

El relieve kárstico de Gibraltar como registro morfosedimentario durante el Cuaternario (Mediterráneo occidental)

J. RODRÍGUEZ VIDAL ⁽¹⁾, L.M. CÁCERES ⁽¹⁾, F.J. GRACIA ⁽²⁾,
A. MARTÍNEZ AGUIRRE ⁽³⁾, C. FINLAYSON ⁽⁴⁾, F. GILES ⁽⁵⁾,
A. SANTIAGO ⁽⁶⁾ Y C. PEGUERO ⁽¹⁾

(1) Universidad de Huelva, Departamento de Geodinámica y Paleontología, Facultad de Ciencias Experimentales, 21819 Palos de la Frontera, (E-mail: jrvidal@uhu.es).

(2) Universidad de Cádiz, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias del Mar, 11510 Puerto Real.

(3) Universidad de Sevilla, Departamento de Física Aplicada I, EUITA, ctra. de Utrera km 1, Sevilla.

(4) The Gibraltar Museum, 18-20 Bomb House Lane, Gibraltar.

(5) Museo Municipal, El Puerto de Santa María, Cádiz.

(6) Archivo Histórico Municipal, Jerez de la Frontera, Cádiz.

ABSTRACT

Several sets of staircased Quaternary marine deposits can be observed along the Gibraltar coast ranging from 1 to 210 m above the present mean sea level (MSL). Geomorphological mapping establishes, from the relationship between shore, scree and dune sedimentary formations, five main morphotectonic steps on the Rock: marine terraces between 1 and 25 m, 30-60 m, 80-130 m, 180-210 m, and above. Each terrace level and its slope-aeolian linked sediments is backed by a steep relict sea cliff along its landward margin, so forming a composite cliff.

The most recent coastal landforms and sediments are associated with the last 250 ka linked to Oxygen Isotope Stages (OIS) 1, 3, 5 and 7. These landforms shape a morphosedimentary highstand-lowstand sequence, with several staircased and offlapped episodes, included into a major morphotectonic step. A great escarpment or palaeocliff usually separates the marine terraces of OIS 9 from those of OIS 7.

The Gibraltar mean tectonic uplift value of 0.05 ± 0.01 mm/year is approximately maintained from 200 ka to the present. Previously, at least to 250 ka, the mean uplift rate was higher (0.33 ± 0.05 mm/year), possibly compatible with major tecto-



Foto 1:

La actual península de Gibraltar con su cara Este escarpada (izquierda), morfoodinámicamente muy activa, y la cara Oeste (derecha) controlada estructuralmente y de menor relieve y actividad.

nic events in response to a NNW-SSE compressive stress field between Africa and Eurasia.

Key words: *rocky coast, coastal sedimentation, tectonoestasy, Upper Pleistocene, Gibraltar Strait.*

INTRODUCCIÓN

El Peñón de Gibraltar es una pequeña península rocosa de unos 6 km² de superficie, alargada en dirección meridiana unos 5,2 km y de 1,6 km de ancho, con perfil asimétrico, acantilado al Este y más tendido al Oeste (Foto 1).

ROSE y ROSENBAUM (1991) dividieron este relieve en tres dominios: a) el Istmo, un tómbolo arenoso a unos 3 m.s.n.m. que une Gibraltar con el continente; b) la Divisoria Principal, abrupta cresta con altitudes máximas de 400 m.s.n.m. formada por dolomías y calizas jurásicas; y c) la Planicie Meridional, suavemente inclinada al Sur y escalonada en dos plataformas (Windmill Hill Flat y Europa Flat, Foto 5) desde los 130 m hasta el nivel del mar, originadas por la acción erosiva de las olas.

El Peñón es un afloramiento de carbonatos y margas, asignadas geológicamente al Grupo Gebel Tarik (ROSE y ROSENBAUM, 1991) y dividido en tres formaciones: Margas de Little Bay, Calizas de Gibraltar y Margas de Catalan Bay. Todo el conjunto está fracturado en un juego de diaclasas y fallas con orientaciones NE-SW y NW-SE, según una clara componente transcurrente (ROSE y ROSENBAUM, 1994), consecuencia de la colisión tectónica entre las placas africana y europea.

El relieve de Gibraltar está condicionado por dos grupos de factores y procesos (RODRÍGUEZ-VIDAL y GRACIA, 1994, 2000): la estructura tectónica, que condiciona su forma, y los procesos marinos ligados a las fluctuaciones eustáticas durante el Cuaternario. La conservación de los depósitos y modelados de edad cuaternaria ha sido posible gracias a la rápida litificación de los sedimentos, ya que las aguas de escorrentía son muy ricas en calcio.

Existe una clara vinculación entre cambios eustáticos y tectónicos de la línea de costa y sus modelados resultantes. Cuando la elevación tectónica excede a la velocidad de ascenso del nivel del mar, o cuando el nivel desciende,



Foto 5:

Plataformas escalonadas de erosión marina de Windmill Hill Flats (nivel superior) y Europa Flats (nivel inferior), separadas por paleoacantilados.



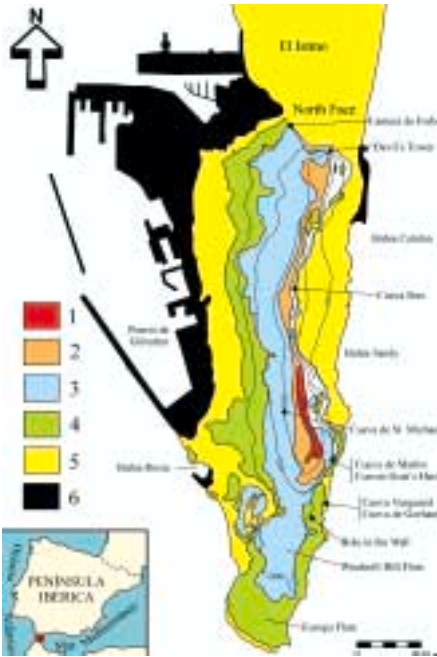


Figura 1:

Mapa morfoestructónico de la península de Gibraltar. Curvas de nivel cada 100 m. Leyenda: 1 a 5, unidades morfoestructónicas escalonadas (MTU), de antigua a reciente, separadas por escarpes o paleoacantilados. 6, Terreno ganado al mar.

