

Regeneración de las playas y rehabilitación de los canales de desagüe de Beira (Mozambique)

Revista de Obras Públicas
nº 3.532. Año 159
Mayo 2012
ISSN: 0034-8619
ISSN electrónico: 1695-4408

Beach regeneration and renovation of drainage channels in Beira (Mozambique)

Alberto Camarero Orive. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular, Director del Departamento de Ingeniería Civil. Transportes,
Universidad Politécnica de Madrid. Madrid (España). alberto_camarero@upm.es

Pablo De La Fuente Martín. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular, Director del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras,
Universidad Politécnica de Madrid. Madrid (España). pdelaf@caminos.upm.es

Íñigo López Ansorena. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Colaborador, Departamento de Ingeniería Civil. Transportes, Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid (España). ilopezans@gmail.com

Eduardo Domínguez Guijarro. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Investigador, Departamento de Ingeniería Civil. Transportes, Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid (España). edomguij@gmail.com

M^a Nicoletta González Cancelas. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Ayudante Doctor, Departamento de Ingeniería Civil. Transportes, Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid (España). nicoleta.gcancelas@upm.es

Resumen: El Grupo de Cooperación "Infraestructuras Básicas para el Desarrollo y la Sostenibilidad" de la Universidad Politécnica de Madrid ha desarrollado un proyecto en la ciudad de Beira, Mozambique, financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo, con el fin de mitigar las consecuencias asociadas al cambio climático, que junto con el emplazamiento de la ciudad y la ausencia de una gestión adecuada en el mantenimiento de las infraestructuras en la zona, han provocado una mayor sensibilidad de Beira ante las inundaciones y la erosión costera. Para dar solución a estos problemas se ha planteado la rehabilitación de las infraestructuras de defensa costera y de la red de canales de desagüe de aguas pluviales.

Palabras Clave: Cooperación al desarrollo; Mozambique; Beira; Defensa costera; Canales de desagüe

Abstract: The "Basic Infrastructure for Development and Sustainability" Cooperation Group of the Universidad Politécnica de Madrid has developed a project in the city of Beira, Mozambique, financed by the Spanish International Development Cooperation Agency, to mitigate the consequences associated with climate change, which together with the city's location and the lack of suitable maintenance in the area, have left Beira more exposed to flooding and coastal erosion. In order to provide a solution to these problems, consideration has been given to the renovation of coastal defence infrastructure and the system of stormwater drainage channels.

Keywords: Development cooperation; Mozambique; Beira; Coastal defence; Drainage channels

1. Introducción

El Grupo "Infraestructuras Básicas para el Desarrollo y la Sostenibilidad" de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) se creó en el año 2008, con el objetivo de desarrollar proyectos de cooperación relacionados con la ingeniería civil en países en vías de desarrollo, principalmente en Mozambique. Como resulta-

1. Introduction

The "Basic Infrastructure for Development and Sustainability" Group of the Universidad Politécnica de Madrid (UPM) was created in 2008 with the aim of developing civil engineering cooperation projects in developing countries, and principally Mozambique. This collaboration process has led to the development of

do de este proceso de colaboración se ha elaborado el "Proyecto de restablecimiento de la comunicación marítima del distrito de Ibo" y el proyecto de "Fortalecimiento del municipio de Beira para la planificación y diseño de infraestructuras de defensa litoral y drenaje", del que es objeto el presente artículo. Las actuaciones desarrolladas por el grupo de cooperación han sido financiadas por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), que sitúa a Mozambique dentro de los países que integran el Grupo A de sus prioridades geográficas en los que existen oportunidades para establecer un marco de asociación a largo plazo.

La República de Mozambique se encuentra situada en el sureste del continente africano, en zona tropical a unos 20° de Latitud Sur. A pesar de los avances realizados desde el final de la guerra civil en 1992, el informe del Índice de Desarrollo Humano 2011 del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) coloca al país en la posición 184 entre los 187 países para los que se disponen datos comparables (1). Este informe refleja los logros medios de un país en tres aspectos: salud, educación e ingresos, por lo que permite apreciar la escasez de oportunidades y la dificultad de las condiciones de vida de la mayor parte de la población del país.

El conjunto de actuaciones propuestas en el proyecto se localiza en la ciudad de Beira, capital de la provincia de Sofala, cuyo emplazamiento se puede apreciar en la figura 1. Su situación en una planicie contigua a la costa en la desembocadura del río Púnguè, la convierte en una zona muy sensible a las variaciones del nivel del mar y a los efectos de los temporales que inciden en el litoral, que provocan como resultado inundaciones, erosión de playas y la consiguiente recesión de la línea de costa, con efectos sobre el área urbana del Municipio. A estos factores se le añade el decadente estado actual de las infraestructuras costeras y canales de evacuación de aguas pluviales existentes, que datan de la época colonial portuguesa del país en los años cincuenta.

Con el objetivo de aportar una solución integral a los problemas que se dan en la zona de actuación, se ha planteado un proyecto que tiene como objeto fundamental la mejora de las infraestructuras costeras de defensa litoral mediante la regeneración de la playa y de su función de protección de la costa con rehabilitación y recrecimiento de los espigones existentes en el litoral del municipio de Beira, acompaña-



Fig. 1. Mapa de Mozambique. Fuente: United Nations, Department of Peacekeeping Operations, Cartographic Section (2)/Map of Mozambique. Source: United Nations, Department of Peacekeeping Operations, Cartographic Section (2).

the projects "Reestablishment of maritime communication in the Ibo district" and "Reinforcement of the Beira municipality - planning and design of coastal defence and drainage infrastructure", which is the subject of the present article. The work by the cooperation group has been funded by the Spanish International Development Cooperation Agency (AECID), which places Mozambique within Group A countries in terms of geographical priorities and where there are opportunities to establish a long-term association framework.

The Republic of Mozambique is set to the southeast African continent, in the tropical zone at a southerly latitude of some 20°. In spite of progress witnessed since the end of the civil war in 1992, the Human Development Index for 2011 published by the United Nations Development Programme (UNDP) gives the country a rank of 184 out of 187 countries with comparable data (1). This report reflects the progress made in the country in three areas: health, education and income, and starkly underlines the lack of opportunities and difficult living conditions for the majority of the country's population.



Fig. 2. Playas de Beira (Macuti)/
Beaches in Beira
(Macuti).

da de alimentación con arena. Por otro lado, se ha propuesto otra actuación en la que, partiendo del estudio del estado actual y de la funcionalidad de los canales de desagüe de las aguas pluviales que se encuentran distribuidos por el área del Municipio, se propone la limpieza y rehabilitación de los mismos.

2. Los problemas del litoral de Beira

Las playas de Beira (figura 2) son abiertas, presentan unidades morfológicas diferenciadas (playa sumergida, playa aérea y cordón dunar) y están sometidas a una carrera de marea, diferencia de altura entre pleamar y bajamar, de unos 7 metros.

