

AUSCULTACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LA RECESIÓN Y EROSIÓN EN LA COSTA ACANTILADA DEL ENTORNO PRÓXIMO A LA BASE ANTÁRTICA ESPAÑOLA GABRIEL DE CASTILLA (ISLA DECEPCION).

Paredes Bartolomé, Carlos¹; Ropero Azañón, Miguel Ángel²; Romero Martín, José²; Martínez Almajano, Santiago³; Garrido Simón, Jerónimo³; Castedo Ruiz, Ricardo⁴; de la Vega Panizo, Rogelio⁴; Llorente Isidro, Miguél⁴; de Pablo Hernández, Miguél Ángel⁵

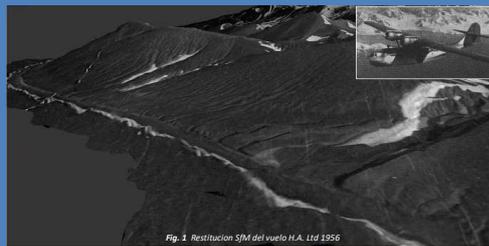
(1) Dpto. de Ingeniería Geológica y Minería, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, carlos.paredes@upm.es - ricardo.castedo@upm.es - rogelio.delavega@upm.es
 (2) Laboratorio de Ingenieros del Ejército «General Morán», Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Estación Terrazas», Madrid, España, roperomartin@inta.es - romeromartin@inta.es
 (3) Escuela Politécnica Superior del Ejército, Ejército de Tierra, Madrid, España, santiago.almajano@er.mde.es - jparru@er.mde.es
 (4) Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España, m.llorente@igme.es
 (5) Dpto. de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, España, miguelangel.depablo@uah.es

IX SIMPOSIO DE ESTUDIOS POLARES

5 - 7 DE SEPTIEMBRE DE 2018, MADRID, ESPAÑA

1 Introducción

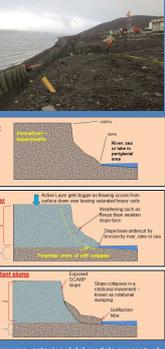
La pérdida del territorio por acciones de erosión costera tiene un impacto económico determinante en infraestructuras y biodiversidad. El análisis y seguimiento de este proceso es un problema particularmente grave en las regiones polares. El efecto del cambio climático y la consecuente variación del permafrost influyen en la tasa de retroceso en sus costas. Las tasas de erosión costera están afectadas por la disminución de la capa de hielo marino, los ciclos de hielo/deshielo estacional, y el aumento del nivel del mar que permite su golpeo sobre la costa. Desafortunadamente, la mayoría del conocimiento actual sobre la evolución del paisaje costero acantilado se refiere a áreas con climas templados y materiales poco cohesivos. La recesión de los acantilados es muy compleja implicando procesos marinos y subaéreos que interactúan acopladamente, siendo especialmente significativo en Isla Decepción frente a la Base Antártica Española Gabriel de Castilla. Para la cuantificación y análisis sus inmediaciones de este proceso se han identificado las sucesivas posiciones de la cresta del acantilado a lo largo del tiempo, su ubicación y error mediante técnicas geomáticas de análisis y sobre las ortomogénes aéreas (velos históricos y RPAS) restituídas mediante técnicas *Structure from Motion (SfM)*, para conocer las tasas de recesión costera.



Estas tasas están condicionadas por la pérdida del permafrost, reduciendo la cohesión de los materiales expuestos por las variaciones en la su capa activa, tanto a lo largo de la costa como transversalmente, lo cual se ha constatado por el importante acarreamiento, resultado en superficie del colapso de lentejones de permafrost próximos al frente del acantilado, reconocidos en los resultados de los perfiles ERT realizados en la zona. El acoplamiento de estos fenómenos mejora los efectos de erosión costera hacia el interior. Se ha desarrollado un modelo predictivo estadístico apoyado en técnicas de ajuste por mínimos cuadrados ponderados para conocer la distribución costera de la tasa de recesión promedio y con el que simular estocásticamente a corto plazo y analizar la sensibilidad de la recesión costera en el acantilado frente a la BGDc.

