos grupos de datos con comportamientos diferentes, el primer grupo (representado por las muestras P1, P2 y P3) correspondientes a áreas sin presencia de arenas negras, denominado “arenas blancas”. El segundo grupo se relaciona a las áreas con presencia de arenas negras, denominado “arenas negras”. Para cada grupo se analizó la normalidad de los datos con el test de Shapiro Wilk, las variables no normales se intentaron normalizar a través de la transformación Box Cox. La variable %Q del grupo “arenas negras” fue eliminado del grupo de variables (no se

pudo normalizar), para finalmente realizar coeficientes de correlación de Pearson (Tabla 10 y 11). De las correlaciones de Pearson se tomaron únicamente aquellas que fueron p menor a 0,05.

Tabla 10. Coeficiente de correlación de Pearson y valor p para el grupo de datos “arenas blancas”.

En verde se destacan las correlaciones con $p < 0.05$.

Arenas Blancas							
Correlacion de Pearson	Granulometria	Ra	Th	K	DR	Q	Fd
Granulometria	1	-0,981	-0,478	0,092	-0,017	0,283	-0,393
Ra	-0,981	1	0,465	-0,064	0,044	-0,188	0,307
Th	-0,478	0,465	1	-0,225	-0,046	0,103	-0,045
K	0,092	-0,064	-0,225	1	0,983	-0,102	0,102
DR	-0,017	0,044	-0,046	0,983	1	-0,093	0,106
Q	0,283	-0,188	0,103	-0,102	-0,093	1	-0,960
Fd	-0,393	0,307	-0,045	0,102	0,106	-0,960	1
Valor p	Granulometria	Ra	Th	K	DR	Q	Fd
Granulometria		0,000	0,116	0,777	0,958	0,373	0,207
Ra	0,000		0,128	0,843	0,893	0,558	0,332
Th	0,116	0,128		0,482	0,886	0,750	0,889
K	0,777	0,843	0,482		0,000	0,752	0,752
DR	0,958	0,893	0,886	0,000		0,774	0,742
Q	0,373	0,558	0,750	0,752	0,774		0,000
Fd	0,207	0,332	0,889	0,752	0,742	0,000	

Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson y valor p para el grupo de datos “arenas negras”.

En verde se destacan las correlaciones con $p < 0.05$.

Arenas Negras						
Correlacion de Pearson	Granulometria	Ra	Th	K	DR	Fd
Granulometria	1	-0,389	-0,355	0,522	-0,322	-0,143
Ra	-0,389	1	0,983	0,544	0,993	0,676
Th	-0,355	0,983	1	0,534	0,993	0,590
K	0,522	0,544	0,534	1	0,579	0,451
DR	-0,322	0,993	0,993	0,579	1	0,671
Fd	-0,143	0,676	0,590	0,451	0,671	1
Valor p	Granulometria	Ra	Th	K	DR	Fd
Granulometria		0,388	0,434	0,229	0,482	0,759
Ra	0,388		0,000	0,207	0,000	0,096
Th	0,434	0,000		0,217	0,000	0,164
K	0,229	0,207	0,217		0,173	0,310
DR	0,482	0,000	0,000	0,173		0,099
Fd	0,759	0,096	0,164	0,310	0,099	

Tabla 12. Coeficientes de correlación de Pearson ($p < 0.05$) de las variables estudiadas de los grupos de datos: Arenas negras y Arenas blancas.

Arenas Negras			Arenas Blancas		
Variable	Pearson	Valor p	Variable	Pearson	Valor p
DR/ ²³² Th	0,99	0	DR/ ⁴⁰ K	0,98	0
DR/ ²²⁶ Ra	0,99	0	Granulometría/ ²²⁶ Ra	-0,98	0
²³² Th/ ²²⁶ Ra	0,98	0	%Fd/%Q	-0,96	0

6. Discusión

En el presente trabajo se abordan aspectos geomorfológicos como los perfiles de playa, los estudios granulométricos y las acumulaciones de arenas negras que están fuertemente ligados a los cambios estivales, fenómenos climáticos extraordinarios y otros aspectos de la dinámica litoral (Gutiérrez Elorza, 2008). Al existir diferentes tasas de cambio en la geomorfología de esta zona, los resultados obtenidos reflejan un estado de situación a la fecha del muestreo (7 de Julio del 2020), y están sujetos a las modificaciones naturales del entorno.

Se confirman los rasgos geomorfológicos descritos para la zona de estudio (MTOP, 1979; Evia y Gudinas 2000; Lopez, J. 2005; Alves, 2011 y Goso, 2016) y se extienden las descripciones generada en este trabajo. La geología del área se ve claramente expresada sólo en los afloramientos costeros de las puntas rocosas, los sedimentos cuaternarios (Formaciones Villa Soriano, Dolores y Chuy) se ven cubiertos casi en su totalidad por la vegetación a excepción de algunas cárcavas y cortes de camino.