La batimetría de la zona es bastante aplacerada, existiendo importantes bancos de arena en la entrada del río (sur y sur-sureste de Beira), que suelen generar las planicies de marea que se aprecian en la carta náutica que muestra la figura 3. De esta manera el oleaje local se ve atenuado a lo largo de las costas de Beira, en especial el oleaje generado en alta mar a partir de direcciones entre sur y sureste.

Fig. 3. Carta náutica de Beira.
Fuente: Admiralty
Chart (3)/Nautical
chart of Beira.
Source: Admiralty
Chart (3).



The project activities are centred on the city of Beira, capital of the Sofala province, the location of which being shown in Fig. 1. The city's setting on a plain adjacent to the coast at the mouth of the River Púnguè, makes the area very sensitive to fluctuations in sea level and the effects of storms striking the coast. This has given rise to flooding, beach erosion and coastline recession and has affected the urban area. These effects are further heightened by the poor state of repair of the coastal infrastructure and stormwater drainage channels that date back to the nineteen-fifties and the times of the Portuguese colonization.

In order to provide an integral solution to the problems facing the area, a project was laid out with the essential aim of improving the coastal defence infrastructure by beach regeneration and by ensuring their coastal protection by renovating and raising existing groynes on the Beira coastline, together with beach renourishment operations. An additional activity was also proposed on the basis of a study made into the state of repair and operation of stormwater drainage channels distributed throughout the municipality and involving the cleaning and rehabilitation of the same.

2. Problems of the Beira coastline

The beaches in Beira (Fig. 2) are open beaches divided into different zones (submerged beach, visible beach and dunes) that are subject to a tidal range, between high tide and low tide, of some 7 metres.

The depths in the area are fairly level and shallow, there being a number of considerable sand banks at the entrance of the river (south and south-southeast of Beira) that tend to produce tidal plains as may be seen in the nautical chart shown in Fig. 3. In this way the local swell is reduced throughout the Beira coastline, and particularly with respect to the waves generated at high sea from a southerly and southwesterly direction.

2.1. Beach erosion and deterioration of groynes

The Beira coastline is susceptible to changes in climate and over recent years this has given rise to variations in the strength, frequency, duration and direction of storms directly striking their shores (Fig. 4) This has, in turn, led to adverse situations during flood periods, the deterioration of groynes due to their lack of

2.1. Erosión de la playa y deterioro de sus espigones

El litoral de Beira es vulnerable a los cambios del sistema climático que en los últimos años han dado lugar a variaciones en la intensidad, frecuencia, duración y trayectoria de los temporales que inciden directamente en su costa (figura 4). Como resultado se han producido alteraciones en los períodos de inundación, el deterioro de los espigones por falta de estabilidad de los mismos, la erosión de las playas y la consiguiente recesión de la línea de costa en el municipio de Beira.

Diversos estudios previos impulsados por las autoridades locales (5 y 6) y por organismos de cooperación internacionales (7, 8, 9 y 10), han puesto de manifiesto estos problemas y han motivado la redacción del citado proyecto constructivo que tiene como objetivo la formación y mantenimiento de una playa estable.

Para estudiar la erosión de la costa y el deterioro de los espigones, que el paso del tiempo y los temporales han provocado, se analiza el litoral de la ciudad de Beira dividiéndolo en las cuatro playas que se pueden apreciar en la figura 5.

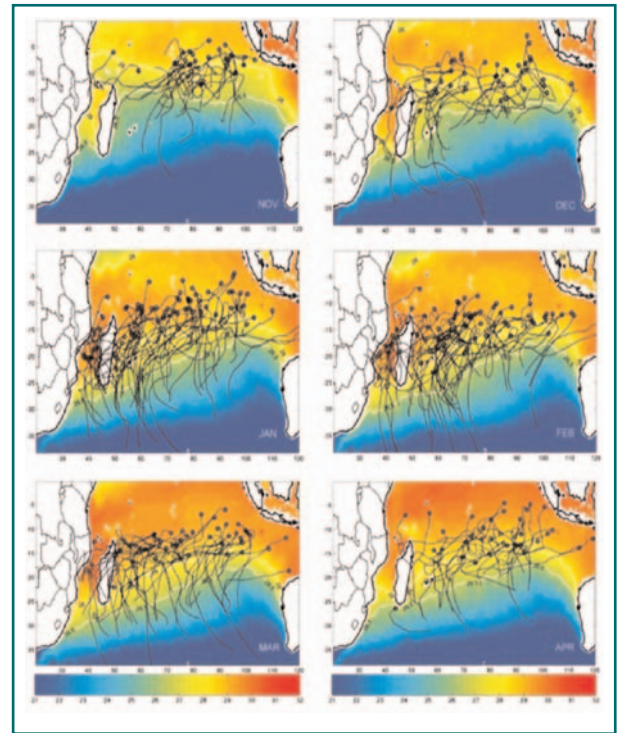


Fig. 4. Trayectorias de los ciclones tropicales entre 1970 y 2010. Fuente: Assessment of Options for Coastal Protection of the Beira Shoreline (4)/ Directions of tropical cyclones between 1970 and 2010. Source: Assessment of Options for Coastal Protection of the Beira Shoreline.



Fig. 5. Planta de la ciudad de Beira/ Plan of Beira.

1. **Zona de Praia Nova**, desde Praya Nova hasta Ponta Gea. La playa tiene una orientación hacia el Suroeste, hacia la desembocadura del río.
2. **Playa de Ponta Gêa** desde Ponta Gea hasta la Avenida 24 de Julho, la playa está orientada hacia el Sur.
3. **Playa de Chipangara/Palmeiras**, desde la Avenida 24 de Julho hasta la Rua Paiva Couceiro y con una orientación sur-oeste.
4. **Playa Macuti**, de la Rua Paiva Couceiro hasta el faro de Macuti, con orientación sureste a sur.

Los tramos de Ponta Gêa, Chipangara/Palmeiras y Macuti están protegidos por 45 espigones, algunos de los cuales se encuentran en un estado muy deteriorado. La figura 6 muestra esquemáticamente como la acumulación de arena tiene lugar en el lado este de cada estructura (clara indicación del transporte neto de arena hacia el litoral suroeste y oeste) y el esquema típico de fallo de los espigones que provoca finalmente el retroceso de la línea de costa.

