

## Características Granulométricas de los Cordones Litorales en Punta Fort Williams, Isla Greenwich, Península Antártica

Essy Santana

Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR)

Base Naval Sur, AP 5940, Guayaquil, Ecuador

Jean François Dumont

IRD Géosciences Azur, 06235 Villefranche sur Mer, France

### Resumen

*Se presenta un estudio granulométrico de los cantos rodados que conforman los cordones litorales de la plataforma costera de Punta Fort Williams en la Península Antártica. Se identificaron 6 cordones en secuencia, desde el nivel actual del mar hasta los 13.5 m de altura. Los cordones están generalmente aislados, separados por espacios en donde se encuentran afloramientos del basamento volcánico o bloques de origen periglacial. El análisis granulométrico de 1900 muestras en 39 estaciones donde se realizaron mediciones, permite identificar varios tipos de distribución granulométrica, en los cuales se nota la influencia de aportes locales, movilización y clasificación del material. En los diagramas granulométricos de los cordones, los cortes verticales realizados permitieron identificar tres secuencias mayores, repartidas en dos o tres cordones sucesivos. Estas secuencias empiezan con material mal clasificado, interpretado como la influencia de material de origen periglacial tipo till. La interpretación de estas etapas en las construcciones de los cordones involucra probablemente una combinación de condiciones tanto de levantamiento isostático como de clima.*

**Palabras Claves:** *Granulometría, cordones litorales, cantos rodados, Antártica, Isla Greenwich, levantamiento, Holoceno*

### Abstract

*We present a study of pebble beach ridges from the coastal uplifted platforms in the Fort Williams Point, Antarctic Peninsula. We studied the granule size of the pebbles and found evidence of 6 beach ridges from the present upper sea level up to 13.5 m above current sea level. The beach ridges are generally isolated, with low valleys in between. The basement of volcanic rocks outcrops in the inter-space ridges, as well as blocks of volcanic, gneiss, or granodiorite transported here as till. Analysis of 1900 samples in 39 locations allow identifying several types of granulometric distribution, providing evidences of local origin and classification, as well as mobilization of very coarse material of periglacial origin. The vertical succession of pebble layers distinguished by their characteristic granulometry gives evidence of three successive sequences of mobilization and classification of the material. Each sequence includes 2 or 3 separated ridges. These sequences began with poorly sorted material, interpreted as a periglacial origin like till. The interpretation of these successive sequences of beach ridges construction involves the combination of glacio-isostatic uplift and climate conditions.*

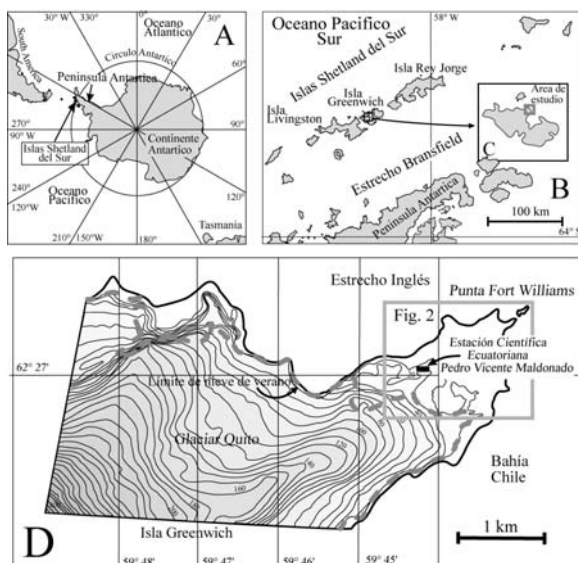
### 1. Introducción

Las costas de la península Antártica (Fig.1) son de tres tipos: costas de capa de hielo, costas de acantilados rocosos y costas de plataformas litorales. Estas últimas son las de mayor interés por la facilidad de su acceso desde el mar, y por sus morfologías suaves que permiten la instalación de Bases y Estaciones Científicas.

La desglaciación empezó hace 18,000 años, pero la reducción de la capa de hielo empezó hace solo 10,000 años en la Península Antártica [1-3]. El deshielo provocó el levantamiento isostático y la emersión de la Península Antártica, cuando la subida eustática del

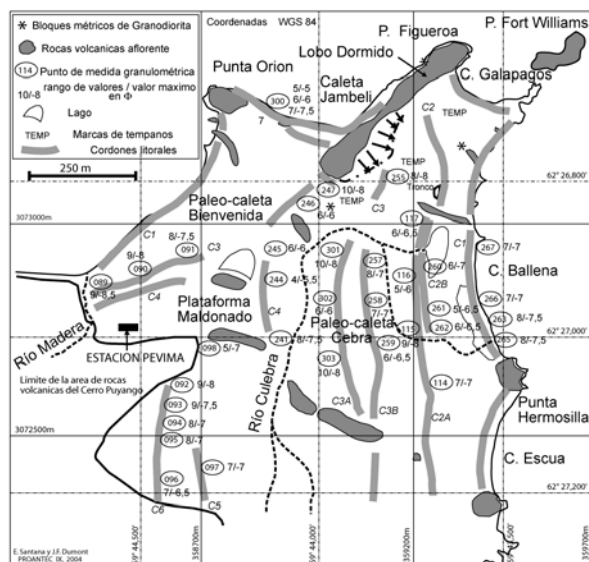
nivel del mar se estabilizó durante el Holoceno [4], mientras el levantamiento isostático continuaba.

La Península Antártica presenta plataformas morfológicas de origen marino hasta una altura de 120 m [5]. Sin embargo las plataformas marinas holocenas fueron encontradas a alturas no más elevadas que 18 m [6], y con una edad no anterior a 6.4 ka BP según Pallas et al. [7]. En la Península Antártica se suma al levantamiento glacio-isostático un levantamiento neotectónico del orden de 16 % del total [7], el cual puede explicar las diferencias de alturas observadas para las plataformas marinas más altas, encontradas entre 14 y 20 m. Las playas, planicies costeras y cordones litorales con cantos rodados constituyen una característica general de las latitudes altas, situadas a más de 40° norte y sur [8, 9].



**Figura 1.** A: Ubicación de la Península Antártica. B: Localización de la isla Greenwich en las islas Shetland del Sur. C: Zona de estudio. D: Mapa topográfico de la zona de estudio. La línea de costa está tomada de la carta IOA7 del INOCAR de 1990.

Estos depósitos son calificados de "periglacial" [10, 11] es decir material de origen glaciar de tipo till removilizado por el efecto de tempestad y olas fuertes [12]. Estudios sobre la construcción de cordones litorales de cantos rodados realizados en Inglaterra [11, 13], subrayan procesos de acumulación vertical (overtopping) y deposición tras el cordón (overwashing).