Se abarca una gran superficie en comparación al número de muestras (n) recolectadas y analizadas, las mismas se toman como representativas para este trabajo, sin dejar de tener en cuenta que el n es bajo. El método de muestreo fue elegido en base a las posibilidades, no obstante, se generan vacíos para la evaluación de la contaminación por hidrocarburos y la dosis radioactiva natural, para las cuales

hubiera sido una mejor opción un muestreo sistemático. En este sentido el número de perfiles realizado se consideró como un mínimo aceptable para el estudio del arco, para un estudio más detallado de la zona se considera necesario un mayor número de perfiles y muestras, incluyendo también la desembocadura de la laguna José Ignacio y la zona de cárcavas que no fue posible representar en este trabajo. Otra dificultad fue la modificación antrópica de la playa en los perfiles Punta Piedras y José Ignacio, que acotaron el largo de los perfiles.

El tipo morfodinámico al momento de la observación es reflectivo para las playas Punta Piedras, Eden Rock y Laguna José Ignacio e intermedia para José Ignacio, tanto por las características físicas de las playas como por el cálculo del parámetro de Dean (Short, 1996). Esto puede representar una ventaja ante los eventuales derrames: la reducida zona de afectación, la alta pendiente de la playa y el fuerte hidrodinamismo, favorecen a una limpieza natural más rápida. La capacidad de infiltración y retención de los posibles contaminantes son potencialmente mayores en arenas de granulometría media, por lo que las playas de José Ignacio y alrededores son las que tendrían una mayor capacidad en este sentido, coincidiendo con las zonas de arenas negras. Esta afirmación puede estar sesgada por lo propuesto por Bergueiro, et al. (1990), se deben tener en cuenta la complejidad los factores que pueden incidir en este aspecto como las propiedades del contaminante, el clima, el volumen del derrame, etc.

Las acumulaciones de arenas negras se presentan al Este de la desembocadura de la laguna José Ignacio hasta la punta de José Ignacio. Pueden encontrarse a lo largo de todas las zonas de la playa en diferentes abundancias. La profundidad observada alcanza un metro por debajo de la superficie de la playa, no se descarta que se extienda más de esta profundidad. Estas acumulaciones están sujetas a los cambios propios del sistema litoral, esto significa que las arenas están continuamente en movimiento y cambiando su ubicación en forma local. La composición mineralógica que le aporta su color característico a estas arenas, son la ilmenita y otros óxidos metálicos, estos minerales están presentes en las fracción fina y muy fina de la arena, su abundancia es minoritaria y variable entre un 1 y 10%, el resto es conformado principalmente por cuarzo y feldespatos (Tabla 8).

Si bien la identificación de arena negra puede ser evidente por su color característico, la diferenciación de estas con arenas empetroladas puede no ser fácil. A esto se suma la posibilidad de que las arenas negras se contaminen con petróleo o sus derivados, lo que conforma un escenario particular en la zona de estudio, que debe ser atendido por quienes llevan a cabo las labores de remediación ante un derrame. En este sentido las probabilidades de encontrarse con este escenario aumentan en la zona mapeada como “Playas con arenas negras” (Anexo II). Por otra parte, desde la desembocadura de la laguna José Ignacio al Oeste hasta Punta Piedras no se encontraron acumulaciones de dichas arenas, por lo que no se considera necesaria otras precauciones más que las inherentes a las tareas de limpieza y remediación ante un derrame.

Para la detección de contaminantes hidrocarburíferos se implementó una técnica (Fluoroscopia UV) que solo identifica el contaminante y no lo cuantifica ni lo caracteriza químicamente. La elaboración del mínimo de concentración de petróleo (para el presente trabajo 1/400 partes de petróleo) no está contrastado con un método analítico, pero permite asegurar que no existe contaminación por encima de este límite para las muestras analizadas. Si bien este método sirve como una herramienta económica y simple para una evaluación rápida del estado de situación, se debe tener en cuenta que las propiedades químicas de las que depende, se ven disminuidas con el paso del tiempo y la exposición del material contaminado a las condiciones atmosféricas.

El nivel promedio mundial para la DR según UNSCEAR (2000) es de $60 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$. Esto significa que las zonas donde se tomaron las muestras representan sitios por debajo del fondo radiactivo promedio a excepción de las muestras P5, P6 y P7 que coinciden con las muestras tomadas de acumulaciones de arenas negras (Tabla 9). La diferencia entre los valores mínimos y máximos obtenidos (15 y $770 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) es más de un orden de magnitud, y son comparables a zonas de similares características en otras partes del mundo (Tabla 4). Este cambio abrupto en la dosis está directamente relacionado a las cadenas desintegrativas del ^{238}U y ^{232}Th .