Los espigones existentes presentan dos tipologías: el primer grupo lo forman los construidos en la época colonial como estructuras rígidas de hormigón (figura 7), el segundo grupo lo forman los espigones sobre los que se ha ejecutado más recientemente el vertido de escollera de basalto sobre la anterior estructura rígida de hormigón. El estado actual de los espigones es muy heterogéneo, existiendo unidades en buen estado, que requieren medidas de refuerzo leve y otras en unas condiciones muy deterioradas que requieren una rehabilitación estructural profunda. En lo que se refiere a la pérdida de arena en las playas, los tramos

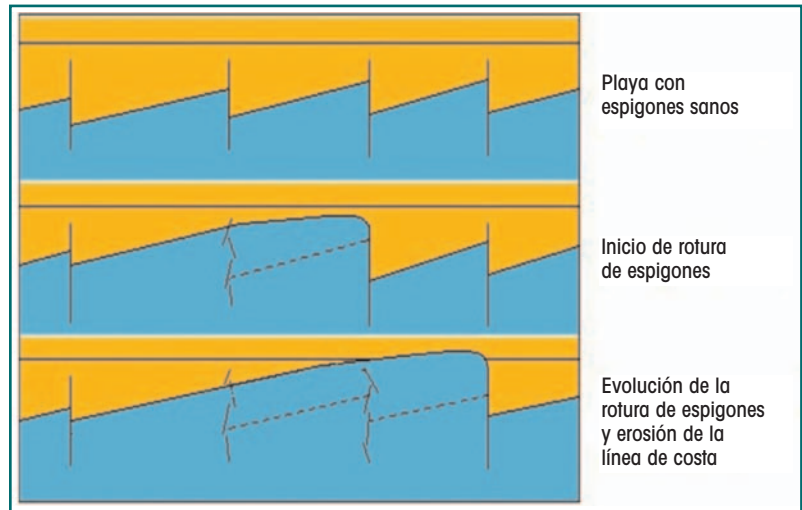


Fig. 6. Esquema de fallo del sistema de espigones/
Diagram of groyne deterioration.

stability, beach erosion and the ensuing recession of the coastline in the Beira municipality.

A number of preliminary studies conducted by the local authorities (5 and 6) and international cooperation organizations (7, 8, 9 and 10) have underlined these problems and have paved the way for the preparation of this construction project which aims to form and maintain a stable beach.

In order to study the beach erosion and the deterioration of the groynes caused by the passage of time and storm damage, the Beira city shoreline was divided into four beaches as shown in Fig. 5.

1. **Praia Nova Area**, from Praya Nova to Ponta Gea. The beach faces the southwest and the river mouth.
2. **Ponta Géa Beach**, from Ponta Gea to Avenida 24 de Julho. South-facing beach.

Fig. 7. Espigones de Beira y trabajos de levantamiento topográfico/
Groynes in Beira and surveying work.



de costa con mayor déficit coinciden con los lugares en los que los espigones han perdido su funcionalidad, localizándose principalmente en la zona de Chipangara/Palmeiras y en Ponta Géa.

2.2. Deterioro de la red de canales de desagüe

El segundo problema que se presenta en la costa del municipio de Beira es la obsolescencia de la red de canales de desagüe que debe garantizar la evacuación de las aguas pluviales de la ciudad. En la ciudad de Beira se construyeron a mediados del siglo pasado los canales A1, A2 y A3 que se aprecian en la figura 5 con objeto de evacuar las aguas pluviales de la ciudad, cuya precipitación mensual no llega a los 50 mm durante el período Junio-Septiembre y supera los 250 mm durante el período Diciembre - Marzo.

Los canales A1 y A2 tienen una longitud de 4.4 km y 5.1 km respectivamente. Ambos desembocan en un tramo de 0.533 km (canal A). Al final de este tramo desemboca el canal A3, de 6.2 km de longitud para, finalmente, desembocar en el mar mediante un tramo de 0.466 km (canal A0).

La pendiente longitudinal de los distintos canales varía entre 1‰ y 3‰, mientras que las márgenes tienen una pendiente que se sitúa entre 3H:1V y 5H:1V. La profundidad máxima del lecho es del orden de 2.5 m.

A lo largo de más de medio siglo los canales han tenido un escaso mantenimiento, lo que ha conducido a una situación muy deteriorada, y a la pérdida, en parte, de su funcionalidad. De esta manera, en algunos tramos se pueden observar los restos de su revestimiento originario mediante una placa de hormigón. En la mayor parte de márgenes y fondo ha crecido maleza y en muchas zonas, particularmente en las contiguas a las áreas habitadas, se pueden observar residuos de diversos tipos como se puede apreciar en la figura 8.

3. El proyecto de fortalecimiento del litoral

A la hora de resolver los problemas estructurales de la costa en Beira, los objetivos principales son el control de los procesos erosivos (que son consecuencia de la pérdida de sedimentos de las playas, sin reposición natural ni en el espacio ni en el tiempo) y la

3. **Chipangara/Palmeiras Beach**, from Avenida 24 de Julho to Rúa Paiva Couceiro. South-westerly facing beach.
4. **Macuti Beach**, from Rúa Paiva Couceiro to the Macuti lighthouse, facing south-southeast.

The Ponta Géa, Chipangara/Palmeiras and Macuti sections are protected by 45 groynes, some of which in advanced state of decay. Figure 6 shows in schematic form how sand tends to accumulate on the east side of each structure (this being a clear indication of the net transport of sand towards the southwesterly and westerly coastline) and the typical form of failure of the groynes that eventually leads to the retreat of the shoreline.

The groynes may be divided into two types of structure: the first type dating back to the colonial period and consisting of rigid concrete structures (Fig. 7); and the second group built more recently and consisting of basalt rubble laid over the earlier rigid concrete structure. The current state of the groynes varies widely, there being some structures in good state of repair and only requiring slight reinforcement and other groynes in very poor condition and requiring full structural renovation. In terms of the loss of sand on the beaches, the coastal areas with the largest deficit coincide with those places where the groynes have ceased to be effective, and particularly in the area of Chipangara/Palmeiras and Ponta Géa.

2.2. Deterioration of the drainage channel network

The second problem appearing on the coastline of Beira is the obsolescence of the city's stormwater drainage channels. The channels A1, A2 and A3, illustrated in Fig. 5, were built around the 1950's to drain stormwater runoff from the city, in response to the monthly rainfall that, while barely reaching 50 mm from July to September, reaches over 250 mm from December to March.

The 4.4 km and 5.1 km long A1 and A2 channels both empty into a 0.533 km channel (channel A) which, in turn, flows into the 6.2 km long A3 channel before emptying into the sea via a 0.466 km section (channel A0).

The longitudinal gradient of the channels varies from 1‰ to 3‰, while the bank slopes are set between 3H:1V and 5H:1V. The maximum depth of the bottom is around 2.5 m.



Fig. 8. Estado actual de los canales de desagüe de la ciudad de Beira/Current state of the drainage channels in Beira.

rehabilitación de la red de canales de desagüe, que garanticen la evacuación de las aguas pluviales de la ciudad. El proyecto requirió trabajos de campo y laboratorio.