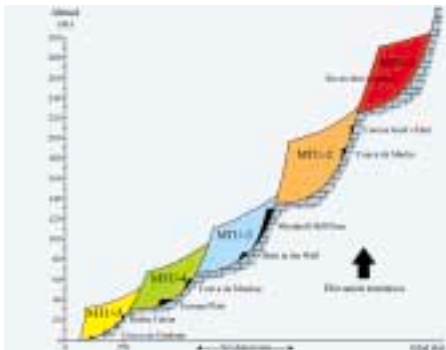


Figura 4:

Esquema morfoestructónico sintético de un perfil-tipo en la ladera del Peñón de Gibraltar, representativo del mapa de la Figura 1. Se diferencian cinco unidades morfoestructónicas (MTU) con la localización altitudinal de algunas de las terrazas marinas que les sirven de referencia.



Foto 2:

Playa marina fosilizada (beach-rock) de edad Tirreniense al pie de un fuerte acantilado al SE de Gibraltar. Governor's Beach, junto a la cueva de Gorham.

entonces los acantilados costeros quedan colgados y preservados en la ladera como una forma relictas; en caso contrario, los acantilados sufren un fuerte retroceso erosivo o, incluso, quedan sumergidos. En los últimos 100 ka (GOY et al., 1995), las tasas de elevación relativa del nivel del mar han variado entre 0.04 y 0.06 mm/año, por lo que los acantilados y las playas han sido elevadas rápidamente.

FORMACIONES SEDIMENTARIAS

Los primeros estudios documentados sobre los depósitos cuaternarios de Gibraltar fueron realizados por SMITH (1846) y RAMSAY y GEIKEI (1878). ROSE y ROSENBAUM (1990, 1991) reconocieron y cartografiaron estas formaciones y, más tarde, fueron detenidamente analizadas por ROSE y HARDMAN (1994, 2000). Los sedimentos son de origen marino y continental, y están formados por arenas y cantos de playa, arenas eólicas, brechas de ladera y materiales kársticos, como arcillas, bloques y espelotemas.

La cartografía geomorfológica de estos depósitos, y su relación espacio-temporal, permite diferenciar cinco peldaños morfoestructónicos principales (Figuras 1 y 4): terrazas marinas entre 1 y 25 m (p.e. cueva de Gorham), 30 y 60 m (p.e. plataforma de Europa), 80 y 130 m (p.e. plataforma de Windmill Hill), 180 y 210 m (p.e. cueva de Martin) y, probablemente, otros depósitos a mayor altitud, aún no verificados.

Cada conjunto de terrazas marinas, y sus depósitos eólicos y de ladera asociados, se apoyan sobre una abrupta pared acantilada; por lo que la asociación escalonada de todas ellas, a lo largo de la vertiente oriental del Peñón, forman un "acantilado compuesto" (RODRÍGUEZ-VIDAL y GRACIA, 2000). Es evidente, que los peldaños morfoestructónicos más altos son más antiguos que los de cotas inferiores, pudiendo abarcar casi toda la historia del Cuaternario.

1. Terrazas marinas

Las líneas de costa levantadas en el Peñón se evidencian por sedimentos marinos y otros modelados que se localizan, preferentemente, en sus flancos meridional y oriental. Los estudios de autores precedentes indican niveles marinos relictos a 1-3, 7-9, 15-17, 20-25, 30-40, 50-60, 80-86, 90-130, 180-190, 210, y posiblemente 240-250 y 300 m.s.n.m. (ROSE y ROSENBAUM, 1990, 1991). La disposición cartográfica y morfoestratigráfica de las terrazas, su contenido faunístico y las edades de Th/U (ZAZO et al., 1999) aportan una razonable interpretación cronoestratigráfica de la secuencia marina, sobre todo de las terrazas más recientes (Figura 2 y Foto 2).

El último escalón morfoestructónico en la costa emergida de Gibraltar está relacionado con los estadios isotópicos 7, 5 y 1. Sus terrazas marinas se localizan a 25-20 m, 17-15 m y 10 m (OIS 7), 5 m (OIS 5c), 2-1,5 m (OIS 5a), y 1,5 m.s.n.m. (OIS 1). Todas ellas representan situaciones interglaciales de altas paradas de nivel del mar (HOYOS et al., 1994, ZAZO et al., 1994a), aunque algunas otras terrazas (OIS 3) están sumergidas en la costa oriental (FLEMMING, 1972).

Durante el estadio isotópico 7, perteneciente al Penúltimo Interglacial (250-195 ka), se han datado terrazas marinas del subestadio 7e y 7a (GOY et al., 1995; LARIO, 1996), a cotas entre 25-20, 17-15 m y 10-7 m, respectivamente.

El Último Interglacial (OIS 5), entre 130 y 74 ka, está representado en Gibraltar por el subestadio 5e (132 ka y 125-117 ka). En Punta Europa, HOYOS et al. (1994) dataron un resto de terraza a 5,25 m (92,5 ka en el subestadio 5c), y en la cueva de Gorham a 1,0 m (81 ka, en el subestadio 5a).