La Comisión Internacional de Protección Radiológica recomienda a la población una exposición no mayor a 1.0 mSv.año^{-1} (ICRP 2007). Si bien las muestras P6 y P7 superan por más de cuatro veces este límite, para que sea efectiva esta dosis se debería estar expuesto directamente durante un año, por lo que es poco probable que sea un riesgo para la población en general, ya que si multiplicamos estas dosis por el factor de ocupación al aire libre (0,2) como lo describe en UNSCEAR (2000), los valores pasan a ser $0,94$ y $0,88 \text{ mSv.año}^{-1}$ que están por debajo de las recomendaciones. Sin embargo, existen casas de veraneo muy próximas a las playas en José Ignacio (Figura 19, a) que presentan arenas negras, esto puede significar una mayor exposición a estas zonas de alto fondo radiactivo natural.

Las diferentes actividades específicas de los radionucleidos estudiados varían a lo largo del arco. La actividad del ^{226}Ra y el ^{232}Th aumenta en las playas de José Ignacio y son hasta un orden de magnitud mayor las muestras de arenas negras, por lo que la concentración de estos radionucleidos puede explicar las zonas de alto fondo radiactivo (Muestras P5, P6 y P7). Los coeficientes de correlación de Pearson si bien se realizaron con una baja cantidad de datos, reflejan comportamientos coherentes con las observaciones, existe alta correlación positiva entre la DR y las actividades de los radionucleidos ^{226}Ra y ^{232}Th (0,99 en ambos casos), en áreas con presencia de arenas negras.

Por otra parte, los datos muestran que la tendencia tanto de la actividad del ^{40}K como la del DR disminuyen de Oeste a Este (Figura 26), sumado a que en las áreas de “Arenas blancas” estas variables tienen un coeficiente de correlación de Pearson de 0,98, se sugiere, que en estas condiciones, la DR está mayormente explicada por la actividad del ^{40}K . El origen más probable del potasio se puede explicar por la presencia del grupo de los feldespatos en la arena (Figura 27), de fórmula general $(\text{K,Na,Ca,Ba,NH}_4)(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$, los feldespatos contienen potasio y por ende sus isótopos.

7. Conclusiones

El arco de playa Punta Piedras - José Ignacio en el departamento de Maldonado es susceptible a derrames de petróleo, debido a su proximidad a las infraestructuras para el transporte y reserva de ese hidrocarburo, desde la boya hasta la costa.

Se presentaron en este trabajo cuatro perfiles de playa realizados en invierno de 2020 y dos mapas geomorfológicos escala 1:50.000 y 1:20.000 de ese arco. En ellos, se muestran también las zonas de acumulación de arenas negras en ese momento, desde la desembocadura de la Laguna José Ignacio y la Punta José Ignacio lo que ha suscitado en ocasiones algunas situaciones confusas. Por ello, este tipo de investigación brinda un conocimiento previo en caso de eventuales derrames, para abordar las tareas de limpieza y remediación, teniendo en cuenta la naturaleza de esta zona y evitar situaciones confusas no deseables.

Se recomienda que en episodios de derrames entre la desembocadura de la laguna José Ignacio y la punta de José Ignacio, se tenga especial atención en la identificación de los derrames. Se recomienda utilizar métodos que permitan discriminar in situ arenas contaminadas de arenas negras, con el fin de provocar el mínimo impacto durante las labores de limpieza.

La playa pudo caracterizarse como reflectiva principalmente e intermedia en el cierre del arco según Short (1996), con playas de arenas medias a gruesas con carácter unimodal de buena a medianamente buena selección, con asimetrías positivas a levemente negativas, curtosis leptocúrtica a platicúrtica, medias granulométricas que varían entre 893 y 254 μm y medianas de 882 a 267 μm . Por su parte, la composición mineralógica predominante de esos depósitos litorales es de tipo subarcósica. Las playas presentan pendientes que oscilan entre 5 y 10° aproximadamente, caracterizadas por tener a lo largo del arco algunos escarpes de erosión, la presencia de un canal supramareal y ser parte de la barra de cierre de la laguna José Ignacio.

No fue constatada contaminación por petróleo o sus derivados en las playas del arco (al mes de julio de 2020). Los últimos derrames accidentales no generaron ningún pasivo ambiental que pudiese ser registrado con la metodología utilizada.

Desde el punto de vista radioambiental en el arco de playa Punta Piedras - José Ignacio existen zonas de alto fondo radiactivo, de 710 y 770 nGy.h⁻¹ asociadas a acumulaciones de arenas negras. Sin embargo, no configuran riesgos radiológicos para la población en general. Se obtuvieron diferentes correlaciones que explican la variabilidad de la DR a lo largo del arco, donde el ⁴⁰K explica la DR en “arenas blancas” y el ²²⁶Ra y ²³²Th en “arenas negras”.

Debido a los cambios morfológicos a corto plazo que se dan naturalmente en este tipo de playas oceánicas, es importante que, para el abordaje en futuras ocasiones de las problemáticas tratadas en este trabajo, se tenga en cuenta los cambios morfodinámicos que pueden afectar el arco tales como: cambios estivales, la apertura intermitente de la laguna José Ignacio o eventos de tormenta. Por estos motivos, es recomendable realizar monitoreos sistemáticos pos-eventos extremos para conocer la respuesta geomorfológica (erosión - sedimentación) en este arco.

