

Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente
Instituto de Oceanología
Departamento de Procesos Costeros

ACTUACIONES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN
EN PLAYAS BIOGÉNICAS
EL CASO DE LA PLAYA DE VARADERO

RESUMEN

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas

Autor: Lic. Carlos García Hemández

Tutor: Dr. José Luis Juanes Martí

La Habana
2005

SÍNTESIS

Varadero, principal recurso turístico de Cuba, constituye un ejemplo de aquellas playas donde ha sido necesario acometer acciones para el control de la erosión. El diseño de las actuaciones ha estado avalado por los resultados de más de 30 años de investigaciones.

El monitoreo que siguió a las actuaciones permite afirmar que las medidas han resultado adecuadas para detener el deterioro de la playa y garantizar la protección de instalaciones. También demuestra que la *Alimentación Artificial de Arena* ha sido la acción más efectiva para restituir las condiciones funcionales y estéticas de la playa.

Para el diseño y valoración de la efectividad se han considerado las particularidades de los Sistemas Costeros biogénicos y el comportamiento de su perfil de equilibrio. Como parte del análisis se prueba que la función $h(y) = Ay^m$ propuesta por Dean (1977), resulta adecuada para describir la condición de equilibrio. Para la arena de Varadero, el parámetro A se relaciona con el diámetro del sedimento (ϕ) por la expresión $A = 0.16D^{0.22}$, mientras m puede considerarse constante (0.67), tal como deduce Dean (1977).

La descripción del perfil de equilibrio propuesta para Varadero, se ajusta a otras playas biogénicas de Cuba y la región del Caribe con mejores resultados que los que se obtienen al considerar los parámetros propuestos para las playas continentales formadas por materiales terrígenos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
I. MATERIALES Y MÉTODOS	9
1.1. Técnicas de diseño y monitoreo	10
1.2. Particularidades del perfil de equilibrio	12
1.3. Aplicación a otras playas tropicales	13
II. CRONOLOGÍA DE LAS ACCIONES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN EN VARADERO	14
III. FUNDAMENTO, DISEÑO Y EFECTIVIDAD DE LAS ACCIONES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN EN VARADERO	16
111.1. Alimentación Artificial de Arena	16
111.1.1. Fundamento y Diseño	16
111.1.2. Efectividad	18
111.2. Recuperación de las dunas	19
111.2.1. Fundamento y diseño	20
111.2.2. Efectividad	22
111.3. Protección de instalaciones con geotextiles	23
111.3.1. Fundamento y diseño	23
111.3.2. Efectividad	24
IV. FUNCIONAMIENTO DEL PERFIL DE EQUILIBRIO EN PLAYAS BIOGÉNICAS Y SU INFLUENCIA EN EL DISEÑO DE ACTUACIONES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN	24
IV.1. Perfil de Equilibrio	25
IV.2. Aplicación a otras playas tropicales	27
CONCLUSIONES	28
RECOMENDACIONES	29
PUBLICACIONES REALIZADAS POR EL AUTOR SOBRE EL TEMA DE LA TESIS Y PARTICIPACIÓN EN EVENTOS CIENTÍFICOS	
BIBLIOGRAFÍA BÁSICA FUNDAMENTAL	

Las Tablas, Figuras y Fotos se encuentran al final del RESUMEN

INTRODUCCIÓN

La economía de muchos países caribeños está relacionada con la actividad turística. La mayor parte del turismo que visita la región se encuentra atraída por la excelente calidad de las playas, que se distinguen por las agradables temperaturas de las regiones tropicales, la transparencia de las aguas y la calidad de la arena.

En el informe "Diagnóstico de los procesos de erosión en las playas arenosas del Caribe", Juanes, J. L. y col. (2003) destacan que las playas constituyen un importante recurso natural, tanto para los países continentales del Gran Caribe, como para los Estados de las Pequeñas Islas en Desarrollo. Dentro de los estados caribeños, el informe señala que «para las Pequeñas Islas, la carencia de otros recursos como combustibles y minerales y escasa disponibilidad de recursos hídricos, hacen que la explotación turística se convierta en una actividad económica fundamental».

Como indicador de la importancia del turismo a nivel regional, Juanes, J. L. y col. (2003) mencionan las cifras oficiales de la Organización del Turismo del Caribe, según las cuales en el año 1999 la región fue visitada por más de 19 millones de personas, destacándose Puerto Rico, Cancún, República Dominicana, Cuba, Bahamas y Jamaica como los principales destinos, todos por encima de un millón de visitantes anuales.