**Figura 2.** Mapa de ubicación de los cordones litorales estudiados, C1 a C6 y puntos de muestreo (círculos). Los números indican (ex: 8/-7): el número de clases granulométricas / el valor granulométrico principal. Varios parámetros influyen, como la importancia y recurrencia de las olas extremas, la disponibilidad del

material, y la variación del nivel del mar durante la última transgresión post-glaciar. Sin embargo la analogía con los depósitos de la Península Antártica es limitada, pues los cordones antárticos se formaron en un contexto regresivo, mientras los estudios disponibles consideran contextos transgresivos. La diferencia es importante en el sentido de que la regresión implica el abandono rápido del material fuera del acceso de las olas, mientras la transgresión hace posible la removilización de todo o parte del material previamente depositado. Se presentará aquí el análisis granulométrico de 6 cordones litorales en la Punta Fort Williams en la Isla Greenwich (Fig. 2) escalonados desde el nivel del mar actual hasta los 13.5 metros. Se enfocará en particular, la procedencia del material, su repartición a lo largo de los cordones, y la evolución de la granulometría de los cordones sucesivos. Las interpretaciones enfocan los procesos de formación, en particular la disponibilidad del material sedimentario involucrado, y la posible combinación de este fenómeno de reservorio con otros.

## 2. Método de estudio

Las medidas granulométricas de cantos rodados deben ser hechas en el campo mismo. Se usó por ello una técnica previamente establecida para el estudio de los lechos de cantos rodados de ríos y canales [14, 15]. Esta técnica está conforme además con la de Malavoi [16]. En cada estación se miden 50 cantos rodados usando un ábaco de plástico con 11 aberturas cuadradas, calibradas en unidades  $\Phi$  (fi) (Krumbein, 1938) de -3 hasta -8 (-3; -3.5; -4; -4.5; etc.). En la práctica se anota la clase  $\Phi$  que rechaza la entrada de un canto presentado según la orientación del eje "b". La colección de los cantos se hace según el método de Kellerhals and Bray [15], en donde se usa una soga con 7 graduaciones espaciadas 125 mm. Se seleccionan los cantos ubicados debajo de las graduaciones, a lo largo de una línea definida de manera aleatoria. En la práctica se mueve 7 veces la soga, y se recoge el último canto de manera aleatoria para complementar el número de 50 medidas por cada estación. Todas las medidas se hicieron en el tope de los cordones, cerca del borde exterior (hacia el mar), salvo el punto de observación 300 (Fig. 2), en donde se consideraron las tres crestas sucesivas y escalonadas del cordón actual. Las medidas de los cantos necesitan ciertas precauciones debido a la importancia de estos cuando están agrietados por el frío, especialmente en los cordones altos. Cuando se puede se consideran cantos enteros o con agrietamientos que no afectan la percepción del tamaño general. Esta precaución es válida también para los cantos pequeños, que deben hacer presentar sus aspectos redondeados para evitar confusiones con fragmentos de cantos agrietados. En los cantos menores a 10 cm es difícil de separar cantos agrietados y re-trabajados. Se ha observado que el fenómeno de agrietamiento puede empezar en el

cordón más bajo y no presentarse todavía completamente estabilizado. Pero esto no es importante, porque este fenómeno pertenece a la evolución normal del material contemplado en el estudio, solo la confusión con el agrietamiento sin re-trabajamiento por las olas, puede afectar el resultado final.

En las observaciones se pueden anotar las formas de los cantos (redondeados, sub-redondeados, sub-angulosos, angulosos, etc.). Las observaciones preliminares mostraron muy poca variabilidad, la casi totalidad del material estuvo en las categorías de sub-angulosos o sub-redondeados. Por razones de tiempo de permanencia y condiciones climáticas durante el muestreo, no se apuntaron la forma para cada canto. No se ha considerado tampoco la litología de los cantos durante las mediciones granulométricas, la mayor parte del material es de origen volcánico, de tipo basalto-andesítico. De estos se puede diferenciar facies de colada y facies de intrusivo, pero la identificación del tipo petrográfico de cada canto es imposible hacer con precisión durante el proceso de medición. Se observó de manera general que ciertas facies intrusivas tipo sill presentan mayor sensibilidad para agrietarse por el frío en fragmentos pequeños que no son contemplados en la escala granulométrica usada. Junto al material volcánico existe material de origen granodiorítico o gneiss con todo tipo de tamaño hasta más de 3 metros. Este material no está afectado por el agrietamiento y corresponde a una estimación del 1% en número de cantos, lo que puede corresponder a más del 10% en volumen. Estos cantos son testigos de terrenos que no aparecen en superficie, y su presencia está relacionada a una capa de tipo till que será considerada en las interpretaciones sobre la procedencia del material de los cantos rodados.

En total se hicieron 2100 mediciones granulométricas de cantos rodados, repartidos en 34 estaciones. Las estaciones se ubicaron con espacios de 50-100 m a lo largo de los cordones. Sin embargo la nieve impidió en algunas ocasiones hacer observaciones con regularidad.

### 3. Marco Geográfico y Geológico

La Punta Fort Williams (también denominada Punta Spark) está localizada en el borde suroeste del Estrecho Inglés, en la esquina oeste de la entrada hacia la Bahía Chile (Fig. 1). Las primeras descripciones geológicas de la zona fueron aportadas por Araya y Hervé [17] los cuales describieron los cordones litorales de cantos rodados en la cercanía de la Base Chilena Arturo Prat, ubicada en la esquina este de la entrada hacia la Bahía Chile.

La Isla Greenwich está constituida por unidades volcánicas tabulares de granodioritas de edad Cretácico superior a Paleoceno [17-21]. Dos unidades son encontradas en Punta Fort Williams: la Unidad Fort Williams constituida por estructuras circulares de

tipo sill, que forman el basamento de los depósitos litorales, y la unidad Puyango ubicada más arriba en la topografía y aflorando al oeste de Punta Fort Williams, comprende coladas basálticas intercaladas de brechas volcánicas y capas de sedimentos finos [21].

Dos direcciones estructurales sobresalen en la planicie litoral de Punta Fort Williams, una dirección NE-SW que marca la orientación general de la Punta, y una dirección NW-SE con menos continuidad, pero que da a la zona litoral su anchura y superficie. La primera dirección caracteriza la tectónica de falla post Cretácico-Paleoceno de la zona, con una dirección paralela a las estructuras de la cuenca Bransfield. Su estructura principal es la roca del Lobo Dormido (Fig. 2) de 20 m de altura, alineado a lo largo de la falla Pevima y constituida de celdas volcánicas de sill. Las vertientes SW presentan desprendimientos de rocas fácilmente fracturadas por el frío, una vez que son expuestas en la pendiente o a su pie. Las rocas del Lobo Dormido se extienden a lo largo de la Punta Figueroa y lateralmente de la Punta Fort Williams con rocas sub-aflorantes. La otra dirección NW-SE es subrayada por diques de roca volcánica, algunos de relativa gran resistencia como la Punta Orión al oeste y los pequeños diques que limitan la extensión de los cordones litorales al sur de la Punta Fort Williams.

## 4. Los cordones litorales en Isla Greenwich

Los primeros estudios sobre morfología litoral en la Isla Greenwich indicaron los parámetros de altura, espaciamiento y continuidad de los cordones de cantos rodados [17]. Estudios recientes en otras islas de la Península Antártica precisaron la edad Holoceno de los cordones litorales con menos de 20 m de altura [5, 6]. Más recientemente Pallas et al. [7, 22] analizaron los efectos relativos de la neotectónica, levantamiento isostático y fenómenos climáticos extremos en la construcción de los cordones de cantos rodados. Sin embargo, la formación y significación de los cordones siguen mal entendidas, en particular al respecto del material movilizado, su origen y reserva potencial, y los procesos de esta movilización para hacer cordones aislados.