8. Bibliografía

- Administración Nacional de Puertos. (2020) Mareógrafo. Uruguay. Recuperado de: <http://mareografo.anp.com.uy>
- Alvarez, A., Blum, A., Gallego, F. (2015). Atlas de cobertura del suelo del Uruguay - Cobertura del suelo y detección de cambios 2000-2011. MVOTMA-DINOT. Montevideo. 52 pp.
- Alves, M. (2011). Aspectos geomorfológicos de la costa atlántica uruguaya. Trabajo de Grado de la Licenciatura en Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de la Republica, Uruguay. 110pp.
- ANCAP (1967) “*Evaluación del yacimiento de arenas negras de Aguas Dulces*” Montevideo. Uruguay.
- Antia, E. (1993). A Morphodynamic Model of Sandy Beach Susceptibility to Tar Pollution and Self-Cleansing on the Nigerian Coast. *Journal of Coastal Research*, 9(4), 1065-1074.
- Barrera, M., Romero, M. L., Valiño, F. (2008). Puesta a Punto de un Sistema de Espectrometría Gamma para la Determinación de Cs-137 en Suelos Españoles. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA. 49pp.
- Basei, M. Peel, E., Sanchez, L., Preciozzi, F., Nutman, A. (2011) .The basement of the Punta del Este Terrane (Uruguay): an African Mesoproterozoic fragment at the eastern border of the South American Río de La Plata cratón. *International Journal of Earth Sciences* April 2011, Volume 100, Issue 2, pp 289-304
- Benitez, Y. (2016). Caracterización mineralógica de tres playas de la costa atlántica uruguaya. Práctica Profesional Supervisada. Universidad Nacional de Córdoba. 32pp
- Bergueiro, J., Dominguez, F. y Morales, N. (1990). Conducta de algunos crudos y derivados del petróleo derramados en arena de playa de baleares. *Boll. Soco Hist. Nat. Balears*, 33, 279-286.
- Bermúdez, J., Lastra, M., Sánchez-Mata, A., Gallego, Ml. (2003). Efecto de vertidos de hidrocarburos sobre los fondos blandos: intermareales y submareales. En: El impacto del Prestige: análisis y evaluación de los daños causados por el accidente del Prestige y dispositivos para la regeneración medioambiental y recuperación económica de Galicia, Fundación Barrié. Instituto de Estudios Económicos de Galicia. Pp 113-136

- Bird, E. (2000). *Coastal Geomorphology. An Introduction*. Jhon Wiley (ed). Chicester, 322 pp.
- Buchtela, K. (2005). Radiochemical Methods, Gamma-Ray *Spectrometry*, *Encyclopedia of Analytical Science*, Elsevier, Pp 72-79.
- Burns, K.A. (1993). Hydrocarbon Chemistry. En Keller, B.D., and J.B.C. Jackson, eds. 1993. Long-term assessment of the oil spill at Bahía Las Minas, Panama, synthesis report, Volumen II: technical report. OCS Study MMS 93-0048. U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of México OCS Region, New Orleans. 1017 pp.
- Clark, R.B. (2001). *Marine Pollution*. Quinta edición. Oxford University Press. p. 64 – 97.
- COI-UNESCO, Comisión Oceanográfica Intergubernamental (1984) Manual para el seguimiento del petróleo y los hidrocarburos de petróleo disueltos / dispersos en aguas marinas y playas. París, Francia, UNESCO, 35pp.
- Colligan, TH y LaManna, JM (1993), Uso de luz ultravioleta para investigar suelos contaminados con petróleo. *Remediación*, 3: 193-201.
- Curvelo, A., Novoa, S. (2015). Caracterización mineralógica – geoquímica de la fracción pesada de las arenas negras de “El Águila”, Canelones. En: Expo Cierre, CSIC, Montevideo.
- Dean RG. (1977). *Equilibrium beach profile: US Atlantic and Gulf Coasts*, *Department of Civil Engineering*. Ocean Engineering Rep. No. 12. University of Delaware, Newark.
- DINAMIGE. (2002). Estudio geológico minero del depósito de arenas negras de Aguas Dulces, Departamento de Rocha. Dirección Nacional de Minería y Geología, división geología, Uruguay, Setiembre de 2002: 3-39
- Dirección General de Catastro (19 de Febrero de 2021). Visualizador Geocatastro. Ministerio de Economía y Finanzas. Recuperado de: <http://visor.catastro.gub.uy/>
- El Observador (27 de diciembre de 2018) Boya petrolera de José Ignacio perdió 5.800 litros y afectó a cuatro animales. El Observador. Recuperado de: <https://www.elobservador.com.uy/>
- El País (03 Febrero 2019). Derrame de crudo en la boya petrolera de José Ignacio ya fue controlado, según ANCAP. El País. Recuperado de: <https://www.elpais.com.uy/>