Sin embargo, en contraste con el impetuoso desarrollo del turismo, las playas, que constituyen el principal atractivo de la región, han venido experimentando en los últimos años un deterioro generalizado de sus condiciones estéticas y recreativas. Una de las principales causas de este deterioro lo constituye la erosión costera.

En el marco regional, estudios realizados por Cambers (1985) indican que desde hace varias décadas, la línea de costa en las Antillas Menores ha experimentado un alarmante retroceso. Investigaciones más recientes realizadas por esta autora (Cambers, 1996) y citadas por Juanes, J. L. y col. (2003), precisan que a partir del monitoreo del perfil de playa en las pequeñas islas del Caribe, se ha comprobado que cerca del 70 % de las costas están afectadas por el fenómeno de la erosión con ritmos de retroceso entre 0.27 y 1.06 *metros* año.

Para las costas de Cuba, Juanes (1996) realizó un inventario que sintetiza las características de 140 playas de nuestro archipiélago. Al evaluar las afectaciones por erosión, este autor demostró que el 86 % de las playas inventariadas han experimentado un retroceso de la línea de costa en los últimos años, que ha conducido a un deterioro de sus condiciones recreativas. Investigaciones realizadas por Tristá (2003) para las playas interiores confirmaron el carácter generalizado de la erosión ya que de las 41 playas estudiadas, 13 estaban sometidas a erosión intensa, 24 a una erosión moderada y sólo en cuatro la erosión podía clasificarse como débil.

Para la región del Caribe, se ha identificado que la erosión responde a causas de carácter tanto natural como antrópico. Entre las causas naturales se destaca el efecto del ascenso del nivel del mar y las afectaciones que provocan las olas durante los eventos meteorológicos extremos, unido al déficit en los ingresos de las fuentes naturales y cambios tectónicos recientes. Entre las causas antrópicas sobresale la actividad minera, tanto en la plataforma submarina como en las dunas, la incorrecta ubicación de instalaciones próximas a la orilla, el uso de obras de ingeniería inadecuadas, la deforestación y la destrucción de los arrecifes coralinos u otras comunidades bentónicas.

Dada la diversidad de factores que influyen en la erosión, Juanes, J. L. y col. (2003) destacan que "las acciones para mitigarla requieren no sólo de investigaciones científicas que expliquen adecuadamente el fenómeno sino, además, de la implementación de regulaciones y leyes que aseguren el correcto manejo de la zona costera y de las técnicas ingenieras apropiadas para recuperar y proteger los sectores dañados".

En la ingeniería costera se reconocen cinco grandes grupos de alternativas para enfrentar la erosión (Tabla 1), que pasan por acorazar la costa (malecones y revestimientos), moderar las tasas de retroceso (espigones y rompeolas), restaurar las playas (Alimentación Artificial de Arena), adaptarse a la erosión (retroceder en la medida que la costa se erosiona) y la abstención, que no implica actuaciones.

El Coastal Engineering Manual (CERC, 2002) destaca que el éxito de cualquiera de las alternativas depende del grado de conocimiento científico e ingeniero que se

tenga del funcionamiento del litoral y la compatibilidad con los intereses económicos, ambientales, institucionales, políticos, sociales, legales y estéticos.

Con vistas a lograr un diseño óptimo en la lucha contra la erosión, a lo largo del tiempo se han desarrollado modelos numéricos que permiten describir el funcionamiento de la costa y predecir su respuesta a determinadas acciones del hombre. Sin embargo, la mayoría de estos modelos se han desarrollado para las playas continentales de latitudes templadas, que presentan características que las diferencian de nuestras playas tropicales.

Al analizar los materiales de las regiones templadas, Krumbein y Sloss (1963) señalan que el cuarzo y los feldespatos están presentes en un 90 % del transporte litoral y el cuarzo representa el 70 % de la arena de las playas. Para las regiones tropicales, el Coastal Engineering Manual (CERC, 2002) destaca que a diferencia de las zonas templadas, los materiales biogénicos son mayoritarios, lo que es particularmente válido en el caso de las islas donde predomina el ambiente marino y los ingresos de materiales terrígenos son limitados.

Cuba no escapa a esta regularidad. El inventario de las playas cubanas realizado por Juanes (1996) demostró que existe un predominio de las playas exteriores formadas por sedimentos biogénicos. De 130 playas exteriores evaluadas, más del 75 % están formadas por sedimentos biogénicos u oolítico-biogénicos.