3.1. Trabajos de campo y laboratorio

En los trabajos de campo, se realizó una inspección visual, el levantamiento topográfico, la recogida "in situ" de las muestras de arena y una visita técnica a las canteras de Pedreira N'cora y Monte Xiluvo-Cicca (las más próximas al municipio de Beira) con el objeto de realizar un reconocimiento de la roca de basalto para su utilización como escollera en las obras.

En las zonas objeto del proyecto, se procedió a actualizar la cartografía existente mediante un levantamiento topográfico, que permitió obtener una representación adecuada del terreno para la realización del proyecto. Así se registraron topográficamente varias secciones en los distintos tramos de los canales (figura 9), paseo marítimo, bordes con muro u otras singularidades, se dio cota tanto a la intersección con la playa seca como a la coronación del borde superior del paseo o muro.

Al mismo tiempo, se seleccionaron cuatro perfiles de playa en los que se tomaron dos muestras de arena por perfil, una en la playa seca, y otra en la zona intermareal. Cada una de las ocho muestras recogidas en Beira, se envasó en recipientes independientes con cierre para evitar el lavado, se etiquetaron y empaquetaron adecuadamente para su posterior traslado a la Escuela de Ingenieros de Caminos, Caudales y Puertos de Madrid. A partir del análisis granulométrico

Very little maintenance work has been carried out on the channels for over half a century and these are now in a very poor state of repair and do not entirely operate as intended. In certain sections of the channel it is possible to observe the remains of the original concrete lining, most of the banks and the channel bottom are covered in weeds and different types of waste may be found in many sections, particularly those close to inhabited areas, as may be seen in Fig. 8.

3. The coast reinforcement project

In order to resolve the structural problems facing the Beira coast, the main priorities are to control erosion (resulting from the loss of beach sediment, without natural and local replacement over time) and the renovation of the system of channels serving to drain

Fig. 9. Trabajos topográficos en los canales de la ciudad de Beira/Surveying work on the channels in Beira.



realizado en laboratorio, según los tamices ASTM, se definió la granulometría de equilibrio de la playa (entendida como la granulometría final, invariable en el tiempo, existente en un punto del perfil de playa bajo unas condiciones de dinámica marina).

Los ensayos permitieron determinar que en la playa predominan, generalmente, los granos bien seleccionados sub-redondeados y elongados. La granulometría es bastante uniforme en las playas pudiendo considerarse un diámetro medio D_{50} de 0,70 mm, diámetro que se eligió como base para el cálculo de las pendientes de equilibrio del relleno y del volumen total de aportación en el litoral de Beira.

Complementariamente se realizó un análisis geológico-geotécnico, en el que se analizó la morfología del terreno y las variables que podrían resultar de interés para el proyecto, como la posible afección de las obras sobre la red hidrográfica, los afloramientos, la existencia de pozos cercanos, o las obras de cimentaciones próximas.

Una vez recogida toda la información en Beira, analizadas las fuentes documentales recopiladas y realizados los trabajos de laboratorio, se procedió a la elaboración del proyecto constructivo.

3.2. Premisas fundamentales en el diseño de la regeneración de la playa

La propia naturaleza de las playas para ajustarse a las fuerzas a las que se ven sometidas, hace de ellas mismas el método más efectivo para la defensa de la costa, y por tanto, se deben analizar con detalle los parámetros que las rigen y su propio comportamiento frente a los procesos a los que se ven sometidas. La premisa fundamental en el proyecto de regeneración de la playa de Beira es que la configuración física de la playa, así como las características esenciales y condiciones de uso, sean lo más similares a las de la playa originaria, evitando en lo posible la desnaturalización de sus características esenciales.

Una vez establecidas las bases de partida y conocidos todos los condicionantes, se procedió a la determinación de la playa de equilibrio, configuración a la que tiende la forma de la playa bajo las condiciones estacionarias de la dinámica actuante. Si bien en sentido estricto esta configuración de equilibrio no existe en la naturaleza, puesto que no existe dicha condición estacionaria, este concepto ideal de playa

stormwater runoff from the city. This project then required both field work and laboratory work.

3.1. Field and laboratory work

The field work consisted of a visual inspection, a topographic survey, in-situ collection of sand samples and a technical visit to the Pedreira N'cora and Monte Xiluvo-Cica quarries (the closest to Beira) to make an evaluation of basalt rock for its potential use as rubble revetment for the works.

The existing maps covering the project area were updated by a topographic survey which made it possible to obtain a suitable representation of the land in order to conduct the project. Surveys were made of various sections at different parts of the channels (Fig. 9), the promenade, interconnections with walls and other areas and benchmark levels were obtained with respect to both the intersection with the "dry" beach and the coping of the promenade and walls.

Four beach profiles were selected and two sand samples taken for each profile, one from the dry beach and the other from the intertidal zone. Each of the eight samples taken in Beira was placed in individual sealed containers to prevent contamination and then labelled, packaged and sent to the Civil Engineering College in Madrid. Following sieve analysis conducted in the laboratory, using ASTM standard sieves, a balanced particle size was defined for the beach (taking this as the final and invariable particle size existing at a point on the beach profile under certain bottom dynamic conditions).

From the tests it was established that the beach was predominantly formed by well selected sub-rounded and elongated particles. The particle size is fairly uniform throughout the beaches and where the average diameter D_{50} may be taken as 0.70 mm, this being the diameter selected as the basis for the calculation of the backfill equilibrium slopes and the total volume of sand contribution throughout the Beira coastline.

Geological-geotechnical analysis was conducted in parallel to these activities in order to analyse the form and structure of the land and the variables that might be of possible interest to the project, such as the possible effect of the work on the water network, springs or on nearby wells or foundation works.

Once all the information had been gathered in Beira and after analysing the document sources obtained

está ampliamente difundido dentro de los métodos de diseño utilizados en la ingeniería de costas, ya que permite tener una representación aproximada, pero fiel, de la morfología de la playa.

En general los perfiles son más peraltados en la orilla, y progresivamente van disminuyendo su pendiente a medida que la profundidad de agua aumenta en dirección *offshore*. Esta regularidad ha propiciado varios intentos para desarrollar expresiones matemáticas que describan la forma del perfil de playa. Estas formulaciones son útiles en estudios sobre transporte de sedimento, análisis de la dinámica de oleaje durante shoaling, generación de corrientes cerca de la orilla, validación de modelos de la evolución de la morfología de la playa, etc.