- El País (20 Abril 2020). Prefectura trabajó en derrame de hidrocarburo en boya de José Ignacio. El País. Recuperado de: <https://www.elpais.com.uy/>
- Evia, G.; Gudynas, E. (2000). Ecología del paisaje en Uruguay: aportes para la conservación de la diversidad biológica. AECI-MVOTMA. Sevilla, España. 173 pp.
- Ferrando L, Bossi J, Maldonado S, Schipilov A y Campal N. (2003). Evaluación de reservas de arenas negras en Aguas Dulces, Departamento de Rocha, Uruguay. *Revista Uruguaya de Geología*, 10: 15-28
- Ferronsky, V y Polyakov, V.A. (2012). Isotopes of the Earth's Hydrosphere. Springer, Países Bajos. 630pp.
- Ferronsky, V. (2015). Nuclear geophysics: Applications in hydrology, hydrogeology, engineering geology, agriculture and environmental science. Springer. 522pp.
- Flor, G. (2004). Geología Marina. Servitec, Área de Estratigrafía y Sedimentología Departamento de Geología Universidad de Oviedo, España. 617pp.
- Folk, R.L. y Ward, W.C. (1957) Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Folk, R.L., Andrews, P.B., y Lewis, D.W. (1970) Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use Chubut, Argentina. *Actas X Congreso Geológico Argentino* (Tucumán) 1, 75–78.
- Gibbs, R., Matthews, M., Link, D. (1971). The relationship between sphere size and settling velocity. *Journal of Sedimentary Petrology*. 41, 7-18.
- G.I.O.C., Grupo de Oceanografía y de Costas (1998). Documento temático de cota de inundación, Universidad de Cantabria.
- Gluyas, J. y Swarbrick, R. (2003). Petroleum Geoscience. Oxford: Blackwell Publishing. 359 págs
- Gomez Pivel, A. (2006). Geomorfología y procesos erosivos en la costa atlántica uruguaya. En: MENAFRA, RODRIGUEZ-GALLEGO, SCARABINO (Eds.) Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya. Montevideo, Uruguay, 657 pp.
- González, J., Joaquin Irigoyen, J. Mirel Cabrera, M., Tassano, M. (2016). Determinación de tasas de dosis radioactivas naturales por espectrometría gamma a partir de ²³⁸U, ²³²Th y ⁴⁰K en arenas negras de playas de Villa Argentina (Canelones) Uruguay. En: Expo Cierre, CSIC, Montevideo.

- Goñi, J. C. (1950). Arenas negras ilmenítico – monacíticas del Uruguay. Boletín de la Facultad de Ingeniería 4(1): 103-110.
- Goñi, J. C. (1952). Arenas negras ilmenítico – monacíticas del litoral sur – uruguayo. Revista de la Facultad de Ingeniería: 209-236.
- Goso, C., Piñeiro, G., Ugalde, R. y Olivera, A. (2016). Mapas geomorfológicos y geológicos a escala 1:50.000 de la costa uruguaya, memoria descriptiva y síntesis geológica. Proyecto MVOTMA (DINAMA - UdelaR). Estudio de la vulnerabilidad a la erosión costera y sedimentación dunar en la costa platense y atlántica. 162 pp. (informe inédito).
- Goso Aguilar, C., Mesa, V., Álvarez, M.C., (2011), Sinopsis geológico-ambiental de la costa platense y atlántica de Uruguay, en López R., Marcomini, S. (eds.), *Problemáticas de los ambientes costeros sur de Brasil, Uruguay y Argentina*. Buenos Aires, Argentina, Ed. Croquis, 59-78.
- Goso Aguilar, C y Muzio, R. (2006). Geología de la costa uruguaya y sus recursos minerales asociados. Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, pp. 9-19.
- Goso H. (1972) Cuaternario. Programa de Estudio y levantamiento de Suelos. Dirección de Suelos y Fertilizantes – MGA. Montevideo. 12 pp.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008), Geomorfología. Pearson/Prentice Hall, Madrid, pp 898.
- ICRP. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- IDEuy. (2020). Visualizador. Infraestructura de datos espaciales. Uruguay. Recuperado de: https://visualizador.ide.uy/ideuy/core/load_public_project/ideuy/
- Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET). (10 de noviembre del 2020) Recuperado de: <https://www.inumet.gub.uy/>
- International Commission on Radiation Units and Measurements. (1994). Gamma-ray spectrometry in the Environment. ICRU Report 53.
- ITOPF. (2011a). Reconocimiento de hidrocarburos en las costas. Recuperado de <https://www.itopf.org/>
- ITOPF. (2011b). Efectos de la contaminación por hidrocarburos en el medio marino. Recuperado de <https://www.itopf.org/>