### 4.1 Los cordones litorales en Punta Fort Williams

La figura 2 presenta el mapa de los cordones de cantos rodados en Punta Fort Williams. Una característica general de los cordones de cantos rodados es formar crestas bien nítidas y aisladas, las cuales frecuentemente juntan una roca aflorante a otra. Se encuentran en zonas litorales de pendiente suave como en costas de pendiente fuerte (10% o más en Isla Robert), pero con mejor continuidad en el primer caso. Un cordón típico tiene una altura de 2-3 m por encima de la plataforma litoral, una anchura de 20-40 m, y una continuidad de hasta varias decenas de metros. Los

espacios entre los cordones son frecuentemente más importantes que el espacio ocupado por los cordones. En estos espacios inter-cordones se puede observar el basamento volcánico y bloques de roca de tamaño métrico, de origen volcánico o granodiorítico. Además en estos espacios inter-cordones se observan formas de pavimento y agrupaciones de bloques que son característicos de la presencia y el movimiento de témpanos en la zona intermareal. La morfología hace aparecer una plataforma sedimentaria de cordones anchos a una altura de 10-11 metros (C4, Fig. 2), donde se ubica la estación Ecuatoriana PEVIMA, y denominada más adelante "Plataforma Maldonado". Los dos cordones más altos (C5 y C6, Fig. 2) aparecen únicamente al sur, entre 11 y 13.5 m de altura, caracterizando una pequeña bahía abierta hacia el este. La Plataforma Maldonado está delimitada por los cordones C4-O y C4-E (oeste y este respectivamente), que se unen hacia la roca del Lobo Dormido y la Punta Figueroa, formando un tómbolo. El triángulo donde se unen los cordones oeste y este está marcado por una pequeña depresión donde la nieve y el agua permanecen todo el verano. El deshielo del lago forma un canal de apenas 20-30cm dentro del material del cordón. En la época de la formación del cordón C4 el tómbolo que une la Punta Figueroa-Fort Williams a la tierra ha separado dos caletas ubicadas respectivamente al noroeste y este del tómbolo, y designadas aquí como paleo-caletas Bienvenida y Cebra respectivamente (Fig. 2). Con la emersión de las rocas de las Puntas Orión, Fort Williams y Hermosilla, estas caletas se dividieron en las caletas más pequeñas Jambelí, Galápagos, Ballena Norte y sur y Escúa.

Los cordones litorales bajos (menos de 10 m) son bien individualizados a lo largo de la pendiente litoral suave de la paleo-caleta Cebra, al este de Punta Fort Williams, donde se observan 5 cordones en 3 grupos (C1, C2, y C3, Fig. 2). Entre la estación PEVIMA y la costa, donde la pendiente litoral está más fuerte solo los cordones C1 y C3 aparecen claramente.

#### 4.1.1 El aporte continental

Los pequeños ríos Madera y Culebra llegan a la costa en las dos paleo-caletas Bienvenida y Cebra respectivamente. Estos dos ríos constituyen las dos únicas fuentes potenciales de cantos de origen continental. El Río Madera (nombrado por su origen cerca de una zona de madera fósil) sale al mar mediante una pendiente fuerte (>50%) a través de los cordones de cantos litorales. Tiene un caudal promedio estimado de 1m<sup>3</sup>/s en condiciones normales. Con las lluvias de verano la corriente parece capaz de mover los cantos decimétricos. Se observa una erosión de los cordones litorales, que no está compensada por la formación de un cono detrítico importante en la entrada en el mar, lo que podría significar que la mayor parte del transporte fluvial es probablemente conducido por la corriente litoral dirigida hacia el este.

El Río Culebra tiene un caudal estimado de 2 a 3 m<sup>3</sup>/s. Sin embargo corre en la superficie de la Plataforma Maldonado, con un lecho largo de varias decenas de metros, sin capacidad de erosión. El río corta los cordones C3A y B por una quebrada al nivel de la plataforma que soporta los cordones litorales, sin más erosión por parte de este. Río abajo corta los cordones C2A y B con dificultad, formando zonas represadas arriba de los cordones C2 y C1. El aporte de cantos rodados de origen continental por parte del río parece despreciable, y se considera que el aporte sedimentario del río está limitado para los cantos removidos del cordón litoral 2 cuando el deshielo de verano abre la reserva de agua represada arriba del cordón, formando una pequeña cascada.

#### 4.1.2 Litología de los cantos rodados

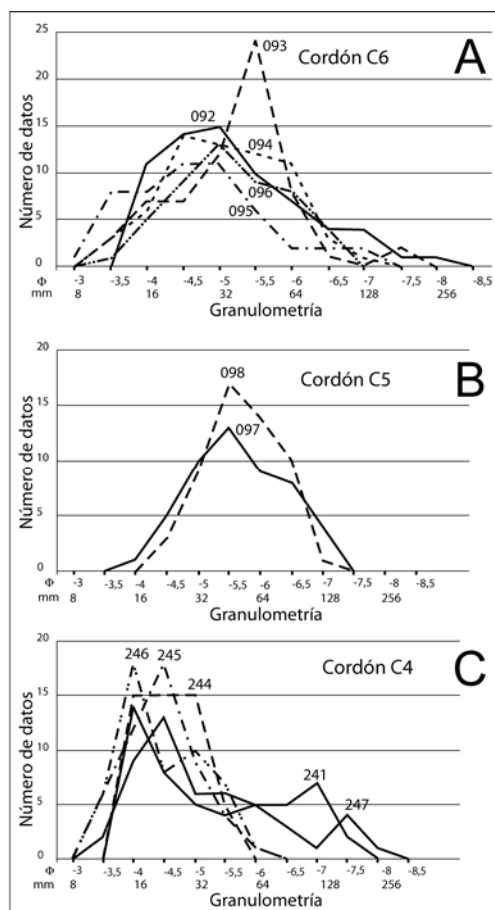
En las unidades geológicas presentes en la cercanía de la Bahía Chile, el material de origen sedimentario es poco importante respecto al material volcánico, así que la mayor parte del material encontrado en los acantilados litorales proviene de las rocas volcánicas. Otra clase de material se encuentra únicamente en las playas y en las áreas de cordones litorales, en la forma de cantos y bloques de granodiorita y gneiss. El tamaño de los bloques más grandes alcanza 3 metros. No se conoce material semejante en los afloramientos en la zona de Punta Fort Williams, por lo que se considera que este material ha sido transportado por los glaciares desde otras partes de la isla. La presencia de bloques métricos de granodiorita o gneiss impiden considerar un transporte importante, que sea por parte de los ríos actuales que salen de la base de los glaciares, o por parte de la erosión y del transporte litoral.

### 5. Resultados

Los resultados del análisis granulométrico aparecen en la tabla 1. La descripción de los resultados es presentada tomando en cuenta la agrupación de los cordones según sus continuidades y alturas. Diferencias de hasta 2 m pueden existir a lo largo de un cordón, lo que hace imposible determinar la pertenencia de un cordón a un grupo particular con solo su altura. El análisis granulométrico así como las interpretaciones están basados principalmente en los cordones de las partes sur y este, por la buena sucesión de cordones escalonados.