Las terrazas marinas del estadio isotópico 3, entre 59 y 24 ka, no se encuentran emergidas. Sólo las formaciones eólicas y de ladera, vinculadas a ellas, se han datado en las cuevas de Gorham, Vanguard e Ibex, y en el abrigo de Devil's Tower, así como en los espelotemas de Gorham y de Punta Europa (Figura 2).

Los depósitos marinos holocenos (OIS 1) se relacionan con el alto nivel

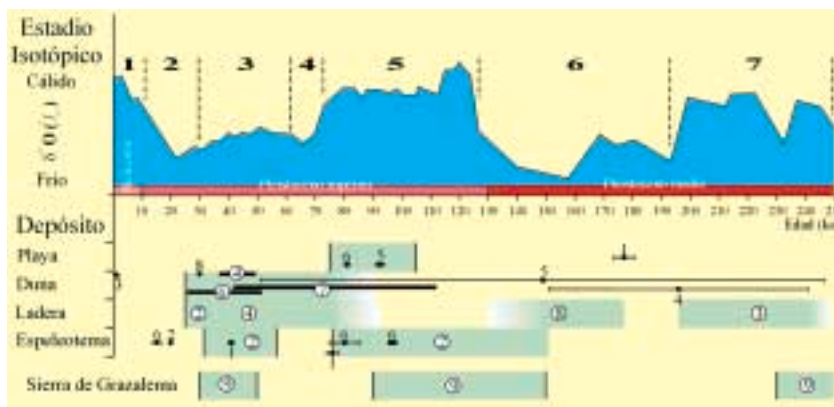


Figura 2: Dataciones de las formaciones sedimentarias hasta ahora estudiadas en el Peñón, con fechas puntuales (punto negro), conjuntos de fechas en un mismo lugar (barra negra gruesa con número en círculo blanco), y secuencia de dataciones (número en círculo blanco sobre banda sombreada en gris). Comparación con la secuencia isotópica marina (según SHACKLETON y OPDYKE, 1973 y WILLIAMS et al., 1988). Referencias de las dataciones: (1) GOY et al., 1995; LARIO, 1996; ZAZO et al., 1999, (2) Dataciones propias, (3) RHODES, en ROSE y HARDMAN, 2000, (4) RHODES et al., 2000, (5) PETTITT y BAILEY, 2000, (6) DÍAZ DEL OLMO, 1994, (7) RINK et al., 2000, (8) HOYOS et al., 1994, (9) RODRÍGUEZ-VIDAL et al., 1999.

Flandriense, datado en las costas españolas en 6450 años BP (ZAZO et al, 1994b). A partir de ese momento se formaron las playas de Rosia Bay, Catalan Bay y Sandy Bay, entre otras, incluyendo las arenas del istmo (ROSE y ROSENBAUM, 1991).

2. Arenas eólicas

Los vientos de Levante y Poniente han tenido gran importancia en la génesis de formaciones dunares, aunque para ello era necesaria la existencia de playas arenosas próximas. El abrupto relieve del Peñón ha favorecido la formación de dunas rampantes que, como en el caso de la bahía Catalan, ascendieron hasta 300 m.s.n.m. a favor de laderas y acantilados antiguos que han quedado fosilizados (Fotos 1 y 3)

Estas dunas, junto con las de la vertiente occidental (Alameda Sands), se formaron entre 75 y 40 ka (OIS 3 y 4) (Figura 2) y rellenaron gran parte de las cuevas (Foto 4) y abrigos a baja altitud (MACPHAIL y GOLDBERG, 2000; PETTITT y BAILEY, 2000; RHODES et al., 2000). Aunque la máxima intensidad eólica se localizó entre 50 y 40 ka, coincidiendo con el final del relleno de la cueva Ibex (RHODES et al., 2000), y la cueva Vanguard (GOLDBERG y MACPHAIL, 2000; PETTITT y BAILEY, 2000).

Otras formaciones eólicas más antiguas han sido reconocidas por ROSE y HARDMAN (2000) en la zona de Monkey's Cave, en la costa sudeste. Por su situación geomorfológica, le suponemos una edad inmediatamente anterior a 250 ka, vinculada con la cuarta unidad morfotectónica (OIS 8) y con las terrazas marinas entre 60 y 30 m (Figura 4).

De todas maneras, y una vez realizada la cartografía geomorfológica y tectono-eustática del Peñón, se han localizado formaciones dunares a mayores altitudes, hasta 210 m (cueva de Martin), relacionadas con antiguos episodios cuaternarios que podrían fecharse en el Pleistoceno inferior.

3. Brechas de ladera

Los depósitos gravitacionales de ladera son las formaciones cuaternarias más abundantes en el Peñón de Gibraltar y se localizan en relación con todos los escalones morfotectónicos, tanto sirviendo de techo a las unidades morfo-sedimentarias como intercaladas en ellas. Los sucesivos episodios de brechas suelen estar separados por paleosuelos o por depósitos eólicos. Los clastos son cantos y bloques muy angulosos, con matriz arcillosa rojiza y fuerte cementación carbonatada.

FLEMMING (1972) observó la continuidad de estas brechas bajo el mar, al menos hasta 20 m de profundidad y ROSE y HARDMAN (1994) han comprobado como algunos depósitos fueron acumulados directamente en medio marino.

La datación de estos episodios de ladera es compleja, aunque se puede realizar gracias a los depósitos vinculados, como dunas y espeleotemas, y a su posición geomorfológica dentro del modelo tectono-eustático planteado (Figura 2).

Algunas brechas de ladera son arrastradas al interior de fisuras tectónicas y oquedades kársticas, como el famoso yacimiento de la bahía de Rosia, donde gran cantidad de restos de fauna se incluyen en el sedimento. Este tipo de afloramiento de dunas rampantes por la fachada Este de Gibraltar, que ascienden hasta 300 m de altitud. Sector costero entre Catalan Bay y Sandy Bay.