La expresión que se ha utilizado en el diseño del perfil de equilibrio de la playa regenerada, es:

$$h=A \cdot x^{2/3}$$

propuesta en la formulación de Dean (11), siendo 'h' la profundidad de agua para una distancia horizontal 'x' desde la línea de orilla, y 'A' un parámetro relacionado con características como el tamaño de grano, la energía de oleaje incidente, etc. El parámetro 'A' se denomina factor de escala o coeficiente de forma del perfil, y es función de la forma en la que se disipa la energía a lo largo del perfil. Esta formulación define la forma del perfil de playa en base al tamaño medio del grano de arena y evoluciona el perfil parabólico que propone la formulación de Bruun (12). La principal limitación de esta formulación, es que no permite representar algunas características de los perfiles reales, como son la influencia del oleaje en la forma del perfil, la influencia de la marea o la interacción entre el perfil sumergido y el perfil de rotura, puesto que la obtención de las mismas se basa, exclusivamente, en ajustes a datos. Otras formulaciones de perfil de equilibrio son el modelo bi-parabólico de equilibrio, que adopta expresiones de dos tramos al objeto de permitir una mejor representación de los diferentes procesos que tienen lugar en la zona de rotura y en la zona de asomeramiento, y que permite, además, incluir el efecto de la reflexión del oleaje y de la marea en la forma del perfil.

Una vez definido el perfil de equilibrio de la playa regenerada, éste fue utilizado en la cubicación del volumen de arena necesario para la aportación en los tramos erosionados, así como en el dimensiona-

and on carrying out the laboratory work, the team then proceeded to prepare the building project.

3.2. Basic premises in beach regeneration design

The very nature of beaches to adjust to the forces exerted on the same make the beach itself the most effective means of coastal defence and it is then necessary to analyse in detail the parameters governing the beach and its behaviour in response to the processes affecting it. The fundamental premise in the Beira beach regeneration project is that the physical configuration of the beach, together with its essential characteristics and conditions of use, be as similar as possible to that of the original beach in order to prevent, as far as possible, any change in its essential characteristics.

On establishing the starting points and in the awareness of all the conditioning factors, it was then necessary to establish the equilibrium beach profile, this being the shape that would tend to be formed by the beach under stationary conditions with respect to the beach dynamics. While this equilibrium shape does not, strictly speaking, exist in nature as there is no such stationary condition, this ideal concept of the beach is widely employed in coastal engineering design as it allows an approximate, yet dependable, representation of the shape of the beach.

In general the profiles are more stepped at the shore and their slopes gradually decrease as the water depth increases offshore. This regularity has given rise to several attempts to develop mathematical expressions to describe the form of the beach profile. These formulas are useful in studies of sediment transfer, the analysis of wave dynamics during shoaling, the generation of currents close to the shore and for the validation of beach profile evolution models, etc.

The equation used in the design of the equilibrium profile of the regenerated beach is:

$$h = A \cdot x^{2/3}$$

as proposed in the Dean equilibrium profile equation (11), where h is the water depth at a distance x from the shoreline and A the parameter related to characteristics such as particle size, incident wave energy, etc. The parameter A is referred to as the scale parameter or profile coefficient and is a function of the manner in which energy is dissipated throughout the profile. This

miento de las longitudes y cotas de los espigones de contención de arenas. Este particular de evidentes repercusiones económicas, estéticas y sociales, confiere, por sí solo, una gran importancia a las formulaciones de equilibrio, pues de su precisión y capacidad de representar la realidad depende el éxito de la regeneración de la playa.

Por otra parte, el establecimiento de los criterios de vulnerabilidad ante inundaciones, ha sido una parte primordial en la determinación de la cota de inundabilidad en la playa de Beira. Por ello, en la redacción del proyecto se dedicó especial atención al impacto que los períodos de inundación ocasionan en el litoral. La costa de Beira ha estado sujeta a importantes inundaciones en el pasado, por ello conocer con precisión los períodos de retorno de estas inundaciones resulta necesario en el diseño de la defensa litoral del municipio. Esta cota de inundación, viene determinada por la probabilidad conjunta de la marea astronómica, de la marea meteorológica, del *run-up* en la playa y del aumento del nivel medio del mar. De los valores obtenidos para todas estas variables se obtiene un aumento total de la cota de inundación, que permite definir en la zona de Beira la cota de la berma de la playa en los 9,50 m.

En lo relativo al fortalecimiento de las estructuras de defensa, cuya función es reducir la energía del oleaje y mejorar el de apoyo de la playa, se utilizó la formulación de cálculo para las secciones de manto de escollera que propuso Van Der Meer (13). Basada en los primeros trabajos de Thomson y Shuttler en la década de los setenta, y en una serie muy amplia de ensayos con oleaje irregular realizados en Delft Hydraulics, la formulación de Van der Meer se encuentra ampliamente difundida y aceptada en la comunidad científica internacional.

Por último y no por ello menos importante, se estudió la movilización del sedimento longitudinal y transversalmente, dentro de la misma playa, desde las zonas de acumulación a las zonas de erosión, para adaptar la forma en planta y el perfil de la playa a las condiciones de uso requeridas.

3.3. Ejecución de las obras de regeneración de la playa

El procedimiento y ubicación del vertido de arena de una regeneración es un aspecto que habitualmente suscita controversia por sus implicaciones sociales, económicas y ambientales. Desde el punto de vista de

equation defines the form of the beach profile in accordance with the average grain size of sand and develops the parabolic profile proposed by the Bruun equation (12). The main restriction of this equation is that it does not allow the representation of certain characteristics of real profiles, such as the influence of the waves on the form of the profile, the influence of the tide or the interaction between the submerged profile and the profile of breakers, as these are exclusively obtained by data adjustment. Other forms of equilibrium profile consist of the bi-parabolic equilibrium model which adopts expressions of two areas in order to better represent the different processes occurring in the breaker zone and the shoaling zone, and which also makes it possible to include the effect of wave and tidal reflection in the form of a profile.

Once the equilibrium profile of the regenerated beach had been defined, this was employed for the calculation of the volume of sand that had to be supplied to the eroded areas and in the dimensioning of the lengths and heights of the groynes retaining the sand. In the light of the evident economic, aesthetic and social repercussions involved in this respect, the equilibrium formulas taken on great importance as the success of the beach regeneration depends on the precision and correct representation of these formulas.

In a similar fashion, the establishment of flood vulnerability criteria has been essential to determine the flood level at the Beira beach. For this reason the project paid particular attention to the impact on the coastline during flood periods. The Beira coast has been subject to considerable flooding in the past and, as such, a precise knowledge of the return periods of these floods is essential for the design of the coastal defence of the area. This flood level is determined by the combined probability of the astronomical tide, the meteorological tide, the wave run-up and the increase in the mean sea level. The total increase in flood level is then established from the values obtained from all these variables, and defines a backshore height of 9.50 m in the Beira area.

With regards to the strengthening of coastal defence structures serving to reduce the energy of the waves and improve the support to the beach, the Van der Meer (13) formula for the calculation of rubble-mound sections was employed. Based on the earlier work of Thompson and Shuttler in the 70's and on an

la funcionalidad y estabilidad de la regeneración, la alternativa más adecuada es clara: el vertido de la arena debe hacerse allí donde exista el déficit. Además y como ya se ha expuesto anteriormente, el árido que se aporta debe tener unas características similares a la arena nativa de la playa.