#### 5.1 Granulometría de los cordones altos C6 y C5

El cordón C6 es el más alto, con 13.5 m (Fig. 2 y Tabla 1). Sus dos extremidades tocan rocas costeras. A pesar de la cercanía del litoral en la época de su forma-



**Figura 3.** Diagramas granulométricos de los cordones C4, C5 y C6. Los números se refieren a los puntos de medidas en la figura 2.

ción, es un cordón aislado. Ahora esta cortado en tres partes, lo que parece resultar del efecto de la erosión por el drenaje represado atrás de él. La figura 3A muestra la relativa homogeneidad de los diagramas granulométricos a lo largo del cordón 6. La proporción de cantos más grande aparece cerca de la extremidad norte del cordón (punto 092), pero se reduce progresivamente hacia la otra extremidad (punto 096). La forma de la curva que incluye los cantos pequeños tiene una forma sub-platicúrtica, mostrando una relativa mala clasificación. Se observa una continuidad de la curva entre cantos pequeños y grandes. La curva 093 presenta un pico por el valor de  $-5,5 \Phi$ , equivalente a un exceso de 10 medidas en comparación con las otras curvas. Esto se puede explicar en relación con la dinámica local de la sedimentación, o la presencia local de una reserva de material más grueso. A menos de 100 m adelante del cordón C6 se encuentra el cordón C5 (Fig. 3B) con una altura de 11.5 m. Este cordón toca rocas emergidas al sur, pero se termina hacia el norte sin llegar a cerrar la caleta como el cordón C6. El diagrama granulométrico en el punto 097 (Fig. 3B) muestra una curva leptocúrtica denotando una buena clasificación del material. La clase máxima de  $-5,5 \Phi$ , es similar a la

clase máxima en el punto 093. Esto sugiere la movilización con mejor clasificación de un material idéntico al del cordón C6.

## 5.2 Cordones de la Plataforma Maldonado C4

El cordón C4 delimita la Plataforma Maldonado (Fig. 2). Al sur se encuentra un cordón corto que inicia el desarrollo en tómbolo de la Plataforma Maldonado en el punto 098. Los puntos de medidas 241-244-245-246 y 247 (Fig. 3C) siguen el borde este de la Plataforma Maldonado formando un tómbolo que junta la roca del Lobo Dormido a la tierra. La granulometría a lo largo de este borde muestra una buena homogeneidad. En las dos extremidades (puntos 241 y 247) se observa la influencia de la cercanía de rocas costeras, mientras el cuerpo principal del cordón (244-245-y 246) muestra solamente material de clase mayormente inferior a  $-6 \Phi$ . Sin embargo la clasificación del material más pequeño es bueno para la clase  $-4 \Phi$  en casi todos los lugares (pendiente fuerte de la parte izquierda de la curva), pero mucho menos clasificado hacia las clases más gruesas (forma platicúrtica de la curva 244) o apariencia de varios grupos de material granulométrico (aspecto bimodal de las curvas 241, 246 y 247).

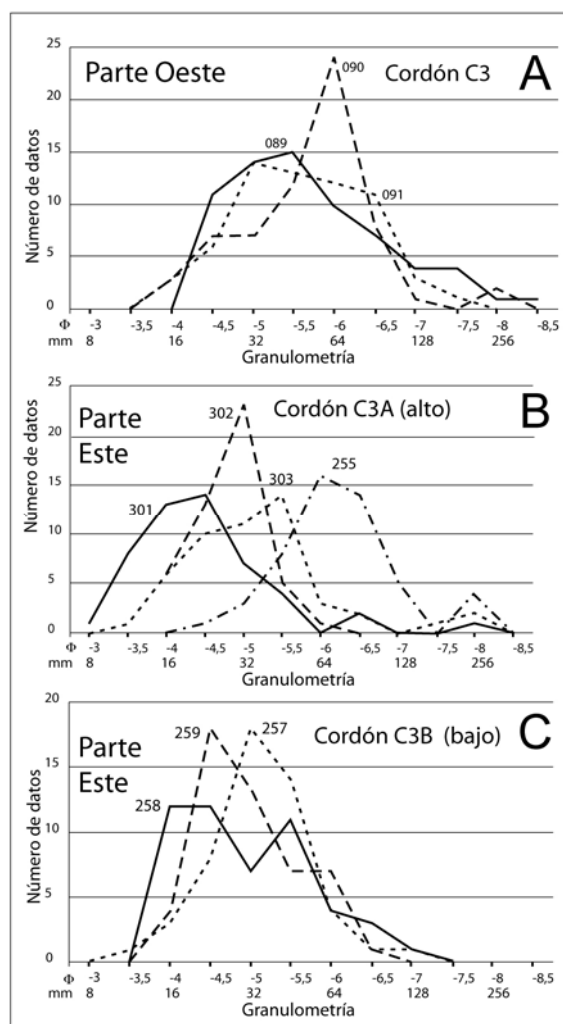
## 5.3 Cordones intermedios C3

Los cordones intermedios se encuentran a una altura promedio de 7 m (Tabla 1). El borde oeste de la Plataforma Maldonado corresponde a los puntos 089-090-091 (Fig. 4A). Las tres curvas granulométricas son de formas similares, pero demuestran una mala clasificación en comparación con el borde Este. Se observa menos material pequeño (casi nada, menor al tamaño de  $-4 \Phi$ ), y una forma general casi platicúrtica y alargada de manera continua hacia las granulometrías grandes, hasta los tamaños más grandes que se puede medir. El punto de medida 090 tiene un aspecto diferente con 25% de los cantos bien clasificados a  $-6 \Phi$ . Estas curvas tienen similitud con la granulometría del cordón alto, y también las curvas diferentes 090 y 093 tienen características similares.

En la parte oriental de Punta Fort Williams se observan dos líneas paralelas de cordones distantes de menos de 50 m, que aparecen como un solo cordón hacia el sur. Son designados como C3A y C3B (Fig. 4B y C), el C3B siendo ubicado afuera y con su tope 1 m más bajo que el C3A (Fig. 2).

Los diagramas de granulometría del cordón alto C3A (Fig. 4B) muestran poca homogeneidad. En la curva 255 se observa la influencia de la cercanía de los derrumbes de la pendiente de la roca del Lobo Dormido. También en esta zona se observan mayor cantidad de bloques decimétricos y métricos de origen de till o de pavimento de témpanos (Fig. 2). Las curvas 302 y 303 (Fig. 4B) son relativamente comparables, y corresponden al cuerpo principal del cordón. La curva

301 muestra al contrario una proporción importante de cantos pequeños pero también cantidades residuales de cantos grandes. Esta curva viene de la cercanía del punto donde el río Culebra corta el cordón C3, mediante una quebrada bien marcada. La ligera sobre-elevación del cordón en los bordes del río sugiere la presencia de una ribera en relación con aportes sedimentarios del río, lo que puede explicar la mayor importancia de cantos de pequeño tamaño en esta zona, mezclado con otros tamaños.