Al estudiar el funcionamiento de estas playas, Juanes (1996) destacó las diferencias con las regiones continentales al afirmar que "tanto la ubicación de las fuentes de ingreso biogénica y oolítica en la plataforma submarina, como las propiedades mecánicas de las partículas biogénico-carbonatadas, constituyen particularidades que caracterizan a la mayoría de los Sistemas Costeros de Cuba".

Con respecto a las propiedades mecánicas de la arena, Juanes (1996) hace referencia a los resultados experimentales de Maiklem (1968), citados por Stoddart (1978), que demuestran que para los fragmentos esqueléticos con diferentes formas, la velocidad de caída es notablemente inferior a la de partículas esferoides de aragonita y calcita. Según Medvediev y Juanes (1981), estas diferencias no sólo responden a la densidad del mineral y forma de las partículas sino también, a la porosidad que caracteriza a los fragmentos esqueléticos biogénicos.

Los resultados de Juanes (1996) sientan las bases de un amplio tema de investigación al señalar que "las pequeñas variaciones en la velocidad de caída con respecto al aumento del diámetro de la partícula, así como su porosidad, le confieren a las partículas de arenas biogénicas mayores posibilidades de ser transportadas en suspensión, propiedad que también deberá tenerse presente a la hora de evaluar las soluciones ingenieras para mitigar la erosión de las playas cubanas".

Evidentemente, para describir el funcionamiento de las playas biogénicas y llegar a criterios sólidos en el diseño de las medidas ingenieras para el control de la erosión, se requiere de un considerable volumen de información histórica acerca del funcionamiento de estas playas, unido a ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físico-mecánicas de sus sedimentos.

En nuestro país, el monitoreo de las variaciones morfológicas y sedimentológicas de las playas comenzó en la década del 70, cuando se realizaron las primeras investigaciones en Varadero por parte de especialistas del Instituto de Oceanología con la asesoría de prestigiosos especialistas soviéticos (Avallo, O., Ionin, A., Medvediev, V. y Pavlidis, Y., 1973).

Actualmente, el programa de monitoreo en Varadero cuenta con más de 30 años de observaciones sistemáticas, lo que constituye un importante logro no sólo en el marco nacional, sino también regional. Las actividades que más se destacan dentro del programa han sido las nivelaciones topográficas del perfil emergido y la zona próxima a la orilla, los sondeos hasta la profundidad de cierre del perfil y los muestreos de sedimentos.

Desde etapas muy tempranas, el monitoreo demostró que Varadero se encontraba sometido a un proceso de erosión irreversible (Juanes y col., 1981). El análisis de las variaciones del volumen del perfil, reveló que entre las décadas del 70 y el 80, Varadero perdió arena a razón de 50 000 m³/año (García, C. y Juanes, J. L., 1995), lo que representó un retroceso de la línea de costa de 1.2 *m/año* (Juanes, J. L., 1996).

Si bien se ha podido identificar que las causas de erosión en Varadero son tanto de carácter natural como antrópico, los problemas derivados de acciones inadecuadas del hombre tienen un papel fundamental. Entre las causas que han tenido una mayor

incidencia están las construcciones próximas a la costa, las extracciones de arena para la construcción y los espigones de entrada al canal de Paso Malo, que se interponen al transporte de sedimentos favoreciendo la fuga de la arena.

Ante esta problemática, resulta comprensible que las acciones para mitigar la erosión se orientaran a eliminar los factores que la generan y a la ejecución de trabajos para la recuperación de los sectores erosionados.

Entre las acciones para eliminar los factores que provocan la erosión se destaca un conjunto de medidas normativas y regulativas, que incluyen la estricta prohibición de las extracciones de arena en áreas de la plataforma y las dunas salvo con fines de recuperación de la propia playa y el establecimiento de las líneas límites de construcción, de acuerdo con el Decreto Ley 212 (Gaceta Oficial de la República de Cuba, 2000), con lo que se ha logrado la adecuada localización de los nuevos hoteles.

Para la recuperación de los sectores de playa erosionados, en 1986 se estableció el primer "Plan de Medidas para la Recuperación y Mantenimiento de la Playa" que concebía como acciones prioritarias la eliminación de viejas instalaciones y muros en el litoral, la reconstrucción y reforestación de las dunas y el suministro artificial de arena.

Dando continuidad a este primer plan, a lo largo de casi 20 años se han venido aplicando una serie de medidas para el control de la erosión en Varadero que van desde la simple demolición de muros y remodelación del litoral hasta complejos trabajos de vertimiento de arena.