El vertido de arena debe realizarse en la zona superior del perfil (playa seca y berma) y a lo largo de toda la extensión de la playa, de tal modo que se obtenga un avance de la línea de costa de una magnitud similar en toda su extensión. El avance planeado (de unos 20 metros) es compatible con la granulometría del material de aportación, asumiendo un talud de derrame de 10H/1V.

A la hora de realizar el vertido, hay que tener en cuenta que la arena aportada no se dispone de forma inmediata de acuerdo a su perfil de equilibrio, sino que inicialmente adopta una determinada forma, ajena a la acción del oleaje y que depende del procedimiento constructivo empleado en la regeneración. La geometría resultante se asemeja a la de un acopio con su talud de derrame y un determinado avance de la línea de costa, distinto del que se producirá con el perfil definitivo. Para estimar esta situación transitoria se asume que la arena se coloca de acuerdo a una superficie horizontal que a una cierta distancia de la costa cae con un talud constante hasta intersectar el perfil nativo. Este perfil provisional es el denominado perfil de vertido.

Se ha previsto que las operaciones de vertido, se realicen por medio de una tubería desde una draga de succión en marcha, que realice el dragado y se aproxime a la playa hasta el punto de la cabeza de la tubería. Posteriormente el perfilado de la playa se realizará con medios mecánicos y manuales desde tierra, de modo que se consigan los perfiles teóricos del proyecto.

Respecto al procedimiento constructivo de la obra marítima, el proyecto contempla que la rehabilitación de los espigones se inicie desde el oeste, a fin de asegurar que los espigones construidos no dañan ninguna de las secciones sin protección situadas aguas abajo. Como la función de los espigones es mantener la arena en su lugar, está previsto que la actuación se acometa por celdas, realizando la aportación de arena en el espacio entre cada dos espigones (celda) tan pronto como sea posible, una vez completados los dos espigones que la retienen. De esta forma se minimiza el impacto aguas abajo de las obras de rehabilitación.

extensive series of test on irregular waves performed by Delft Hydraulics, the Van der Meer formula is widely known and accepted by the international scientific community.

Lastly, but by no means least, a study was made of the longitudinal and transverse movement of sediment, within the beach itself, from accumulation areas to erosion areas, to adapt the plan and profile of the beach to the required conditions of use.

3.3. The beach regeneration works

The process and placement of dumping sand for regeneration commonly gives rise to controversy as a result of the social, economic and environmental implications. In pure terms of the functionality and stability of the beach regeneration the most suitable option is to dump the sand where material has been lost. Furthermore, and as indicated earlier, the replenishment material should have similar characteristics to the native material of the beach.

The sand should be dumped at the backshore (dry beach and berm) and throughout the entire length of the beach in order to ensure a similar advance in coastline throughout the entire length of the beach. The planned advance (of some 20 metres) is compatible with the particle size of the replenishment material, when taking a run-off slope of 10H/1V.

At the time of placing it is necessary to consider that the new sand will not immediately be placed according to its equilibrium profile and that it will initially take a specific form that is different from that occurring from wave action and one depending on the construction method employed in the beach regeneration. The resulting geometry is similar to a pile with its run-off slope and a certain advance of the coastline that is different to the profile eventually adopted. In order to estimate this transitory situation it is taken that sand is placed in relation to a horizontal surface that at a certain distance from the shore will fall at a constant slope until intersecting the native profile. This provisional profile is referred to as the dumping profile.

The dumping operations are planned to be carried out by pipeline from a suction dredger that will dredge sand and carry this to the pipe outlet on the beach. The profile of the beach will then be formed by mechanical and manual means on shore in order to obtain the theoretical design profiles.

4. La rehabilitación de los canales

4.1. Premisas fundamentales en el diseño de la rehabilitación de los canales

Asimismo el proyecto recoge un conjunto de actuaciones y su valoración, encaminadas a proteger los márgenes y el lecho de los canales, con el objeto de cumplir la función para la que fueron diseñados, esto es, evacuar las aguas pluviales de forma eficiente.

Entre los diversos métodos desarrollados para la protección y defensa de cauces, cabe citar la colocación de escollera, gaviones, espigones fluviales, traviesas, geoceldas, hormigón, suelo-cemento, etc.; la ejecución de escollera en márgenes es posiblemente el más utilizado de ellos, de manera que, generalmente, los elementos pétreos que constituyen la escollera se colocan sin ligante sobre taludes estables bajo un punto de vista geotécnico (14).

Considerando la naturaleza, blanda o poco compacta, de los suelos que constituyen los márgenes de los distintos canales se han descartado soluciones rígidas, como el hormigón, para plantear soluciones más flexibles como la colocación de escollera, la cual se puede adaptar a pequeños movimientos, por erosión, en márgenes y cauce.

A partir de la geometría de las secciones registradas, se determinó la velocidad que puede adquirir el agua, considerando que las pendientes en los canales se sitúan entre el 1‰ y 3‰. Diversas expresiones (Tadini, Bazin, Manning, etc.) proporcionan una velocidad máxima del agua inferior a 1 m/seg, de manera que incluso duplicando la velocidad del agua, la expresión de Cox y Campbell proporciona un tamaño de piedra inferior a 1cm (15). A pesar de estos condicionantes, se ha considerado adecuado disponer un tamaño de piedra superior, en previsión de lluvias torrenciales, viento, desbordamiento de los canales, lo que implicaría una altura de lámina mayor, etc.

En cuanto a la piedra se han exigido las siguientes características físicas y químicas:

Características físicas:

- Densidad superior a 2750 kg/m³
- Resistencia media a compresión simple igual o superior a 80 MPa
- Integridad de los bloques, en cuanto a capacidad para continuar siendo un único bloque después

With regards to the construction procedure for the sea works, the renovation work of the groynes has been planned to start from the west to ensure that the built-up groynes do not damage any of the unprotected downdrift sections. As the purpose of these groynes is to keep the sand in place, the action is planned to work in terms of groyne cells where the sand is accreted in the space between every two groynes (cell) as soon as possible once the two groynes retaining the same have been completed. This will then minimize the impact downdrift of the renovation works.

4. Renovation of channels

4.1. Basic premises of the channel renovation

The project incorporates a series of actions and appraisals, aimed at protecting the channel banks and bottom so that the channel might resume the function it was designed for and, namely, the efficient drainage of stormwater.

Among the different methods developed for the protection and defence of waterways, we may refer to the placement of rubble-mound revetments, gabions, river groynes, spurs, geocells, concrete, cement-base, etc. The use of rubble-mound revetments on the banks is possibly the most widely-used of all these techniques and, here, the rock elements forming the revetment are normally placed without any type of binder on geotechnically stable slopes (14).