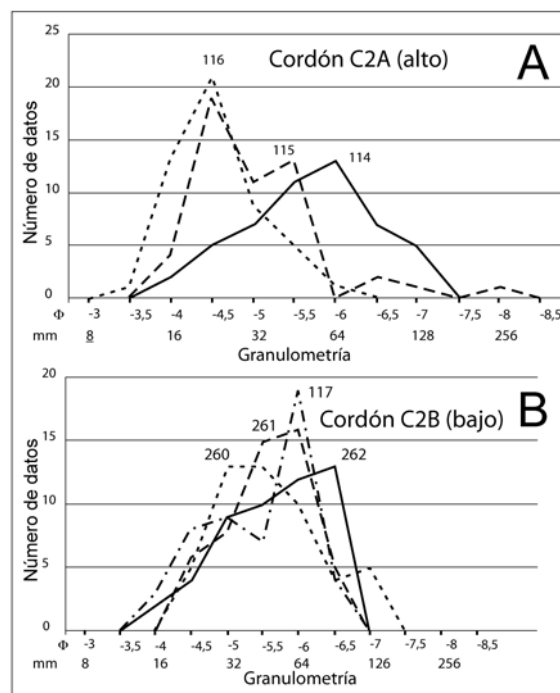
**Figura 4.** Diagramas granulométricos del cordón C3 en la parte Oeste (A) y de los cordones C3A y C3B en la parte Este (B y C respectivamente).

Los datos granulométricos del cordón C3B (Fig. 4C) presentan un agrupamiento de las curvas en zonas similares a la parte principal de las curvas 302 y 303 en el cordón C3A (Fig. 4B). Se nota una menor proporción de cantos grandes, y una mejor clasificación en los cantos pequeños (pendiente de la parte izquierda de las curvas), lo que puede corresponder a la re-movilización de un material similar al del cordón anterior C3A.

### 5.4 Los cordones bajos C2

Los cordones C2A (alto) y C2B (bajo) (Fig. 5A y 5B) tienen una continuidad de cerca de 1 km. a lo largo de la costa este de Punta Fort Williams (Fig. 2). En la parte central tienen una morfología doble, el cordón C2B está ubicado a menos de 50 m hacia el mar y menos de 1 m abajo del cordón principal.

Las curvas granulométricas del cordón C2A (Fig. 5A) muestran una evolución del sur al norte (puntos 114-115 y 116) hacia una mejor clasificación del material. La curva 114 demuestra una mala clasificación de material mayormente grueso. La curva 115 marca un pico de clasificación en los tamaños pequeños, pero picos secundarios hacia granulometrías grandes. Finalmente la curva 116 esta casi leptocúrtica. La forma amplia y homogénea de la curva 114 en una zona donde el aporte de rocas costeras es menor sugiere una fuente local procedente de la re-movilización de depósitos de tipo till. El diagrama del cordón C2B (Fig. 5B) presenta un mejor agrupamiento, pero también formas bimodales o casi platicúrticas que denota una mala clasificación. La comparación del cordón C2A con el cordón C2B (Fig. 5A y 5B) sugiere la desaparición de los cantos gruesos.



**Figura 5.** Diagramas granulométricos de los cordones C2A y C2B.

### 5.5 El cordón actual C1

La granulometría del cordón actual aparece en la figura 6, con datos de la costa este de Punta Fort

Williams. Se nota la mala clasificación del material, la forma de las curvas denotan dos grupos de granulometría separados por la clase de material de  $-5,5 \Phi$ . La forma de la curva 263 (Fig. 6A) es similar a la curva del punto 114, indicando una falta de clasificación y movilización de un material heterogéneo.

### 5.6 Variaciones en el cordón actual

El cordón activo presenta frecuentemente crestas escalonadas más bajas hacia el mar. En el punto 300 se hicieron las mediciones granulométricas del material de estas crestas (Fig. 6B). Se observa la mayor granulometría a lo largo de la cresta del cordón alto, ubicado a una altura de aproximadamente 1 m por encima del promedio de marea alta. Las 2 crestas escalonadas más bajas son compuestas de cantos de tamaños progresivamente menores. La parte alta de la playa con cordones y sub-cordones de granulometría decreciente caracteriza según Oxford [13] sucesiones de condiciones de tempestad y de tiempo regular.

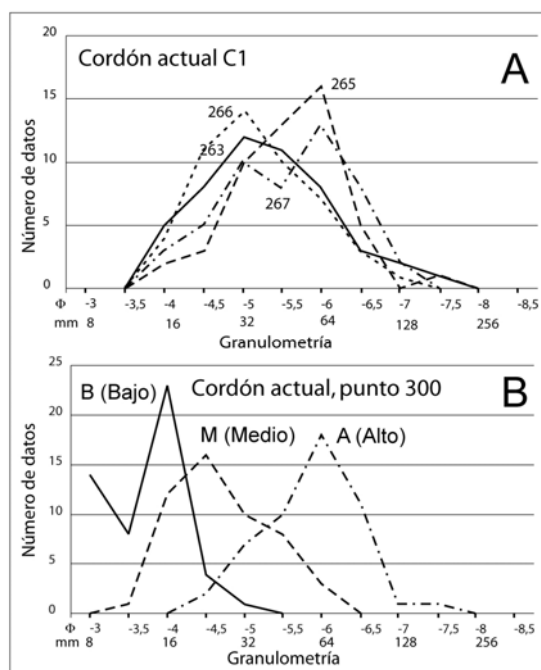


Figura 6. Diagramas granulométricos de los cordones actuales.

La disminución de la granulometría en las crestas más bajas observadas en la pendiente hacia el mar del cordón principal sugiere que es el stock de material del cordón mayor, constituido durante una época de tempestad mayor, que está removilizado, sin aporte nuevo. Hacia la costa rocosa al oeste de Pevima se observa que el cordón mayor se incorpora lateralmente a una plataforma de acumulación de cantos rodados estabilizados y cubiertos por musgo hasta una distancia de menos de 1 m del borde del acantilado.

Más al oeste se observa la transición a una verdadera plataforma de erosión, la única plataforma de erosión encontrada en la zona. No se observan cordones de cantos rodados adelante del acantilado de la plataforma de cantos rodados o de erosión. Esto sugiere que los sub-cordones observados al frente del cordón mayor no caracterizan aportes nuevos de material, pero la re-movilización del material existe en el cordón mayor.

### 5.7 Efecto de bordes rocosos

El efecto de la proximidad de una roca costera se observa en las estaciones 092 (C6), 247 (C4), 241 (C4) y 255 (C3) (Fig. 2). Las curvas 241, 247 y 092 (Fig. 7) muestran una relativa continuidad entre cantos pequeños y grandes, con una relativa buena clasificación de cantos pequeños entre  $-4 \Phi$  y  $-5 \Phi$ .

La estación 255 presenta una curva hacia los tamaños grandes. Se observa en este lugar los escombros de rocas con gran sensibilidad a la fracturación por el frío una vez que llega abajo de la pendiente, pero también litologías muy resistentes a la alteración, roca volcánica y gneiss, proviniendo probablemente del till. Estas condiciones pueden explicar la casi ausencia de cantos pequeños en el punto 255.

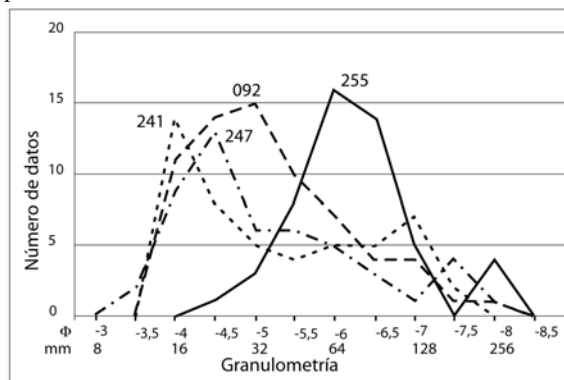


Figura 7. Diagramas granulométricos en las extremidades litorales, cerca de rocas del acantilado. Ver la ubicación en la figura 2.