En la búsqueda de alternativas para combatir la erosión ha sido necesario probar reconocidos modelos matemáticos de evolución costera. Los esfuerzos realizados por mantener el monitoreo de la playa al concluir los trabajos han permitido conocer cuan acertados han sido los pronósticos y en consecuencia, realizar los ajustes necesarios.

El considerable volumen de información acumulado permite afirmar que Varadero ha constituido un laboratorio a escala real, para estudiar el comportamiento dinámico de la playa.

Atendiendo a la necesidad de disponer de herramientas que permitan describir el funcionamiento de las playas biogénicas con vistas a lograr un diseño cada vez más

eficiente de las acciones para combatir la erosión, la Tesis recurre al amplio volumen de información disponible en Varadero para plantear la hipótesis:

Las medidas adoptadas en Varadero han resultado adecuadas para combatir la erosión. El parámetro A , calculado a partir de los resultados experimentales de velocidad de caída y el análisis de perfiles naturales, permite describir la condición de equilibrio de las playas biogénicas y reafirma la validez de la expresión $\eta = Ay^m$ (Bruun, 1954 y Dean, 1977) para representar la forma del perfil.

Para probar la hipótesis, la Tesis incluye los siguientes objetivos:

Describir cronológicamente las acciones para combatir la erosión en Varadero y clasificarlas de acuerdo con su objetivo y técnicas de ejecución.

Probar el papel desempeñado por el monitoreo de las variaciones morfológicas y sedimentológicas de la playa y el empleo de modelos matemáticos en el diseño y evaluación de la efectividad de las acciones para el control de la erosión.

Demostrar la efectividad de las medidas adoptadas para el control de la erosión, considerando las particularidades de los sedimentos biogénicos.

Identificar los modelos y coeficientes que mejor se ajustan a las condiciones del perfil de equilibrio en Varadero y que pueden ser aplicados a otras playas biogénicas de la región.

Sobre la base de una revisión de los proyectos e informes elaborados por el Instituto de Oceanología y otras instituciones científicas, administrativas y ejecutoras, se realiza una descripción de la evolución que ha seguido Varadero haciendo énfasis en las alternativas ingenieras adoptadas para el control de la erosión. Las alternativas se clasifican en dos grupos fundamentales: por una parte, las medidas de emergencia dirigidas únicamente a proteger objetivos de alto valor económico o social y por otra, aquellas actuaciones que han contribuido verdaderamente a restituirle a la playa sus condiciones recreativas, estéticas y funcionales.

Para demostrar la importancia del monitoreo y la aplicación de modelos matemáticos en la selección de las alternativas de protección, se prueba su importancia en la correcta interpretación del funcionamiento del Sistema Costero. El análisis se desarrolla de forma independiente para cada tipo de actuación, lo que permite describir de manera organizada los elementos considerados en el diseño.

Utilizando la información obtenida con el monitoreo que siguió a la ejecución de los trabajos, se realiza una evaluación de la efectividad. El análisis se orienta a determinar en que medida las obras cumplen con el objetivo de control de la erosión para el que fueron concebidas.

A partir de los resultados obtenidos en los proyectos individuales, se realiza una valoración integral del funcionamiento del perfil de playa. En el proceso de investigación se determinan las expresiones y coeficientes que mejor se ajustan al perfil de equilibrio de la playa de Varadero. En los modelos evaluados, se identifican aquellos coeficientes que dependen de factores comunes a otras playas de la región y que pueden ser utilizados en el diseño de futuras actuaciones para el control de la erosión.

Novedad científica e importancia práctica:

La Tesis constituye en primer término una valoración integral de los resultados alcanzados durante más de 20 años de lucha contra la erosión en la playa de Varadero. Esto no sólo es útil desde el punto de vista científico, sino que también suministra una valiosa información para que las autoridades turísticas, ambientales y administrativas puedan orientar de forma eficiente los recursos asignados para la recuperación y mantenimiento del más importante recurso turístico de Cuba.

La Tesis describe los fundamentos metodológicos y herramientas del programa de monitoreo desarrollado en Varadero para conocer el funcionamiento dinámico de la playa, diseñar las actuaciones para el control de la erosión y medir su efectividad. La mayoría de estos métodos pueden ser aplicados a otras playas de la región, por lo que la Tesis contribuye a orientar los futuros programas de investigación.

Como resultado de evaluar el comportamiento de la playa de Varadero se presenta una descripción del funcionamiento del perfil de equilibrio, que tiene en cuenta las particularidades de los sedimentos biogénicos. Esto hace que la ecuación pueda aplicarse a otras playas biogénicas de la región con mejores resultados que los que se obtienen empleando directamente los modelos desarrollados para las playas continentales.