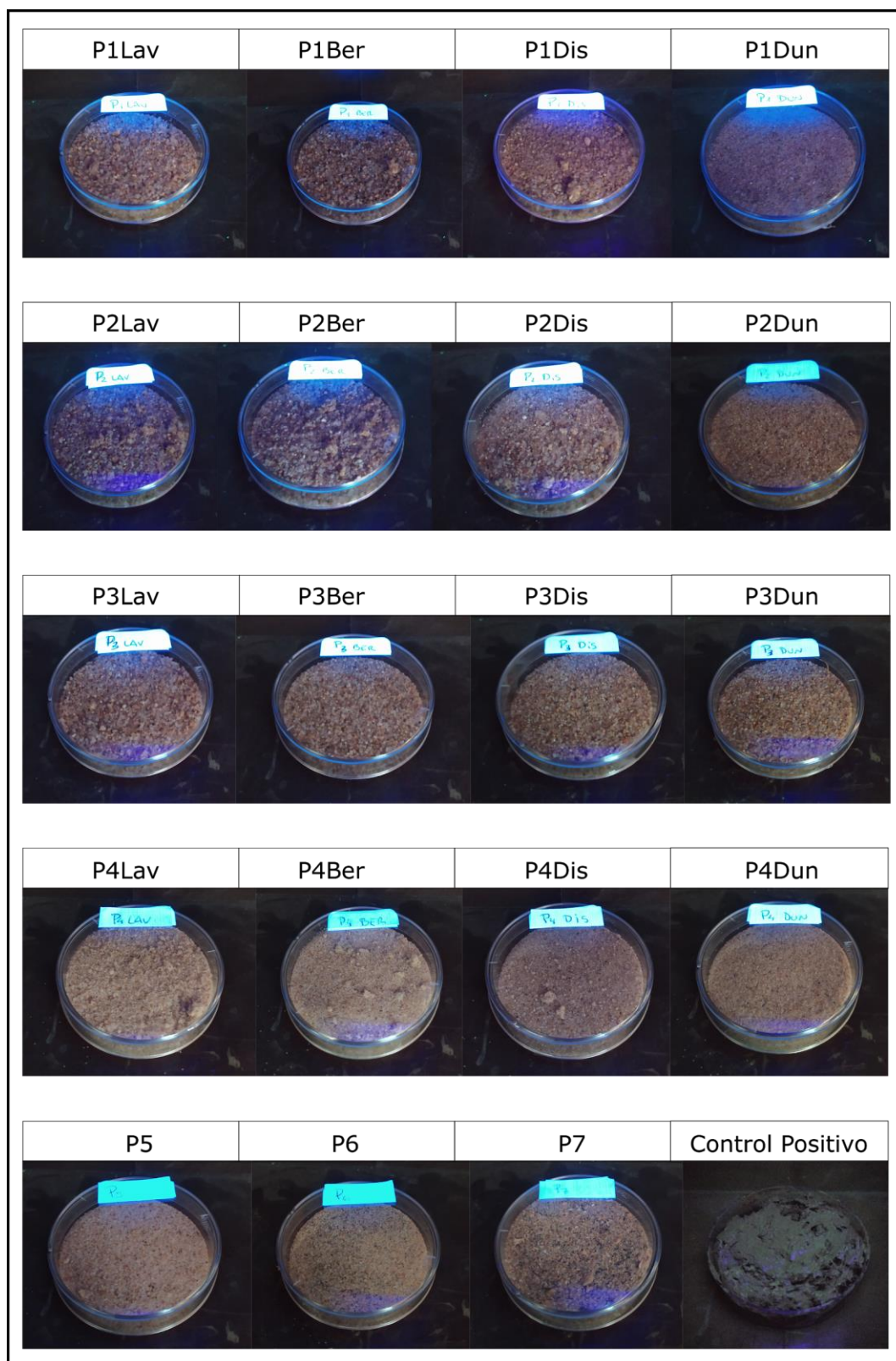
- ITOPF. (2011c). Muestreo y seguimiento de derrames de hidrocarburos marinos. Recuperado de <https://www.itopf.org/>
- Kaiser, M y Aziz, A y Ghieth, B. (2014). Environmental hazards and distribution of radioactive black sand along the Rosetta coastal zone in Egypt using airborne spectrometric and remote sensing data. *Journal of environmental radioactivity*. 137C. 71-78.
- Lara, P; Oyhantçabal, P; Belousova, E. (2020). Two distinct crustal sources for Late Neoproterozoic granitic magmatism across the Sierra Ballena Shear Zone, Dom Feliciano Belt, Uruguay: Whole-rock geochemistry, zircon geochronology and Sr-Nd-Hf isotope evidence, *Precambrian Research*, Volume 341,105625
- Lercari, D. y Defeo, O. (2006). Large-scale diversity and abundance trends in sandy beach macrofauna along full gradients of salinity and morphodynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 68. 27-35.
- Lenz C.; Fernandes L.A.D.; McNaughton N.J.; Porcher C.; Masquelin H. (2011). U-Pb SHRIMP ages fo the Cerro Bori Orthogneisses, Dom Feliciano Belt in Uruguay: Evidences of a ~800 Ma magmatic and ~650 Ma. metamorphic event. *Precambrian Research* 185, 149-163.
- Levine. E, Loughlin, T; Mearns, A. (1997) Asistencia de emergencia para la evaluación y mitigación del impacto ambiental ocasionado por el derrame de petróleo del buque San Jorge ocurrido el día 8 de febrero de 1997. Uruguay. PNUD.
- López Laborde, J. (2005). Caracterización y Diagnóstico del Litoral Costero sobre el Río de la Plata y el Océano Atlántico (Nueva Palmira a Chuy). Universidad de Mar del Plata. Informe técnico Freplata. 97pp.
- Lopez Laborde, Perdomo, A., Gomez, M. (2000). Diagnóstico Ambiental y Socio-Demográfico de la Zona Costera Uruguaya del Rio de la Plata: Compendio de los principales resultados. EcoPlata, Montevideo, Uruguay. 180pp.
- Martínez S.; Ubilla, M. (2004). El Cuaternario en el Uruguay Cap. Del Libro Cuencas Sedimentarias de Uruguay Cenozoico pag.195 a 227 D.I.R.A.C. UDELAR- Facultad de Ciencias. Mvdeo- Uruguay.
- Martínez, S.; Ubilla, M. (2016). Geology and Paleontology of the Quaternary of Uruguay. 10.1007/978-3-319-29303-5.
- Masquelin, H. (2002). A evoluç, ão estrutural e metamórfica do Terreno Punta del Este-Sudoeste Uruguai. Tese de doutorado. Instituto de Geociências-UFRGS, 350 pp.