### 5.8 Diagrama total de granulometría

La Figura 8 A y B presenta el conjunto de los diagramas de granulometría. La curva de la figura 8A presenta todas las medidas sumadas por clases. Aparece una forma disimétrica y platicúrtica, con picos entre los valores de  $-5 \Phi$  y  $-6 \Phi$ . La pendiente de la curva es más fuerte hacia los tamaños pequeños y más suave hacia los valores altos. Esta forma platicúrtica y disimétrica sugiere un carácter bimodal de la distribución de los datos, con valores mejor clasificados en la granulometría pequeña que en la grande. La figura 8B representa todas las curvas separadas, haciendo aparecer el aspecto bimodal de la distribución de los datos.

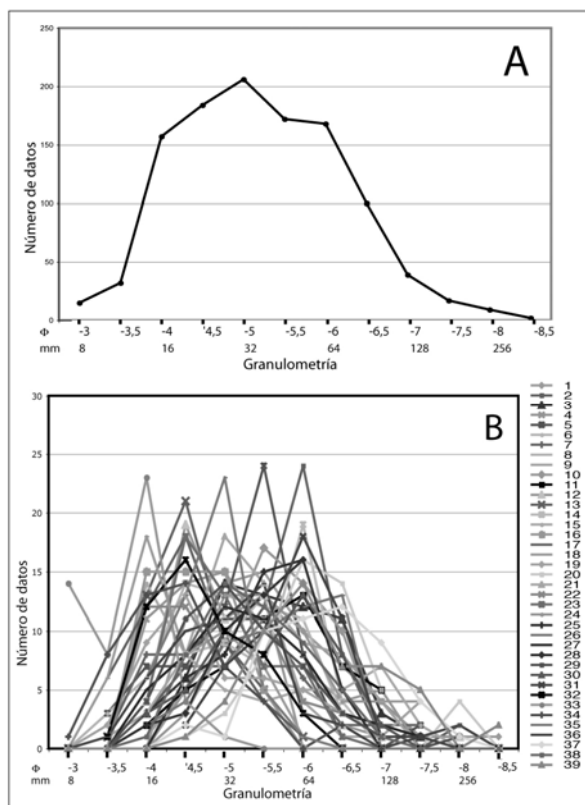


Figura 8. A: Diagrama granulométrico de la suma de cada clase. B: Diagrama de los puntos de observaciones, los números se refieren a la tabla 1.

5.9 Evolución vertical de los cordones

La evolución de la variación vertical de la composición granulométrica de los cordones, esta contemplada en la figura 9. Se consideró solamente puntos de mediciones en las partes centrales de los cordones largos, a fin de evitar los efectos de proximidad de rocas aflorantes. Las diferentes curvas granulométricas permiten evidenciar una evolución vertical en tres secuencias, sucesivamente C6-C5-C4 (Fig. 9A), C3A-C3B (Fig. 9B) y C2A-C2B (Fig. 9C). La evolución corresponde a una mejor clasificación desde el cordón alto hasta el cordón mas bajo, lo que esta evidenciado por la desaparición de la fractura gruesa (desde -8,5 hasta -6,5), y una curva leptocúrtica hacia los valores de granulometría más fina (entre -4 y -5). Esta evolución se expresa por la reducción del parámetro de dispersión de valores, es decir la amplitud de clases granulométricas contempladas (Fig. 10).

El cordón actual no se ubica claramente en la continuación de la secuencia de cordones C2A-C2B (Fig. 9C), sugiriendo al contrario el inicio de un ciclo nuevo de construcción de cordones.

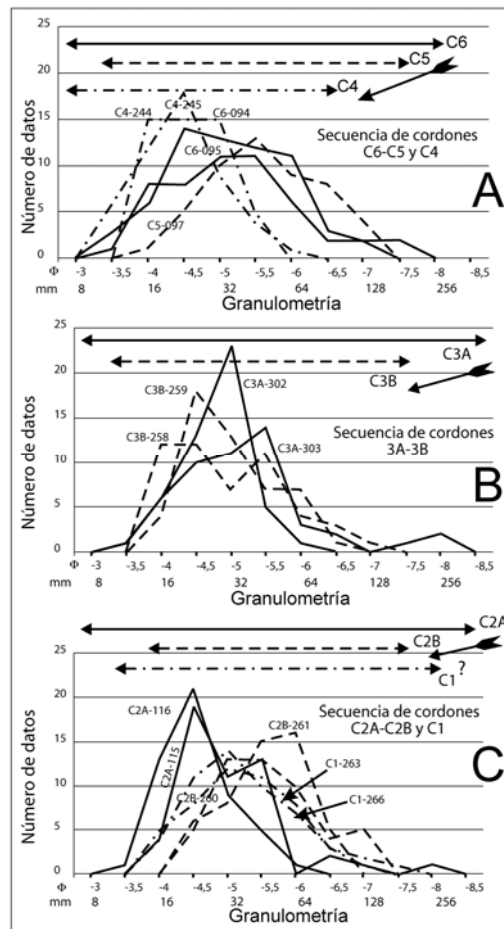


Figura 9. Evolución vertical de la granulometría en las tres secuencias de cordones.

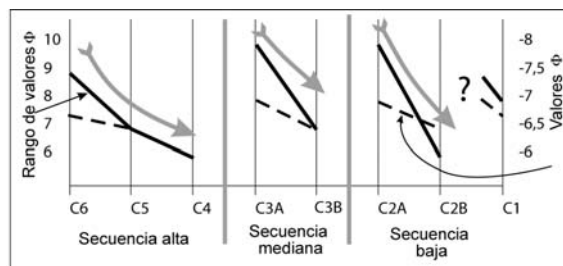


Figura 10. Evolución granulométrica de las secuencias de cordones.

Sin embargo, el parámetro de dispersión de valores de granulometría (8) es menos que lo que se observa en el caso de las secuencias anteriores (9 y 10), lo que corresponde principalmente a la ausencia de cantos de granulometría baja.

6. Conclusiones

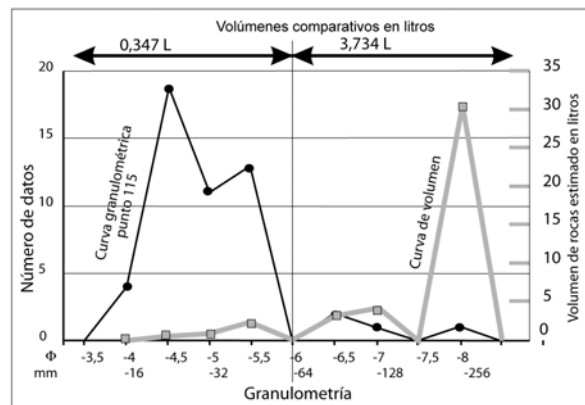
La técnica usada permite considerar el espectro completo de los tamaños de cantos que constituyen los



cordones litorales, con valores bajos o nulos hacia los extremos de la escala,  $-3$  y  $-8,5$ . Se observaron formas de curvas características, en término de clasificación hacia valores bajos o altos. La cercanía de rocas aflorantes aparece claramente en las curvas, con una continuidad hasta los valores de granulometría gruesa (Fig. 7). La re-movilización del mismo material como se observa en el cordón actual resulta en un significativa y rápido mejoramiento de la clasificación (Fig. 6B).