In view of the soft or slight loose nature of the soils forming the banks of the channels, we have discarded rigid solutions such as concrete, in favour of more flexible possibilities such as the placement of rubble revetment which can be adapted in response to small movement caused by erosion in the banks and channel bed.

The potential water velocity was established in accordance with the geometry of survey sections and where it was considered that the channel gradients fell by between 1‰ and 3‰. Different formulas (Tadini, Bazin, Manning, etc.) give a maximum water velocity of less than 1 m/sec, and even if this were doubled, the Cox and Campbell formula would still give a rock size of less than 1 cm. In spite of these conditions, it has been considered

de su manipulación durante el transporte y puesta en obra

- Resistencia a la fragmentación, valorada mediante un coeficiente de los Ángeles inferior a 35

Características químicas:

- Bloques estables frente a la inmersión en agua, los cuales no deben presentar fisuras después de estar sumergidos durante 24 horas
- En ciclos de humedad y sequedad la pérdida de masa será inferior al 2%
- Valoración de signos del efecto Sonnenbrand, caracterizado por la aparición de manchas de color gris o blanco, y posterior generación de grietas capilares que se extienden de forma radial desde las manchas y se interconectan entre ellas, reduciendo la resistencia mecánica del bloque

4.2. Ejecución de las obras de rehabilitación de los canales

En relación con la canalización de la red de desagües en Beira, previamente a la colocación de la protección de la escollera se ha proyectado la ejecución de una excavación en taludes y fondo de los canales hasta una profundidad del orden de 80-90 cm perpendicular a la superficie excavada, sin que se supere el ángulo de 20° en los taludes.

Se ha previsto colocar el manto de escollera formando un entramado tridimensional que proporcione al conjunto la máxima trabazón posible. En este sentido se ha recomendado alternar la orientación de bloques de manera que la dimensión mayor sea paralela al paramento, con otras en que su longitud mayor esté orientada de trasdós a intradós. Así mismo, se ha recomendado seleccionar cada bloque con objeto de reducir los huecos, lo que contribuirá a una mayor trabazón y estabilidad. La escollera se transportará por ferrocarril desde cantera hasta la estación de Beira y desde aquí hasta el punto de colocación en camión.

Decidida la solución de protección de márgenes y cauce mediante escollera, el proyecto contempla la colocación de las siguientes capas de piedra de basalto:

- capas de bloques de 5 kg a 10 kg que constituyen un filtro de aproximadamente 25 cm de espesor

necessary to place a larger rock size to protect against torrential rain, wind or the flooding of the channels which would all lead to higher water levels, etc.

The rock employed in the revetment has to have the following physical and chemical properties:

Physical properties:

- *Density over 2750 kg/m³*
- *Mean compressive strength equal or greater than 80 Mpa*
- *Block integrity in terms of the capacity to remain as a single block after handling, transport and placement.*
- *Los Angeles coefficient controlling resistance to fragmentation of less than 35*

Chemical properties:

- *Stability after immersion in water. Blocks should not crack after being submerged for 24 hours*
- *Mass loss of no more than 2% during humid and dry periods*
- *Evaluation of signs of the Sonnenbrand effect, characterised by the appearance of grey or white spots and subsequent radiating and interconnected cracking from and between the spots, reducing the mechanical strength of the block.*

4.2. Channel renovation work

Prior to the placement of rubble-mound revetments on the stormwater drainage channels in Beira, it will first be necessary to remove 80-90 cm of soil on the slopes and bottoms of the channels, while ensuring that the slope angle never exceeds 20°.

The rubble mound will be laid in a three-dimensional manner in order to provide the maximum interlocking capacity possible. In this respect it has been recommended that the direction of the blocks be alternated with blocks whose longer side is parallel to the crest alternating with others whose longer side extends from back to front. It has also been recommended that each block be selected in order to reduce voids and ensure better interlocking and stability. The rubble will be transported by rail from the quarry to Beira station and from there by lorry to the point of placement.

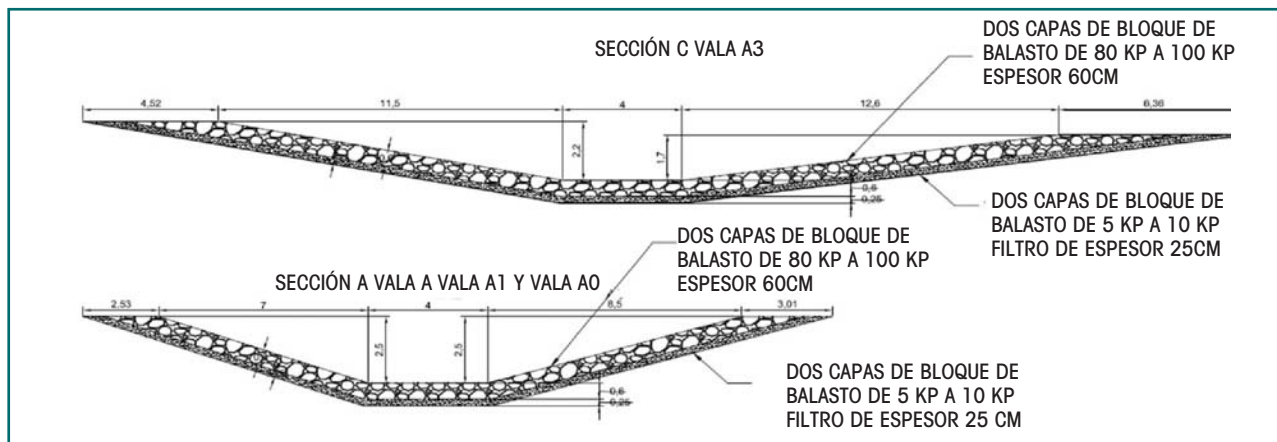


Fig. 10. Sección planteada para los canales de desagüe procedente de los planos del proyecto "Fortalecimiento del Municipio de Beira para la planificación y diseño de infraestructuras de defensa litoral y drenaje"/Proposed section of the drainage channels incorporated in the project "Reinforcement of the Beira municipality - planning and design of coastal defence and drainage infrastructure".

- capas de bloques de 80 kg a 100 kg, con un espesor de aproximadamente 60 cm

En la figura 10 se aprecia la protección mediante escollera descrita para los distintos canales.

5. Conclusiones

La subida del nivel medio del mar y la variación en el régimen de presiones y vientos debidos al cambio climático han afectado y seguirán afectando en forma frontal a la frecuencia de presentación e intensidad de las inundaciones en la costa de Beira.