- MGAP. (2018). Descripción de grupos de suelos CONEAT. Montevideo. 62pp
- Ministerio de turismo. (2018). Anuario estadístico de turismo 2018. Recuperado de: <https://www.gub.uy/ministerio-turismo/politicas-y-gestion/anuarios-estadisticos>
- MTOP – PNUD. (1979). *Proyecto Conservación y Mejora de Playas*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas – Proyecto de las Naciones Unidas para el Desarrollo, UNESCO. Montevideo. 593pp.
- MVOTMA (2015). Plan Estratégico 2015-2020. Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Uruguay. Montevideo: SNAP - DINAMA. 66 pp.
- Noguera, A. L., Bentos Pereira, H., y Fornaro, L. (2014). Radiactividad natural en la zona costera del departamento de Rocha, Uruguay. *AUGMDOMUS*, 5, 213-218.
- Omar, M., Hassan, A., (2002). The occurrence of high concentration of natural radionuclides in black sands of Malaysian beaches. *Jurnal Sains Nuklear Malaysia* 20 (1–2), 30–36.
- Oyhantçabal P. (2005) The Sierra Ballena Shear zone: Kinematics, Timing and its significance for the geotectonic evolution of southeast Uruguay. Tesis Doctoral. U. de Gottingen Alemania Federal.
- Oyhantçabal P; Segesmund S.; Wemmer K.; Presnyakov S.; Layer P. (2009). Geochronological constraints on the evolution of Southern Dom Feliciano Belt (Uruguay) *Journal of the Geological Society, London*, Vol.166, pp 1075-1084.
- Panario, D., Gutierrez, O. (2006). Dinámica y fuentes de sedimentos de las playas uruguayas. *En: MENAFRA, RODRIGUEZ-GALLEGO, SCARABINO (Eds.) Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya. F y D Conde (eds.) Montevideo, Uruguay.*
- Preciozzi, F., Masquelin, H., Basei, M. (1999). The namaqua/grenville terrane of eastern Uruguay: 2nd South American symposium on isotope geology, Argentina, pp 338–340
- Precciozzi F.; Masquelin H. y Sánchez L. (1993). Geología de la porción sur del Cinturón Cuchilla Dionisio. Guía de Excursión, I Simposio del NeoProterozoico-Cámbrico de la Cuenca del Plata. La Paloma, Uruguay. 3-39
- RENARE-MGAP. [Mapa de cobertura de suelo CONEAT]. (10 de noviembre del 2020) Recuperado de: <http://dgrn.mgap.gub.uy/>
- Saito, K. and P. Jacob. (1995). Gamma ray fields in the air due to sources in the ground. *Radiat. Prot. Dosim.* 58(1): 29-45.