Los diagramas de valores totales así como varios diagramas locales, dan evidencias de dos clases de granulometría. Esto puede significar diferencias en la litología, o diferentes fuentes de material. La homogeneidad relativa de las fuentes de rocas conocidas (rocas aflorantes y basamento de las plataformas marinas de material volcánico basáltico), así como la evolución homogénea observada cuando se removiliza el mismo material, no permiten explicar estas diferencias de curvas. Al contrario, las evidencias de una fracción de material de origen periglacial, incluyendo cantos de los más gruesos y más resistentes a la fracturaron por el frío, como mecánica (los cantos y bloques de gneiss por ejemplo) sugieren mas efectivamente la segunda hipótesis, sobre fuentes de material de diferente tamaño y tipo. La observación de cantos de tamaño máximo ( $-8,5$ ) en las partes centrales de los cordones apoya esta interpretación. En estos casos las curvas no presentan continuidad entre tamaños grandes y pequeños como se observa en la cercanía de las rocas aflorantes, apoyando una interpretación de dos fuentes de origen del material, una local y la otra removilizada desde una capa de depósito periglacial de tipo till.

La evolución vertical de la granulometría de un cordón al otro, sugiere tres secuencias (Fig. 9 y 10), o cuatro si se considera el cordón actual como el inicio de una nueva secuencia. La disposición cartográfica muestra que las secuencias corresponden a grupos de dos o tres cordones relativamente cercanos (espacios del orden de 50 m), siendo separadas por espacios más amplios (100-150m). El carácter aislado de los cordones no parece relacionado con las secuencias de evolución. El inicio de una secuencia (C6, C3A, C2A y probablemente C1) corresponde obviamente al acceso a una reserva de material relativamente heterogéneo que incluye una parte significativa de tipo periglacial. Durante la evolución de la secuencia se removiliza esta reserva de material, y la fracción mas gruesa correspondiente a la de origen periglacial disminuye progresivamente. Una interpretación tentativa del volumen relativo aparece en la figura 11. Se ha considerado como ejemplo típico el punto 115 por su posición central y su distancia de rocas aflorantes. Se ha calculado el volumen relativo de esferas del tamaño de las medidas  $\Phi$ , respectivamente inferiores y mayores a  $-6 \Phi$ , en litros.



**Figura 11.** Representación relativa del volumen representado por cada clase granulométrica en el caso del punto de observación 115.

Se observa que los cantos encima de  $-6 \Phi$  corresponden a un volumen 10 veces mayor que el volumen total de cantos más pequeños que  $-6 \Phi$ . Sin poder concluir de manera mas precisa, pero considerando como cierto la procedencia de un till de los cantos más grandes y preservados (los de gneiss como testigos), se puede hipotetizar que la fuente del material de tipo till es más importante que la fuente de la erosión local y que es la movilización y disponibilidad de este material que genera las secuencias sucesivas. Sin embargo, la identificación de estas secuencias abre preguntas. La más importante es relativa a la disponibilidad del material periglacial, accesible de manera aparentemente discontinua. La relación cartográfica entre el espacio entre los cordones y las secuencias sugiere que es el levantamiento post glacial, es el que ha puesto progresivamente en disponibilidad este material. Las diferentes secuencias pueden resultar de las irregularidades del levantamiento relativas al eustatismo, como de condiciones climáticas más severas que pueden llegar a movilizar más material. Las diferencias de alturas entre los cordones mas altos y bajos de las secuencias sugiere que el levantamiento costero sigue, pero que más material de tipo periglacial no esta disponible. Así los espacios más amplios entre las diferentes secuencias estarían relacionados con la evolución climática durante el Holoceno reciente. La datación de un hueso de ballena en el cordón C2A de  $1570 \pm 60$  años [20] sugiere el inicio de una secuencia en esta época. Una extrapolación considera los cordones más altos y la secuencia mas alta no más antiguos que 4000-4500 BP, y la secuencia C3 alrededor de 2200 BP.

....

## 7. Agradecimiento

Este estudio ha sido realizado gracias al soporte técnico y logístico del PROANTEC. Se quiere agradecer de manera especial al CPFGE-EM Byron Sanmiguel Marín, anterior Director del INOCAR y CPFGE-EM Rafael Cabello, Jefe de la IX Expedición Antártica Ecuatoriana, junto con todo el personal participante por el apoyo prestado para la realización de este trabajo, así como al personal de la Base Chilena Arturo Prat por dar las facilidades logísticas para el ingreso a las áreas de estudio. Este trabajo es parte de las actividades del proyecto IGCP 495, Quaternary Land-Ocean Interaction: Driving Mechanisms and Coastal Responses, así como la publicación n°868 de los trabajos de Geosciences Azur-IRD.

## 8. Referencias

- [1] Hjort, C., Ingolfsson, O., Björck, S., "The last major deglaciation in the Antarctic Peninsula Region. - A review of recent Swedish Quaternary Research-," in: Yoshida, Y., Kaminuma, K. and Shiraiski, K., (Ed), Recent progress in Antarctic Earth Sciences, *Terra Scientific Publishing Company* (TERRAPUB), Tokyo, 1992, pp. 741-743.
- [2] Anderson, J.B., Shipp, S.S., Lowe, A.L., Wellner, J.S., Mosola, A.B., "The Antarctic Ice sheet during the Last Glacial Maximum and its subsequent retreat history: a review," *Quaternary Science Reviews* 21, 2002, 49-70.
- [3] Clark, P.U., Mix, A.C., "Ice sheets and sea level of the Last Glacial Maximum," *Quaternary Science Reviews* 21, 2002, 1-7.
- [4] Pirazzoli, P.A., (Ed) "World atlas of Holocene sea-level," *Elsevier Oceanography Series*, Amsterdam, 1991, 171 pp.
- [5] John, B.S., Sugden, D.E., "Raised marine features and phases of glaciation in the South Shetland Islands," *British Antarctic Survey Bulletin* 24, 1971, 45-111.
- [6] Clapperton, C.M., Sugden, D.E., "Holocene glacier fluctuation in South America and Antarctica," *Quaternary Science Reviews* 7, 1988, 185-198.
- [7] Pallas, R., James, T.S., Sabat, F., Vilaplana, J.M., Grant, D.R., "Holocene uplift in the South Shetland Islands: Evaluation of Tectonics and Glacio-Isostasy," *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*, 1997, 861-868.
- [8] Hayes, M.O., "Relationship between coastal climate and bottom sediment type on the inner continental shelf," *Marine Geology* 5, 1967, 111-132.
- [9] Davies, J.L., "Geographical variation in coastal development," *Oliver and Boyd*, Edinburgh, 1972, 204 pp.
- [10] Church, M., Ryder, J.M., "Paraglacial sedimentation: a consideration on fluvial processes conditioned by glaciation," *Geol. Soc. Am. Bull.* 83, 1972, 3059-3072.
- [11] Oxford, J.D., Forbes, D.L., Jennings, S.C., "Organisational controls, typologies and time scales of paraglacial gravel-dominated coastal systems," *Geomorphology* 48, 2002, 51-85.
- [12] Forbes, D.L., Syvitski, J.P.M., "Paraglacial coasts," in: R.W.G.a.W. Carter, C.D., (Ed), Coastal evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics, *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, 1994, pp. 373-424.
- [13] Oxford, J.D., "Discrimination of particle zonation on a pebble beach," *Sedimentology* 22, 1975, 441-463.
- [14] Wolmann, G., "A method of sampling coarse river bed material," *Trans. Am. Geoph. Union* 35, 1954, 951-956.
- [15] Kellerhals, R., Bray, D.I., "Sampling procedure for coarse fluvial sediments," *American Society of Civil Engineers* 97, 1971, 1165-1179.
- [16] Malavoi, J.R., "Le substrat des rivières à fond graveleux," DEA, Lyon III, 1986.
- [17] Araya, R., Hervé, F., "Estudio geomorfológico y geológico en las Islas Shetland del Sur, Antártica," *Publicaciones del Instituto Antártico Chileno* 8, 1966, 76.
- [18] Smellie, J.L., Pankurst, R.J., Thomson, M.R.A., Davies, R.E.S., "The geology of the South Shetland Islands: VI, stratigraphy, geochemistry and evolution," *British Antarctic Survey*, 1984, p. 85pp.
- [19] Azevedo, G.C., "Caracterização geológica, geoquímica e geocronológica de ilha Dee e parte de ilha Greenwich, arquipélago das Geociências, Antártica," Pós-grauação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 1992.
- [20] Santana, E., Dumont, J.F., "Geología de los alrededores de la Estación Ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado (Isla Greenwich) e Isla Dee, Península Antártica," *Acta Antártica Ecuatoriana* 1, 2002, 7-32.
- [21] Santana, E., Dumont, J.F., "Geology in the vicinity of the Ecuadorian Scientific Station Pedro Vicente Maldonado (Greenwich and Dee Islands, Antarctic Peninsula)," *Proceedings of the 9th International Symposium on Antarctic Earth Sciences*, Potsdam, 2003.
- [22] Pallas, R., Vilaplana, J.M., Sabat, F., "Geomorphological and neotectonic features of Hurd Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands," *Antarctic Science* 7, 1995, 395-406.