Foto 3: Afloramiento de dunas rampantes por la fachada Este de Gibraltar, que ascienden hasta 300 m de altitud. Sector costero entre Catalan Bay y Sandy Bay.

ramiento es muy frecuente en la cara sudoeste del Peñón.

4. Sedimentos kársticos

Aunque no muy abundantes en cantidad, las formaciones kársticas son un rasgo característico del paisaje de Gibraltar. Las más de 140 cavidades catalogadas, con frecuente relleno detrítico y químico, hacen del Peñón uno de los registros cuaternarios más completos e interesantes del Mediterráneo occidental.

El intenso vínculo entre la evolución del relieve externo y el endokarst, facilita que en muchas cuevas se encuentren potentes sedimentos alóctonos: eólicos, de ladera, marinos y de arroyada. Las formaciones autóctonas incluyen todo tipo de espeleotemas, brechas gravitacionales, arcillas y limos de descalcificación, niveles orgánicos, carbonosos, y sedimentos fosfatados.

Los depósitos químicos de cuevas son muy importantes en la historia del Cuaternario. La abundancia y variedad de espeleotemas en Gibraltar, así como el elevado número de dataciones que se han realizado y están en curso, ofrecen un registro privilegiado para la reconstrucción paleoambiental (Figura 2). Hasta ahora, las muestras han sido recogidas en Punta Europa, cuevas de Gorham, St. Michael, Beefsteak y Rich Sand y la cantera de Forbes (GILES et al., 2001).

En la actualidad estamos trabajando en un amplio afloramiento de espeleotemas en las proximidades de la cueva de St. Michael, con una secuencia petrográfica compleja de facies de escurrimiento, goteo, salpicadura, gour y poza, que abarca entre 150 y 30 ka (Figura 2).

Estos afloramientos de Gibraltar, junto con otros de zonas regionalmente próximas (p.e. Sierra de Grazalema, en Figura 2, según RODRÍGUEZ-VIDAL et al., 1999), serán útiles en el futuro establecimiento de una secuencia climática regional. Los datos, hasta ahora disponibles, muestran cierta correspondencia de los estadios isotópicos 3 y 5 (cálido y húmedo) con la formación preferente de espeleotemas; a semejanza de la evolución climática en el Norte de África (ROGNON, 1996), con dos periodos pluviales (125-70 ka y 40-25 ka) durante el Pleistoceno superior.



Foto 6:

Ladera de acantilados-compuestos de la costa SE de Gibraltar, donde cada cantil separa una unidad morfotectónica (MTU) con un completo registro morfosedimentario (MSU).

MODELADOS EROSIVOS

En las costas rocosas como la de Gibraltar, la situación relativa del nivel del mar establece la porción de litoral que está sometida a los procesos marinos y a los procesos continentales. La evolución de las laderas y el sistema kárstico también están relacionados con los cambios del nivel del mar, ya que éste es el nivel de base para todos ellos; es decir, el nivel freático y marino define una superficie morfogénica de referencia, en este tipo de costa rocosa aislada, con la siguiente secuencia de modelados: plataforma de abrasión – cueva/balma – acantilado – ladera. Esta secuencia puede repetirse temporalmente a lo largo de la vertiente montañosa, generando superposiciones erosivas o escalonamientos de modelados.

1. Plataformas de abrasión y acantilados marinos

Las plataformas de abrasión se extienden desde el nivel de marea alta, en la base del acantilado, hasta el de marea baja. En Gibraltar podemos encontrar este modelado de manera funcional, sumergido, fosilizado bajo depósitos de playa pleistocena y relictos en el relieve. Los dos ejemplos más representativos son las plataformas meridionales de Windmill Hill Flats, de 130 a 90 m, y de Europa Flats, de 40 a 30 m (ROSE y ROSENBAUM, 1994) (Foto 5).

Los acantilados verticales o en voladizo son típicos de medios marinos dominados por las olas (GRIGGS y TRENHAILE, 1994). Los acantilados que circundan Gibraltar (Foto 2) se formaron por erosión costera durante periodos de alto relativo del nivel del mar (highstand) o de estabilidad (stillstand). Los “acantilados compuestos” de Gibraltar (Foto 6) son el reflejo de la actuación conjunta de los

procesos marinos, subaéreos y de elevación tectónica durante el Cuaternario.

El flanco oriental del Peñón está expuesto a las tormentas de levante, que proceden del Mediterráneo occidental y Mar de Alborán, con un fetch de más de 1500 km (FLEMMING, 1972). Esto significa que la ladera Este está sujeta a una acción erosiva mucho más intensa que la Oeste, favoreciendo un marcado y rápido retroceso costero, además de una variada gama de modelados (Foto 1).

El escalón morfotectónico más reciente (MTU-5), con una edad menor de 250 ka, tiene a su espalda un acantilado relicto. La datación de estos acantilados se realiza a partir de las terrazas marinas que se encuentran a su pie (Foto 2), como la de +9m (Devil's Tower y cueva de Gorham) con una edad de 180 ka, y, por correlación espacial, con los otros modelados erosivos marinos vinculados (North Face).

2. Laderas escalonadas

La evolución morfosedimentaria del Peñón (Figura 3) está indudablemente marcada por las sucesivas fluctuaciones del nivel del mar durante el Cuaternario. Este nivel sirve como plano de referencia para los perfiles de equilibrio de las laderas y su grado de evolución está relacionado con el tiempo que ese nivel se mantiene estable (SELBY, 1982).

Las laderas son, en general del tipo cantil-talud, donde han dominado los procesos gravitacionales. Su inclinación está comprendida entre 35 y 45°, cubierta o no por detritivos procedentes del retroceso de los cantiles.