La expresión de equilibrio propuesta puede ser introducida en una serie de modelos matemáticos de aplicación práctica en la ingeniería costera, lo que hace más eficiente su uso para el diseño y evaluación de los trabajos de recuperación de nuestras playas.

La Tesis se ha estructurado en cuatro capítulos:

El Capítulo I describe los materiales y métodos utilizados en la investigación.

En el Capítulo II se presenta una descripción cronológica de las acciones que se han emprendido para mitigar la erosión en Varadero y se clasifican de acuerdo con el objetivo para el que fueron concebidas y las técnicas de ejecución empleadas.

El Capítulo III trata de las técnicas de diseño para cada tipo de actuación y la efectividad de su aplicación. En el contenido del capítulo se destaca el papel desempeñado por el monitoreo de las variaciones morfológicas y sedimentológicas y la aplicación de modelos matemáticos en la selección y diseño de las alternativas para combatir la erosión. Igualmente se pone de relieve el papel del monitoreo y los modelos en la evaluación de la efectividad.

El Capítulo IV sintetiza los resultados obtenidos en Varadero acerca del funcionamiento del perfil de equilibrio. Se destaca el papel que desempeñan las propiedades físico-mecánicas de los sedimentos biogénicos en el desarrollo de la forma del perfil y la manera en que esto afecta el diseño de las actuaciones para el control de la erosión. Se incluye una valoración de las particularidades de otras playas cubanas y de la región del Caribe, para destacar la conveniencia de utilizar los resultados obtenidos para Varadero, en lugar de aplicar directamente los modelos planteados en la literatura para las playas continentales de latitudes templadas.

Nuestra máxima aspiración es que los resultados de la Tesis contribuyan a profundizar los conocimientos acerca del funcionamiento dinámico de las playas biogénicas y permitan obtener resultados más eficientes en la implementación de medidas para el control de la erosión.

I. MATERIALES Y MÉTODOS

Considerando la utilidad de los términos "Sistema Costero" y "Balance Sedimentario" para llegar a la correcta interpretación de los procesos litorales, estos conceptos se adoptaron como fundamento teórico general de nuestra tesis y se hace referencia a ellos a lo largo de todo el documento. En particular, la descripción del funcionamiento del Sistema Costero presentada por Juanes (1996) para la playa de Varadero, constituyó el punto de partida de nuestras investigaciones.

La síntesis realizada por este autor acerca de los ritmos de pérdida de arena en Varadero y sus causas dejó demostrado el carácter irreversible de los procesos de erosión y la necesidad de aplicar medidas de mejoramiento. Esto permitió que en nuestra tesis, abordáramos directamente el tema de las medidas adoptadas para el control de la erosión, haciendo sólo una breve reseña de las condiciones que motivaron su aplicación.

Para el análisis partimos de una descripción de la evolución histórica de la playa orientada a identificar las acciones para combatir la erosión (Capítulo 11). Esta descripción se realizó a partir de la consulta de documentos elaborados por diferentes instituciones de investigación, administrativas y ejecutoras, que durante más de 25 años han estado involucradas con el estudio de la playa y la implementación de medidas para su mejoramiento.

Para la clasificación de las actuaciones, tomamos como referencia inicial los grupos propuestos por el Coastal Engineering Manual (CERC, 2002) sobre la base de los resultados de Pope (1997). No obstante, teniendo en cuenta que la mayor parte de las acciones ejecutadas en Varadero tienen un carácter combinado y en muchos casos cumplen con más de un objetivo, para su clasificación final las hemos agrupado siguiendo un enfoque integral que contempla además de los objetivos generales, las técnicas y medios utilizados en su ejecución.

Para evaluar el funcionamiento del Sistema Costero, partimos de la información suministrada por el monitoreo morfológico y sedimentológico de la playa, apoyado por el procesamiento automatizado de la información y la evaluación de modelos matemáticos de evolución costera.

1.1. Técnicas de diseño y monitoreo

El análisis morfológico de la playa estuvo sustentado por las nivelaciones topográficas de la parte emergida de acuerdo con la metodología descrita por Dvorstiak (1984) y por perfiles batimétricos realizados con ecosondas digitales y posicionamiento con GPS. Para el procesamiento de la información topográfica y análisis morfológico se desarrolló un programa en Visual Basic 3.0.