**Tabla 1.** Mediciones granulométricas de los cordones litorales. Ubicación de los puntos de medidas en la Fig. 2.

				<b>Tamaños de cantos rodados en unidades <math>\Phi</math></b>												
<b>Curva</b>	<b>Cordón</b>	<b>Lugar</b>	<b>Punto</b>	<b>Alt</b>	<b>-3</b>	<b>-3.5</b>	<b>-4</b>	<b>-4.5</b>	<b>-5</b>	<b>-5.5</b>	<b>-6</b>	<b>-6.5</b>	<b>-7</b>	<b>-7.5</b>	<b>-8</b>	<b>-8.5</b>
1	C3	Pevima	P9 - 089	8m	0	0	0	11	14	15	10	7	4	4	1	1
2	C3	Pevima	P9 - 090	8m	0	0	3	7	7	12	24	8	1	0	2	0
3	C3	Pevima	P9 - 091	8m	0	0	3	6	14	13	12	11	3	1	0	0
4	C6	Pevima	P9 - 092	13,5m	0	0	11	14	15	10	7	4	4	1	1	0
5	C6	Pevima	P9 - 093	13,5m	0	3	7	7	12	24	8	1	0	2	0	0
6	C6	Pevima	P9- 094	13,5m	0	3	6	14	13	12	11	3	2	0	0	0
7	C6	Pevima	P9 - 095	13,5m	0	1	8	8	11	11	6	2	2	2	0	0
8	C6	Pevima	P9 - 096	13,5m	0	0	1	5	9	13	9	8	4	0	0	0
9	C5	Pevima	P9 - 097	11,5m	0	0	1	5	10	13	9	8	4	0	0	0
10	C4	Pevima	P9 - 098	9,5m	0	0	0	3	9	17	14	10	1	0	0	0
11	C2A	Ballena	P9 - 114	5m	0	0	2	5	7	11	13	7	5	0	0	0
12	C2A	Ballena	P9 - 115	5m	0	0	4	19	11	13	0	2	1	0	1	0
13	C2A	Ballena	P9 - 116	5m	0	1	13	21	9	5	1	0	0	0	0	0
14	C2A	Ballena	P9 - 117	5m	0	0	3	8	9	7	19	4	0	0	0	0
15	C4	Pevima	P9 - 241	10m	0	0	14	8	5	4	5	5	7	2	0	0
16	C4	Pevima	P9 - 244	10m	0	0	15	15	15	5	0	0	0	0	0	0
17	C4	Pevima	P9 - 245	10m	0	6	12	18	9	4	1	0	0	0	0	0
18	C4	Pevima	P9 - 246	10m	0	6	18	8	10	7	1	0	0	0	0	0
19	C4	Pevima	P9 - 247	10m	0	2	9	13	6	6	5	3	1	4	1	0
20	C3	Ballena	P9 - 255	7m	0	0	0	1	3	8	16	14	5	0	4	0
21	C3B	Ballena	P9 - 257	7m	0	1	3	8	18	14	4	1	1	0	0	0
22	C3B	Ballena	P9 - 258	7m	0	0	12	12	7	11	4	3	1	0	0	0
23	C3B	Ballena	P9 - 259	7m	0	0	4	18	13	7	7	1	0	0	0	0
24	C2B	Ballena	P9 - 260	5m	0	0	0	5	13	13	10	4	5	0	0	0
25	C2B	Ballena	P9 - 261	5m	0	0	0	6	8	15	16	5	0	0	0	0
26	C2B	Ballena	P9 - 262	5m	0	0	2	4	9	10	12	13	0	0	0	0
27	C1	Ballena	P9 - 263	1-2m	0	0	5	8	12	11	8	3	2	1	0	0
28	C1	Ballena	P9 - 265	1-2m	0	0	2	3	10	13	16	5	0	1	0	0
29	C1	Ballena	P9 - 266	1-2m	0	0	4	11	14	10	7	3	1	0	0	0
30	C1	Ballena	P9 - 267	1-2m	0	0	3	5	10	8	13	8	2	0	0	0
31	C1	Lobo	P9 - 300A	1.5m	0	0	0	2	7	10	18	11	1	1	0	0
32	C1	Lobo	P9 - 300M	1.2m	0	1	12	16	10	8	3	0	0	0	0	0
33	C1	Lobo	P9 - 300B	1m	14	8	23	4	1	0	0	0	0	0	0	0
34	C3A	Ballena	P9 - 301	7m	1	8	13	14	7	4	0	2	0	0	1	0
35	C3A	Ballena	P9 - 302	7m	0	1	6	13	23	5	1	0	0	0	0	0
36	C3A	Ballena	P9 - 303	7m	0	1	6	10	11	14	3	2	0	1	2	0
37	C2	Ballena	P9 - 381	5m	0	0	0	2	1	10	11	12	9	4	1	0
38	C1	Ballena	P9 - 382	1m	0	0	1	8	14	12	9	5	1	0	0	0
39	C1	Ballena	P9 - 383	1-2m	0	0	0	1	4	10	14	7	7	5	0	2
<b>Suma</b>					<b>15</b>	<b>32</b>	<b>157</b>	<b>184</b>	<b>206</b>	<b>172</b>	<b>168</b>	<b>100</b>	<b>39</b>	<b>17</b>	<b>9</b>	<b>2</b>