Los efectos más importantes que el cambio climático puede suponer en un futuro en las playas de Beira, se manifestarán básicamente en la variación de la cota de inundación y en el retroceso de la línea de costa. Este retroceso estará inducido por un aumento en el nivel medio del mar, que hace que el perfil activo de la playa tenga que ascender para llegar al equilibrio dinámico. Asimismo, con respecto a los posibles efectos sobre las obras marítimas, el cambio climático puede suponer alteraciones en el rebase, pudiendo originar pérdidas de material y en consecuencia pérdida de la estabilidad estructural de los espigones.

Con las actuaciones proyectadas la probabilidad de que las inundaciones generen daños a lo largo de la costa en Beira será atenuada, si bien independientemente de las estructuras de protección existentes, todas las costas son vulnerables o tienen siempre algún riesgo de inundación o un cierto riesgo de fallo.

On establishing the use of rubble-mound revetment to protect the banks and channel bottoms, it was then decided that the basalt employed in the same would be set in the following layers:

- layers of 5 to 10 kg blocks, forming a filter approximately 25 cm thick.
- layers of 80 to 100 kg blocks up to a thickness of approximately 60 cm.

Fig. 10 shows the rubble-mound protection designed for the different channels

5. Conclusions

The rise in the mean sea level and the variation in the pressure and wind system due to climate change have directly affected and will continue to affect the frequency and intensity of storms off the coast of Beira.

The potential effects of climate change on the beaches of Beira will essentially be revealed in the form of variations in the flood level and the retreat of the coastline. This retreat will be caused by an increase in the mean sea level that will force the active profile of the beach to rise in order to reach dynamic equilibrium. With respect to the possible effects of climate change on sea works, this may be seen in the form of changes in overflow that may cause a loss of material and the ensuing loss of structural stability of the groynes.

While the projected works will serve to mitigate the possibility of flood damage throughout the Beira coast,

Por ello, en previsión de que los efectos del cambio climático perduren en las próximas décadas, es obligado considerar el probable incremento del nivel medio del mar en todos los proyectos de ingeniería de costas, que como el presentado en este artículo, tienen una extensión temporal o vida útil prevista superior a treinta o cuarenta años.

Dada la importancia de estos fenómenos, es necesario anticiparse al problema y apoyar programas de cooperación tendentes a su comprensión y modelización, especialmente en las áreas costeras bajas de países sub-desarrollados como Mozambique. Asimismo se plantea la necesidad de realizar en un futuro, un seguimiento y control ambiental de la regeneración de estas playas y de la rehabilitación de la red de canales de desagüe que garantizan la evacuación de las aguas pluviales de la ciudad, prestando especial atención a la zona de Chipangara/Palmeiras, que presenta un entorno dinámico y frágil.

6. Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a D. Eduardo López Busquets, ex-Embajador de España en Mozambique, a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo, al Doctor D. António Inácio Comando Suluda de la Universidad Pedagógica de Mozambique, a D. Daviz Mpebo Simango, Presidente del Consejo Municipal de Beira, y a todo su equipo. ♦

all coastlines, regardless of the defence structures in place, are vulnerable or potentially liable to flooding or failure. For this reason, and in view of the fact that the effects of climate change will continue over coming decades, it is essential to consider the probable increase in mean sea level in all coastal engineering projects that have a predicted lifetime extension or working life of over thirty or forty years, as is the case of the one described in this article.

Given the importance of these phenomena, it is necessary to anticipate the problem and support cooperation programmes encompassing and modelling the same, particularly in the lower coastal areas of less developed countries such as Mozambique. It is also considered imperative to ensure the future monitoring and control of the regeneration of these beaches and the renovation of the city's stormwater drainage system, particularly in the area of Chipangara/Palmeiras on account of its dynamic and fragile environment.

6. Acknowledgements

The authors wish to acknowledge Mr Eduardo López-Busquets, former Ambassador of Spain to Mozambique, the Spanish International Development Cooperation Agency, Dr. António Inácio Comando Suluda of the l'Université Pédagogique au Mozambique, Mr Daviz Mpebo Simango, President of the Municipal Council of Beira, and to all his team. ♦

Referencias/References:

- (1) PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO, "Índice sobre Desarrollo Humano 2011", U.S.A., Organización de las Naciones Unidas, 2011, 185p., ISBN:9780230363311.
- (2) ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS. Department of Peacekeeping Operations, Cartographic Section, 2004.
- (3) THE UNITED KINGDOM HYDROGRAPHIC OFFICE, Admiralty Tide Tables, Indian Ocean and South China Sea, Vol 3, NP 203-10,2010.
- (4) RUBY, J., CANHANGA, S., COSA, O., "Assessment of the Impacts of Climate Changes to Level Rise at Costa do Sol Beach in Maputo - Mozambique", United Nations Environmental Programme (UNEP), 2010.
- (5) INSTITUTO NACIONAL DE GESTÃO DE CALAMIDADES, Synthesis Report, INGC Climate Change Report: Study on the Impact of Climate Change on Disaster Risk in Mozambique, Mo-

- zambique, Van Logchem B., Brito R., 2009.
- (6) MAPARAGEM, A. S., SAIDE, F. V., "Impacto das Ondas Oceânicas nas Praias da Cidade da Beira: uma Contribuição para a Erosão Costeira", Universidade Eduardo Mondlane., 2005.
- (7) ARCADIS EUROCONSULT, "Programa de Gestão da Zona Costeira para Beira, Moçambique", Arhem, Países Bajos,1998.
- (8) COMMISSIE VOOR DE MILIEUEFFECTRAP PORTAGE, "Advisory Review of the Integrated Coastal Zone Management Plan for the City of Beira, Mozambique", Utrecht, Holanda, 1999, 37 p., ISBN:9042105283.
- (9) JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY, "The Study of Maintenance and Improvement Plan of Acces Channel of Beira Port in the Republic of Mozambique", Mozambique, 1998.
- (10) MANGOR, K., "Assessment of Options for Coastal Protection of the Beira Shoreline", Suiza, 2010.

- (11) DEAN, R.G., "Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts", Ocean Engineering , Technical Report, University of Delaware, Newark, U.S.A., 1977, nº 12.
- (12) BRUNN, P., "Coast Erosion and the Development of Beach Profiles", Beach Erosion Board Technical Memorandum, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, U.S.A., 1954, nº 44.
- (13) VAN DER MEER, J.W., PILARCZYK, K.W., "Large Scale Verification Test on Rock Slope Stability", American Society os Civil Engineers, Proceedings of the 21st International Conference on Coastal Engineering, Torremolinos, Málaga, España, 1988.
- (14) MAGDALENO MAS, F., "Manual de Técnicas de Restauración Fluvial", CEDEX, Ministerio de Fomento, 2008, 300 p., ISBN:978-84-7790-522-6.
- (15) MARTIN VIDE, J. P., "Ingeniería de Ríos",2º ed. Barcelona: Ediciones UPC, 2006, 381 p., ISBN:978-84-8301-900-9.