2 Modelo conceptual

- A lo largo de la vida de la BGDc, y especialmente desde el año 2009, se ha ido observando en la **evolución geomorfológica** de su entorno una manifiesta **recesión del acantilado**, desnivel de pequeña altura, un talud de unos 2,5 a 3,5 m de altura, en cuya base se desarrolla una playa de material tamaño lapilli, parcialmente afectado por la actividad antrópica, particularmente en las inmediaciones del frente a la BGDc, que separa la planicie sobre la que se asienta la BGDc de la playa.
- Esta recesión se manifiesta especialmente tras temporales marinos y tormentas, provocando la sucesiva pérdida de terreno frente a la base, que se repone mecánicamente, o se protege mediante estructuras, perturbando el paisaje y la dinámica de playa propia de la zona.
- El comportamiento del frente del acantilado se ve a su vez seriamente afectado por las variaciones térmicas, al estar su competencia fuertemente influenciada por el espesor de la capa activa que forma el permafrost. En este caso el efecto del cambio climático favorece muy probablemente el incremento de esta recesión al reducir la competencia del material que se ve afectado por el ataque del oleaje marino.
- La recesión puede ser debida, en gran medida, a la **expansión del mar exterior de la Bahía** **interior**, tanto en su fase líquida (verano austral) como sólida (banquisa por congelación) y a la **inestabilidad térmica** sobre los materiales afectados por las variaciones térmicas en la capa activa.
- Las condiciones mecánicas a las que se encuentra sometido el acantilado son tremendamente variables lo que da lugar a la combinación y acoplamiento de una amplia abanico de procesos erosivos, desde los efectos de compresión sobre el repíe por la dilatación del hielo de la banquisa, la cizalla por el desplazamiento de los bloques helados arrastrados por las corrientes laterales, y a la compresión debida al impacto del oleaje sobre el talud.



3 Modelo estadístico

Entre los diferentes modelos de simulación de la evolución del acantilado costero, los modelos estadísticos, frente a los numéricos de proceso-respuesta, permiten **cuantificar el comportamiento pasado y predecir a corto plazo de la recesión costera** a partir de lo ocurrido en un intervalo de tiempo histórico cuando los datos son escasos, suponiendo:

- La tasa de recesión α velocidad de cambio de la línea de costa es constante.
- El cambio γ producido en la línea de costa es proporcional al tiempo X .

Con estas hipótesis se formula un modelo prototipo que explique la variabilidad experimental de las medidas de desplazamiento de la costa Y , frente a una línea referencia (baseline), en función del tiempo X , en forma de un modelo lineal simple donde la variable aleatoria ϵ representa el error de medida o en general el efecto de otros factores:

$$Y = X\beta + \epsilon$$

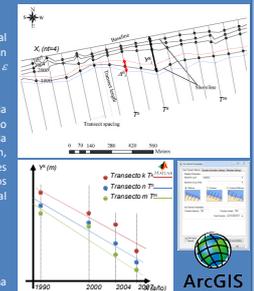
La estimación de los parámetros del modelo son estimados localmente, subdividiendo la línea de costa en N transectos equiespaciados P_i sobre DSAS-ArcGIS y con un método mínimos cuadrados (MSM) ponderados implementado en Matlab. Los criterios para la elección de este método son: (1) utiliza todos los datos sin discriminación, independientemente de los cambios en la tendencia o la precisión, (2) es computacionalmente simple, y (3) se basa en conceptos estadísticos comprobados. Considerando los valores locales de R^2 , α y γ y la incertidumbre en la localización asociada al trazado de la línea de costa en cada punto la función objetivo del método es:

- sin incertidumbres ($\alpha = \beta$) con incertidumbre $\sigma = R \cdot \alpha$ (α : Gaussiana heterocedástica)
- con incertidumbres ($\alpha \neq \beta$) (α : Gaussiana heterocedástica)

$$RSS(\beta) = \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i \beta)^2$$

$$wRSS(\beta) = \sum_{i=1}^N w_i (Y_i - X_i \beta)^2$$

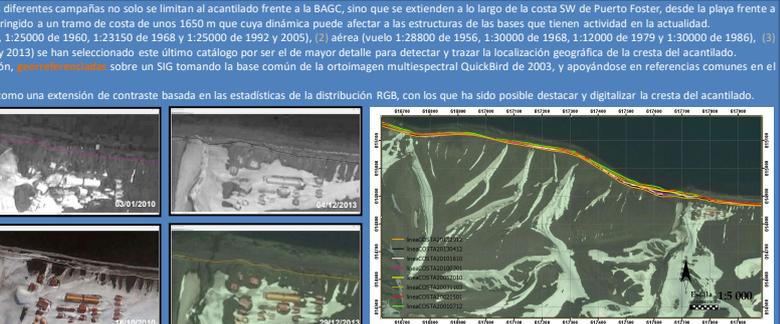
La calidad en los resultados de la minimización para el ajuste de los parámetros se determina con los estadísticos del error medio cuadrático (stde), de la covarianza (cov), del coeficiente de correlación (ρ) y del coeficiente R^2 .