El ascenso relativo del nivel marino tiene dos consecuencias básicas: la tendencia de la ladera a acumular depósitos gravitacionales en su tramo inferior e interdigitarse o ser fosilizados por playas y dunas (p.e. flanco Este del Peñón); y la inmersión del relieve continental previo, tal como detectó FLEMMING (1972) por medio del ecosonar.

La evolución policíclica de las laderas, en relación con cambios tectono-eustáticos, origina los llamados "acantilados compuestos" (RODRÍGUEZ-VIDAL y GRACIA, 1994 y 2000) que están muy desarrollados en el flanco Este de Gibraltar (Foto 6). Se han reconocido cartográficamente hasta cinco niveles escalonados (MTU), entre la bahía Catalán y Punta Europa, que se vinculan con los cinco peldaños del modelo tectono-eustático propuesto por RODRÍGUEZ-VIDAL et al. (2001) (Figuras 1 y 4).

3. Sistema endokárstico

La mayor parte de las cuevas y sistemas endokársticos se desarrollan en la Formación Calizas de Gibraltar, con una fuerte componente dolomítica (ROSE y ROSENBAUM, 1990), aunque su condicionamiento es básicamente estructural.

Este relieve rocoso está horadado por multitud de cavidades naturales y decenas de kilómetros de galerías artificiales, junto con un gran potencial de cuevas sumergidas (FLEMMING, 1972; FA et al, 2000).

TRATMAN (1971) ha sugerido, al menos, dos fases principales de disolución kárstica, aunque actualmente ese tipo de afirmación es aventurada. Por donde sí se está avanzando es en la utilización de los espelotemas como criterios cronológicos y de interpretación paleoclimática, ya que estas formaciones son muy frecuentes, aparecen en distintas situaciones morfológicas y en relación con todos los tipos de formas y depósitos.

A pesar del potencial espeleológico de esta pequeña Roca, las investigaciones en esta línea no han avanzado mucho. Los actuales trabajos de exploración y topografía (SANTIAGO et al., 2001) aportarán frutos muy interesantes a corto plazo, ya que el desarrollo de los grandes sistemas horizontales, como la cueva de St. Michael, están claramente vinculados con periodos de estabilidad tectono-eustática, mientras que las cavidades verticales son el fruto de la inestabilidad. Además, la casi totalidad de las cuevas que se localizan en el flanco Este del Peñón han sido de origen marino, y se sitúan alineadas en la base de paleo-acantilados escalonados.

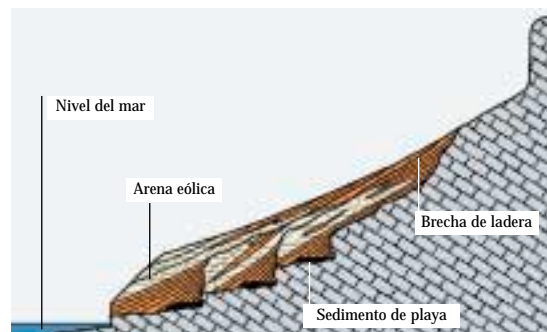


Figura 3:

Dispositivo geométrico escalonado y en offlap de las unidades morfosedimentarias (MSU), con registro marino-eólico-gravitacional, para cada escalón morfotectónico (MTU) de las laderas del Peñón de Gibraltar. Esta situación se produce con tasas de elevación tectónica entre 0.04 y 0.06 mm/año.

TECTÓNICA RECIENTE

Las pautas de deformación tectónica cuaternaria en zonas litorales, pueden ser inferidas a partir de los restos bien datados de terrazas marinas emergidas pero, además, es necesario conocer la posición original del nivel del mar en esa época (LAJOIE, 1986; ZAZO et al., 1999). Sin embargo, y con la finalidad de cuantificar el movimiento, se asume una velocidad constante y una tendencia similar de elevación o hundimiento.

La paleolínea de costa mejor estudiada en el Mediterráneo occidental corresponde al subestadio isotópico 5c (100 ka), que muestra una clara tendencia a la elevación en la zona del Estrecho (GOY et al., 1995; LARIO, 1996; ZAZO et al., 1999), con tasas medias que varían entre 0.105 mm/año y 0.210 mm/año.

En el Peñón, la velocidad media de levantamiento está en torno a 0.05 + 0.01 mm/año, para los últimos 100 ka. Estas tasas son menores que las registradas en límites convergentes de placa (LAJOIE, 1986), aunque similares a zonas convergentes-transpresivas, donde las elevaciones están entre 0.16 y 0.20 mm/año (KELLER y PINTER, 1996; ZAZO et al., 1999). La convergencia horizontal entre las placas africana e ibérica se estima que alcanza valores de de 0.30 mm/año (LAJOIE, 1986), debido a la acomodación del esfuerzo a favor de fallas de desgarre individuales NE-SW y NW-SE, con movimientos diferenciales de bloques elevados y hundidos (ZAZO et al., 1999).

La cota que actualmente alcanzan en Gibraltar los niveles marinos de los estadios isotópicos 7, 5 y 1, comparadas con las tasas anteriormente reseñadas, permite deducir velocidades máximas de elevación de 0.33 + 0.05 mm/año, entre 200 ka y hasta al menos 250 ka, y bastante menores (0.05 mm/año) desde 200 ka hasta la actualidad.

MODELO TECTONOEUSTÁTICO

GRIGGS y TRENHAILE (1994) propusieron un modelo evolutivo de acantilados compuestos, que estaban condicionados por las fluctuaciones eustáticas, tasas de meteorización de la roca, e intensidad de los procesos erosivos marinos. Sus perfiles son bastante semejantes a los que se reconocen en los flancos de Gibraltar y, tal como apuntaron ROSE y ROSENBAUM (1991), parece que ha existido también una marcada elevación tectónica durante el Cuaternario, probablemente de más de 100 m.