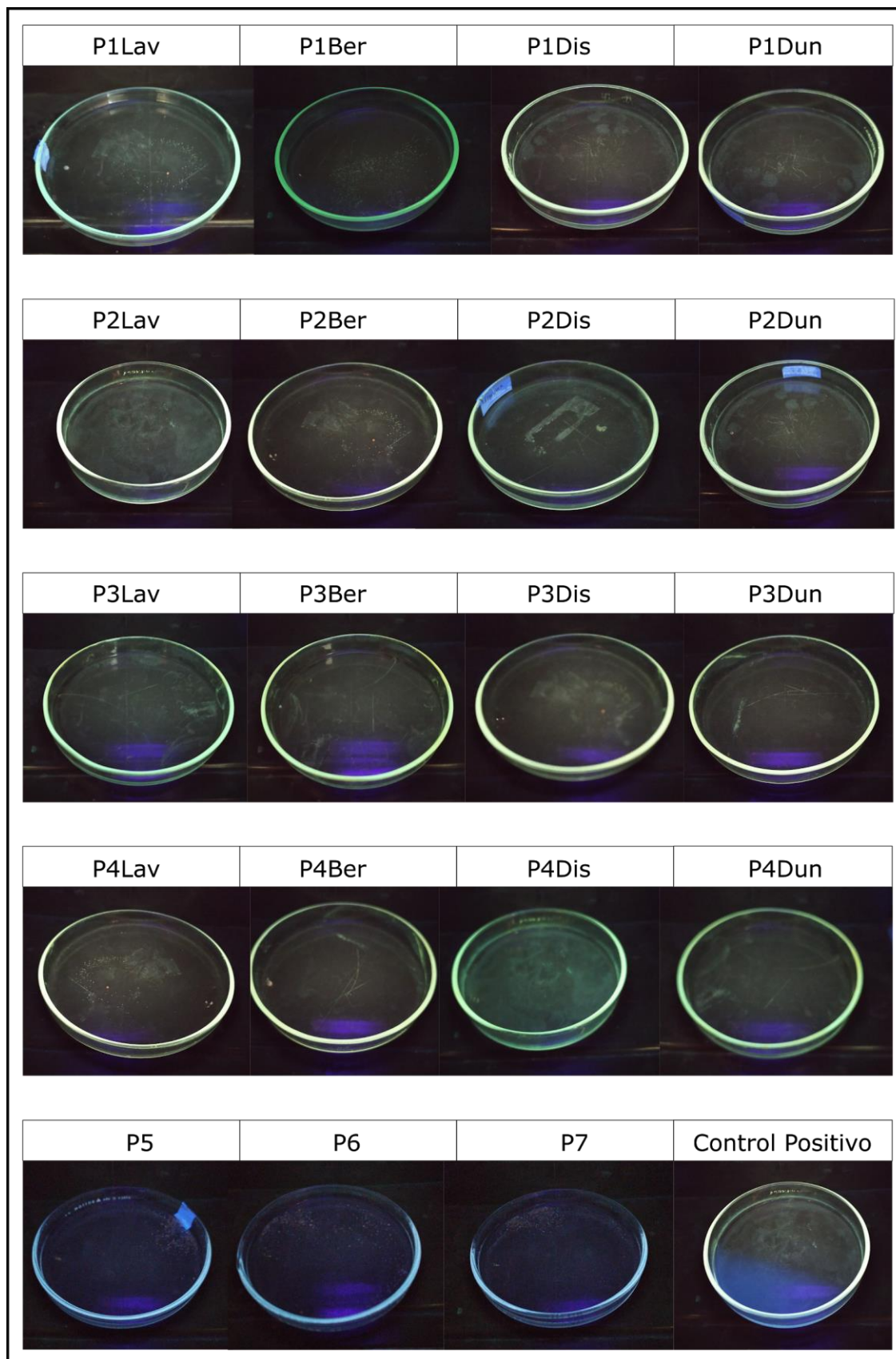
- Short, A (1996) The role of wave height, period, slope, tide range and embaymentisation in beach classifications: a review. *Rev Chil Hist Nat* 69:589–604.
- Shuaibu, H., Khandaker, M., Alrefae, T. (2017). Assessment of natural radioactivity and gamma-ray dose in monazite rich black Sand Beach of Penang Island, Malaysia, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 119, Issue 1, 423-428.
- Spoturno J.; Oyhantçabal P.; Loureiro J. (2012) Mapa Geológico del Departamento de Maldonado escala 1/100 000, Memoria Explicativa 27-202. Acuerdo de cooperación científica y técnica Facultad de Ciencias (UdelaR)-Dirección Nacional de Minería y Geología (miem). Mvdeo- Uruguay.
- Tassano, M (2019) Interacción de la radiación con la materia. En Calzada, V., Cerecetto, H. (2019) *Una introducción a la Química Nuclear*. Comisión Sectorial de Enseñanza, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay. 118pp.
- UNSCEAR, (2000). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the effect of atomic radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York. 659pp.
- Veiga R, Sanches N, Anjos RM, Macario K, Bastos J, Iguatemy M, Aguiar JG, Santos AMA, Mosquera B, Carvalho C, Baptista Filho M y Umisedo NK. (2006). Measurement of natural radioactivity in Brazilian beach sands. *Radiation Measurements* 41(2): 189-196

Anexo I

Fluoroscopia UV (Método directo)



Fluoroscopia UV (Método por extracción con solvente)



Anexo II

Mapa Geomorfológico Punta Piedras - José Ignacio