4 Zona de Estudio

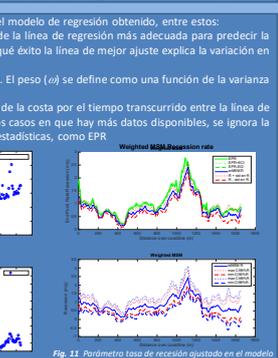
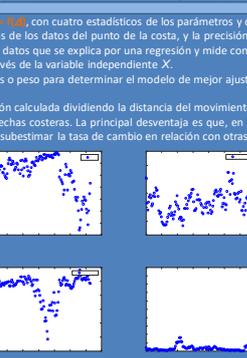
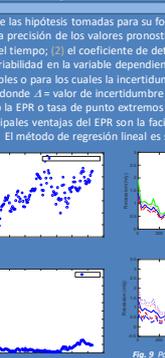
Los efectos registrados presencialmente por el personal militar y científico a lo largo de las diferentes campañas no solo se limitan al acantilado frente a la BGDc, sino que se extienden a lo largo de la costa SW de Puerto Foster, desde la playa frente a la Base Argentina Decepción hasta la Punta de Colatinas. Sin embargo el estudio se ha restringido a un tramo de costa de unos 1650 m que cuya dinámica puede afectar a las estructuras de las bases que tienen actividad en la actualidad.

- De la información geográfica disponible en el proyecto: (1) cartográfica (mapa de 1829, 1:25000 de 1960, 1:23150 de 1968 y 1:25000 de 1992 y 2005), (2) aérea (vuelo 1:28800 de 1956, 1:30000 de 1979 y 1:30000 de 1986), (3) satelital (quickbird 1:3000 de 2003 y Google Earth Pro de 2001, 2002, 2003, 2005, 2010 y 2013) se han seleccionado este último catálogo por ser el de mayor detalle para detectar y trazar la localización geográfica de la cresta del acantilado.
- Para lo cual las ocho imágenes disponibles han sido descargadas a la máxima resolución, **georeferenciadas** sobre un SIG tomando la base común de la ortomogénes multispectral QuickBird de 2003, y apoyándose en referencias comunes en el terreno y edificaciones.
- Cada imagen ha sido trabajada con un conjunto de filtros de visualización, que actúan como una extensión de contraste basada en las estadísticas de la distribución RGB, con los que ha sido posible destacar y digitalizar la cresta del acantilado.



5 Analisis descriptivo

La calidad del modelo y la validez estadística de las hipótesis tomadas para su formulación se han evaluado para los casos $\alpha = \beta$ y $\alpha \neq \beta$, con cuatro estadísticos de los parámetros y del modelo de regresión obtenido, entre estos: (1) el error estándar de la estimación valora la precisión de los valores pronosticados de α y al compararlos con los valores conocidos de los datos del punto de la costa, y la precisión de la línea de regresión más adecuada para predecir la posición de una costa para un punto dado en el tiempo; (2) el coeficiente de determinación R^2 es el porcentaje de varianza en los datos que se explica por una regresión y mide con qué éxito la línea de mejor ajuste explica la variación en los datos, cuantificando la proporción de la variabilidad en la variable dependiente. Y que se explica por el modelo de regresión a través de la variable independiente X . En el MSM ponderado, a los datos más confiables o para los cuales la incertidumbre de la posición es menor, se les da mayor énfasis o peso para determinar el modelo de mejor ajuste. El peso (w_i) se define como una función de la varianza en la incertidumbre de la medición: $w_i = 1/\Delta_i^2$, donde Δ_i = valor de incertidumbre de la línea costera. Además de la tasa de recesión se ha calculado la EPR o tasa de punto extremos finales que es una cota máxima de la tasa de recesión calculada dividiendo la distancia del movimiento de la costa por el tiempo transcurrido entre la línea de costa más antigua y la más reciente. Las principales ventajas del EPR son la facilidad de cálculo y el requisito mínimo de solo dos fechas costeras. La principal desventaja es que, en los casos en que hay más datos disponibles, se ignora la información adicional que estos proporcionan. El método de regresión lineal es susceptible a los efectos atípicos y también tiende a subestimar la tasa de cambio en relación con otras estadísticas, como EPR.