Las situaciones morfoestratigráficas que hemos reconocido en el Peñón, indican una evolución geomorfológica rápida y compleja, vinculada con sucesivas fases de variaciones tectonoeustáticas. Los modelados y depósitos costeros más recientes se vinculan con los estadios isotópicos 7, 5, 3 y 1 (últimos 250 ka). Los sedimentos litorales del estadio 3, entre 59 y 24 ka, están actualmente sumergidos, aunque las laderas y dunas sincrónicas cubren parte de las laderas y rellenan cuevas costeras.

Estos modelados forman una secuencia morfosedimentaria (Figura 3), con varios niveles escalonados de terrazas marinas, a los que se superponen brechas de ladera y arenas eólicas. El escalonamiento de cada secuencia morfosedimentaria constituye un peldaño morfotectónico (Figura 4), del que se han diferenciado hasta cinco, el más bajo de los cuales tiene una edad más reciente de 250 ka (MTU-5). Un marcado cantil, o antiguo acantilado, separa este peldaño del inmediatamente anterior, debido al aumento de la tasa de elevación tectónica; al igual que ocurre entre cada una de las unidades morfotectónicas cartografiadas.

El registro morfosedimentario del Cuaternario de Gibraltar está relacionado con los cambios eustáticos globales, que se han reflejado en estas latitudes, y con las pautas tectónicas regionales. Durante un periodo de levantamiento, con tasas iguales o mayores de 0.075 mm/año (ZAZO et al., 1993), las unidades morfosedimentarias se escalonan en las vertientes. Si las velocidades se sitúan

en torno a 0.020 mm/año, dichas unidades se disponen en offlap, es decir las más antiguas están topográficamente más altas que las restantes. Si la elevación está entre 0.040 y 0.060 mm/año, las unidades están escalonadas y en offlap (Figura 3).

En el amplio registro sedimentario del Peñón, la mejor y más completa secuencia sedimentaria es la de la unidad morfotectónica inferior (MTU-5), con un dispositivo escalonado de playas e interdigitado de dunas y laderas, que se relacionan con varios cambios eustáticos y elevaciones tectónicas locales.

CONCLUSIONES

Los abundantes afloramientos morfosedimentarios de Gibraltar, posiblemente pertenecientes a casi todo el Cuaternario, distribuidos por gran parte de su superficie y en el interior de múltiples cuevas y fisuras, convierten a esta pequeña Roca en uno de los registros más importantes y completos del Mediterráneo occidental.

La evolución geomorfológica está vinculada con los cambios rápidos cuaternarios del nivel del mar y con los más lentos de origen tectónico local. Los primeros forman un cortejo morfosedimentario de génesis marina, eólica, gravitacional y kárstica, distribuidos en una banda altitudinal bien definida cartográficamente; los segundos separan los conjuntos morfosedimentarios en varios escalones morfotectónicos, por medio de escarpes o paleoacantilados de gran altura. De esta manera, la costa rocosa se conforma como un acantilado-compuesto, con perfiles sucesivos de cantil erosivo y talud sedimentario.

Para que este modelo tectono-eustático se produzca, es necesario que existan fluctuaciones en la tasa de levantamiento costero y que nos encontremos en una región tectónicamente activa, como ocurre en el Estrecho de Gibraltar. Velocidades entre 0.04 y 0.06 mm/año generan unidades morfosedimentarias (MSU) escalonadas o en offlap, velocidades mayores de elevación desnivelan estas unidades en el relieve por medio de acantilados principales y forman las unidades morfotectónicas (MTU), la más reciente de las cuales está datada entre 250 ka y la actualidad.

El modelo tectono-eustático que ofrece Gibraltar puede ser utilizado total o parcialmente en otros lugares semejantes de la costa mediterránea, debido a la abundancia de macizos kársticos calizos, a la marcada actividad tectónica cuaternaria y al semejante comportamiento latitudinal de los cambios eustáticos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de la DGEIC: AMB99-0266-C03-03, Plan Propio de la Universidad de Huelva y el Gibraltar Caves Project. Agradecemos al Museo de Gibraltar y colaboradores las facilidades ofrecidas para la investigación y la ayuda prestada. Es una contribución al proyecto IGCP 437.



Foto 4:
Cueva marina de Vanguard (Governor's Beach) rellena de sedimentos eólicos y paleosuelos. Las actuales excavaciones arqueológicas han descubierto abundantes restos de fauna y claras evidencias de ocupación humana desde hace unos 100 ka.

Bibliografía

- DÍAZ DEL OLMO, F. (1994). *Interferencias sedimentarias y cambios climáticos en Gorham's Cave (Gibraltar)*. In J. Rodríguez-Vidal, F. Díaz del Olmo, J.C. Finlayson y F. Giles (Eds.). GIBRALTAR DURING THE QUATERNARY. AEQUA MONOGRAFÍAS, 2, 49-55, SEVILLA.
- FA, D., LARIO, J., SMITH, P. y FINLAYSON, J.C. (2000). *Elementos sumergidos kársticos alrededor de la costa de Gibraltar y su potencial uso por humanos en la Prehistoria*. ACTAS I CONGRESO ANDALUZ DE ESPELEOLOGÍA, 143-149, RONDA (MÁLAGA).
- FLEMMING, N.C. (1972). *Relative chronology of submerged Pleistocene marine erosion features in the western Mediterranean*. JOURNAL OF GEOLOGY, 80, 633-662.
- GILES, F.; FINLAYSON, C.; RODRÍGUEZ-VIDAL, J.; SANTIAGO, A.; GUTIÉRREZ LÓPEZ, J.M.; FA, D.; MATA, E.; FINLAYSON, G. y GILES GUZMÁN, F. (2001). *Referencias a las dataciones en los sistemas kársticos con ocupaciones humanas del Peñón de Gibraltar*, BOLETÍN SEDECK, 2, 86-90.
- GOLDBERG, P. y MACPHAIL, R.I. (2000). *Micromorphology of sediments from Gibraltar caves: Some preliminary results from Gorham's Cave and Vanguard Cave*. In C. Finlayson, G. Finlayson and D. Fa (Eds.). *Gibraltar during the Quaternary*, GIBRALTAR GOVERNMENT, HERITAGE PUBLICATIONS, MONOGRAPHS 1, 93-108, GIBRALTAR.
- GOY, J.L.; ZAZO, C.; SILVA, P.G.; LARIO, J.; BARDAJÍ, T. y SOMOZA, L. (1995). *Evaluación geomorfológica del comportamiento neotectónico del Estrecho de Gibraltar (Zona Norte) durante el Cuaternario*. IV COLOQUIO INTERNACIONAL SOBRE EL ENLACE FIJO DEL ESTRECHO DE GIBRALTAR, 51-69, SEVILLA. SECEG, MADRID.
- GRIGGS, G.B. y TRENHAILE, A.S. (1994). *Coastal cliffs and platforms*. In R.W.G. Carter and C.D. Woodroffe (Eds.). COASTAL EVOLUTION. LATE QUATERNARY SHORELINE MORPHODYNAMICS. CAMBRIDGE UNIV. PRESS, 425-450.
- HOYOS, M.; LARIO, J.; GOY, J.L.; ZAZO, C.; DABRIO, C.J.; HILLAIRE-MARCEL, C.; SILVA, P.G.; SOMOZA, L. y BARDAJÍ, T. (1994). *Sedimentación kárstica: Procesos morfosedimentarios en la zona del Estrecho de Gibraltar*. In J. Rodríguez-Vidal, F. Díaz del Olmo, J.C. Finlayson and F. Giles (Eds.). GIBRALTAR DURING THE QUATERNARY. AEQUA MONOGRAFÍAS, 2, 36-48, SEVILLA.
- KELLER, E.A. y PINTER, N. (1996). *Active Tectonics*. PRENTICE HALL, NEW JERSEY, 338 p.
- LAJOIE, K.R. (1986). *Coastal Tectonics*. In R.W. Wallace (Ed.). *Active Tectonics. Studies in Geophysics*, 95-124, Nat. Acad. Press, Washington D.C.
- LARIO, J. (1996). *Último y Presente Interglacial en el área de conexión Atlántico-Mediterráneo (Sur de España). Variaciones del nivel del mar, paleoclima y paleoambientes*. UNPUBLISHED PH. D. THESIS, UNIVERSITY COMPLUTENSE OF MADRID, 269 p.
- MACPHAIL, R.I. y GOLDBERG, P. (2000). *Geoarchaeological investigation of sediments from Gorham's and Vanguard caves, Gibraltar: Microstratigraphical (Soil Micromorphological and chemical) signatures*. In C.B. Stringer, R.N.E. Barton and J.C. Finlayson (Eds.). NEANDERTHALS ON THE EDGE. OXBOW BOOKS, 183-200, OXFORD AND OAKVILLE.
- PETTITT, P.B. y BAILEY, R.M. (2000). *AMS radiocarbon and luminescence dating of Gorham's and Vanguard caves, Gibraltar, and implications for the Middle to Upper Palaeolithic transition in Iberia*. In C.B. Stringer, R.N.E. Barton and J.C. Finlayson (Eds.). NEANDERTHALS ON THE EDGE. OXBOW BOOKS, 155-162, OXFORD AND OAKVILLE.
- RAMSAY, A.C. y GEIKEI, J. (1878). *On the geology of Gibraltar*. QUARTERLY JOURNAL OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF LONDON, 34, 504-541.
- RHODES, E.J.; STRINGER, C.B.; GRÜN, R.; BARTON, R.N.E.; CURRANT, A. y FINLAYSON, J.C. (2000). *Preliminary ESR dates from IbeX cave, Gibraltar*. In J.C. Finlayson, G. Finlayson and D. Fa (Eds.). GIBRALTAR DURING THE QUATERNARY, GIBRALTAR GOVERNMENT, HERITAGE PUBLICATIONS, MONOGRAPHS 1, 109-112, GIBRALTAR.
- RINK, W.J.; REES-JONES, J.; VOLTE-RRA, V. y SCHWARCZ, H. (2000). *ESR, OSL and U-Series chronology of Gorham's Cave, Gibraltar*. In C.B. Stringer, R.N.E. Barton and J.C. Finlayson (Eds.). NEANDERTHALS ON THE EDGE. OXBOW BOOKS, 165-170, OXFORD AND OAKVILLE.
- RODRÍGUEZ-VIDAL, J. y GRACIA, F.J. (1994). *Análisis del relieve y morfogénesis cuaternaria del Peñón de Gibraltar*. In J. Rodríguez-Vidal, F. Díaz del Olmo, J.C. Finlayson and F. Giles (Eds.). GIBRALTAR DURING THE QUATERNARY. AEQUA MONOGRAFÍAS, 2, 12-20, SEVILLA.
- RODRÍGUEZ-VIDAL, J. y GRACIA, F.J. (2000). *Landform analysis and Quaternary processes of the Rock of Gibraltar*. In J.C. Finlayson, G. Finlayson and D. Fa (Eds.). GIBRALTAR DURING THE QUATERNARY, GIBRALTAR GOVERNMENT, HERITAGE PUBLICATIONS, MONOGRAPHS 1, 31-38, GIBRALTAR.
- RODRÍGUEZ-VIDAL, J.; ALVAREZ, G.; CÁCERES, L.M.; MARTÍNEZ-AGUIRRE, A. y ALCARAZ, J.M. (1999). *Morfogénesis y fases de karstificación cuaternarias en la sierra del Endrinal (Grazalema, Cádiz)*. CUATERNARIO Y GEOMORFOLOGÍA, 13, 7-17.
- RODRÍGUEZ-VIDAL, J.; CÁCERES, L.M. y GRACIA, F.J. (2001). *Quaternary tectono-eustatic pattern of the Rock of Gibraltar*. V REQUI / I CQPLI, 73-76, LISBOA, PORTUGAL.