6 Simulaciones

Para obtener un **pronóstico de la evolución y comportamiento de la línea de costa** en la zona objeto de estudio se ha llevado a cabo un muestreo aleatorio simple de la función de densidad de probabilidad de la tasa de recesión estimada (m/a), sin considerar (ni ponderando) y considerando (si ponderando) los errores en la delimitación de la costa, sobre cada transecto y los estadísticos desviación estándar (stde) de la tasa y su intervalo de incertidumbre (C.I. al 95%).

La estabilidad del algoritmo numérico estocástico de simulación ha sido mejorada suponiendo que la erosión se realiza de forma continuada a lo largo del año, suprimiendo la estacionalidad del proceso erosivo, mediante la reducción del paso de tiempo de un año a un mes y el rescalado temporal de m/año a m/mes en la variable aleatoria tasa de recesión. Los resultados de la simulación muestran la ubicación de la cresta del acantilado anualmente desde el 2014 al 2024 (10 años de simulación).



7 Conclusiones

- En este trabajo se presentan los primeros resultados de **análisis, caracterización, modelización, simulación y seguimiento** que se están llevando a cabo, habida cuenta del hecho continuado de la **pérdida de terreno** y consecuente **recesión**, que se ha constatado en el tramo de acantilado frente a la Base Antártica Española Gabriel de Castilla (Puerto Foster, Isla Decepción).
- El estudio iniciado con la fotointerpretación y análisis sobre Sig de la serie histórica de ocho imágenes satelitales catalogadas sobre la plataforma libre Google Earth, entre 2001 y 2013, ha puesto de manifiesto que existe una **variación temporal** en la localización geográfica de la cresta del acantilado, lo que corrobora las apreciaciones del personal recogidas en las campañas.
- Utilizando diferentes filtros sobre el inventario de ocho imágenes se ha trazado digitalmente la línea de la cresta del acantilado, así como las bandas de incertidumbre a su alrededor en la localización geográfica.
- Assumiendo que la poligonal digitalizada es la línea de costa y que modifica su posición fruto de la acción marina que erosiona los materiales proclivales del terreno en el pie del acantilado, suponiendo que la tasa de recesión o velocidad de cambio de esta línea es constante, que el cambio producido es proporcional al tiempo transcurrido y que el proceso, siendo esporádico y aleatorio en tiempo y el espacio, puede modelarse mediante su función de distribución de probabilidad se ha propuesto un **modelo línea recesión-tiempo** que permita hacer un **pronóstico de la evolución de la costa a corto plazo**.
- Este modelo ha sido obtenido utilizando una técnica de **mínimos cuadrados ponderados** sobre el conjunto de datos resultante de la discretización espacial de la línea de costa en 164 transectos espaciados 10 m entre sí, en cuyos puntos, para cada fecha, se ha determinado la distancia a una línea de base de referencia y teniendo en cuenta la incertidumbre en su digitalización.
- Valores superiores a 0.9 en la mayoría de los transectos del coeficiente de correlación lineal indican que estadísticamente no son descartables las hipótesis formuladas para desarrollar el modelo propuesto, que los errores estándar en la estimación se reducen considerando la incertidumbre en el trazado de la costa y que su capacidad de pronóstico es superior al 80%.
- Las **simulaciones numéricas estocásticas** realizadas con el modelo obtenido se muestran **robustas** a las incertidumbres, no solo de la información geográfica utilizada en su ajuste sino a la de la función de distribución de los parámetros del modelo.
- Los trabajos de ortofotogrametría SfM que se están realizando actualmente sobre los datos de vuelos históricos (1956, 1968, 1979 y 1986) y actuales (con RPAS DGPS) sobre la zona permitirán ampliar el intervalo temporal de **datos históricos** que corrobore las hipótesis, así como calibrar y mejorar la formulación del modelo hacia uno de tipo proceso respuesta que incorpore la física de los procesos geomecánicos, la variabilidad del permafrost (ERT), las condiciones batimétricas (IHM) y el régimen dinámico del mar en la zona.