- ROGNON, P. (1996). *Climatic change in the African deserts between 130,000 and 10,000 y BP*. C.R. ACAD. SCI. PARIS, 323, SER. IIA, 549-561.
- ROSE, E.P.F. y HARDMAN, E.C. (1994). *Quaternary geology of Gibraltar*. In J. Rodríguez-Vidal, F. Díaz del Olmo, J.C. Finlayson, and F. Giles (Eds.). GIBRALTAR DURING THE QUATERNARY. AEQUA MONOGRAFÍAS, 2, 21-25, SEVILLA.
- ROSE, E.P.F. y HARDMAN, E.C. (2000). *Quaternary geology of Gibraltar*. In J.C. Finlayson, G. Finlayson & D. Fa (Eds.). GIBRALTAR DURING THE QUATERNARY, GIBRALTAR GOVERNMENT, HERITAGE PUBLICATIONS, MONOGRAPHS 1, 39-85, GIBRALTAR.
- ROSE, E.P.F. y ROSENBAUM, M.S. (1990). *Royal Engineer geologists and the geology of Gibraltar*. THE GIBRALTAR MUSEUM, GIBRALTAR. (REPRINTED FROM THE ROYAL ENGINEERS JOURNAL, 103 (FOR 1989), 142-151, 248-259; 104 (FOR 1990), 61-76, 128-144).
- ROSE, E.P.F. y ROSENBAUM, M.S. (1991). *A field guide to the geology of Gibraltar*. THE GIBRALTAR MUSEUM, 192 P.
- ROSE, E.P.F. y ROSENBAUM, M.S. (1994). *The Rock of Gibraltar and its Neogene Tectonics*. PALEONTOLOGIA I EVOLUCIÓN, 24-25, 411-421.
- SANTIAGO, A.; AGUILERA, J.; GILES, F.; AGUILERA, J.; FINLAYSON, C.; RODRÍGUEZ-VIDAL, J.; MARTÍNEZ GARCÍA, A. y GUTIÉRREZ LÓPEZ, J.M. (2001). *Trabajos espeleológicos llevados a cabo en las cavidades del Peñón de Gibraltar en el marco del Gibraltar Cave Project*, BOLETIN SEDECK, 2, 6-15.
- SELBY, M.J. (1982). *Hillslope materials and processes*. OXFORD UNIVERSITY PRESS, OXFORD, 264 P.
- SHACKLETON, N.J. y OPDYKE, N.D. (1973). *Oxygen isotope and palaeoclimatic stratigraphy of Equatorial Pacific Core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 105 year and 106 year scale*. QUATERNARY RESEARCH, 3, 39-55.
- SMITH, J. (1846). *On the geology of Gibraltar*. QUARTERLY JOURNAL OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF LONDON, 2, 41-51.
- TRATMAN, E.K. (1971). *The formation of the Gibraltar caves*. TRANSACTIONS OF THE CAVE RESEARCH GROUP OF GREAT BRITAIN, 13, 135-143.
- WILLIAMS, O.F.; THUNELL, R.C.; TAPPA, E.; RIO, D. y RAFI, I. (1988). *Chronology of the Pleistocene oxygen isotope record: 0-1.88 m.y. B.P.* PALEOGEOGR., PALEOCLIMATOL., PALEOECOL., 64, 221-240.
- ZAZO, C.; GOY, J.L.; DABRIO, C.; BARDAJÍ, T.; SOMOZA, L. y SILVA, P.G. (1993). *The Last Interglacial in the Mediterranean as a model for Present Interglacial*. GLOBAL AND PLANETARY CHANGE, 7, 109-117.
- ZAZO, C.; GOY, J.L.; HILLAIRE-MARCEL, C.; DABRIO, C.J.; HOYOS, M.; LARIO, J.; BARDAJÍ, T.; SOMOZA, L. y SILVA, P.G. (1994a). *Variaciones del nivel del mar: Estadios isotópicos 7, 5 y 1 en las costas peninsulares (S y SE) e insulares españolas*. In J. Rodríguez-Vidal, F. Díaz del Olmo, J.C. Finlayson and F. Giles (Eds.). GIBRALTAR DURING THE QUATERNARY. AEQUA MONOGRAFÍAS, 2, 26-35, SEVILLA.
- ZAZO, C.; GOY, J.L.; SOMOZA, L.; DABRIO, C.J.; BELLUOMINI, G.; IMPROTA, S.; LARIO, J.; BARDAJÍ, T. y SILVA, P.G. (1994b). *Holocene sequence of sea-level fluctuations in relation to climatic trends in the Atlantic-Mediterranean linkage coast*. JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 10, 933-945.
- ZAZO, C.; SILVA, P.G.; GOY, J.L.; HILLAIRE-MARCEL, C.; GHALEB, B.; LARIO, J.; BARDAJÍ, T. y GONZÁLEZ, A. (1999). *Coastal uplift in continental collision plate boundaries: data from the Last Interglacial marine terraces of the Gibraltar Strait area (south Spain)*. TECTONOPHYSICS, 301, 95-109.