En cuanto a las propiedades de la arena, en los proyectos realizados en Varadero se siguió un control sistemático de su granulometría y composición. Para el análisis granulométrico, se utilizó el método de tamizado en seco. La determinación de la mediana (M_d), la media (μ) y la desviación estándar (σ) de las muestras colectadas se realizó por el método de los momentos y aplicando la conversión a unidades phi (ϕ) propuesta por Krumbein (1934, 1938). En el caso que los tamices no tuvieran tamaños de clase uniformes, los cálculos se realizaron por métodos gráficos empleando papel logarítmico normal y haciendo uso de las formulaciones de Folk y Ward (1957).

El análisis de la composición de los sedimentos se realizó por la identificación y conteo al microscopio de los fragmentos de arena previamente tamizados. Para cada una de las muestras se analizaron las fracciones 0.10-0.25, 0.25-0.50, 0.50-1.00 y 1.00-2.00 mm y de cada una se tomaron 100 granos aleatoriamente.

Además de las técnicas de monitoreo y análisis de laboratorio, para el diseño de las actuaciones y evaluación de efectividad se requirió de la aplicación de modelos matemáticos de evolución costera.

Para representar la forma de equilibrio del perfil se seleccionó expresión propuesta por Dean (1977), en la que la profundidad de cualquier punto ($h(y)$) se relaciona con la distancia a la costa (y), a través de un parámetro A (Fig.1) que depende de las

características del sedimento y un exponente m relacionado con la fuerza modeladora del perfil:

$$\eta = Ay^m$$

La descripción del perfil de equilibrio en condiciones extremas se basó en el modelo desarrollado por Vellinga (1983) que plantea la ecuación:

$$h = 0.70 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.17} \left(\frac{w}{L_0} \right)^{0.44} y^{0.11}$$

En la cual h representa la profundidad a una distancia y de la costa, H_0 es la altura significativa de la ola en aguas profundas, L_0 su longitud de onda y w la velocidad de caída de la arena.

La descripción del comportamiento del perfil a partir de modelos numéricos, también requirió de una caracterización del oleaje en Varadero. En el diseño y evaluación de la mayor parte de los proyectos se utilizaron los datos recogidos en el PC Global Wave Statistics Report (Cuadrícula 32), que contiene información elaborada a partir de observaciones visuales de oleaje y viento y un modelo de Hindcasting (NMIMET). Además de las estadísticas de oleaje generales, para evaluar el perfil de erosión se estimaron las olas generadas al paso de un huracán estándar. El modelo utilizado para describir el campo de presiones y vientos fue el SPH (Standard Project Hurricane), que permite evaluar las características de una tormenta a partir de consideraciones estadísticas (CERC, 1984).

La información de los huracanes se obtuvo del Global Tropical CycJoneClimatic Atlas <http://navy.ncdc.noaa.gov/products/gtcca/gtccamain.html>, que cuenta con una base de datos de la trayectoria y los principales parámetros de las tormentas tropicales y huracanes que se han producido desde el año 1871. Los datos de esta fuente se complementaron con los registros de la presión atmosférica medidos en la estación meteorológica de Varadero.

La caracterización del oleaje se completó en la mayoría de los casos aplicando la teoría lineal del oleaje (Airy, 1845) citada en el Shore Protection Manual (CERC, 1984).

La probabilidad de afectación generalizada de la playa durante las marejadas extremas, fue otro de los factores considerados al decidir la aplicación de medidas de

protección (Álvarez, 2001). Para el análisis se comprobó el ajuste del número de eventos erosivos ocurridos en un año (X) a una ley de probabilidades de Poisson. Además de los métodos específicos empleados para describir el funcionamiento del Sistema Costero, en el proceso de diseño y monitoreo de las actuaciones para combatir la erosión en Varadero se utilizaron reconocidos programas de dibujo y representación cartográfica.

1.2. Particularidades del perfil de equilibrio

Para evaluar funcionamiento del perfil de equilibrio se consideró la función potencial $h(y) = Ay^m$ planteada por Brunn (1954) y Dean (1977). Aunque esta relación no constituye una forma válida universal, tiene la ventaja de describir las principales características de los perfiles equilibrados utilizando un número mínimo de parámetros (A y m).

La determinación de A partió del análisis estadístico de las velocidades de caída (w) medidas de forma experimental para diferentes fracciones granulométricas de una muestra con la composición tipo de la playa. Todos los experimentos se realizaron en la Facultad de Física de la Universidad de la Habana, siguiendo la metodología de Onishenko (1978).

Los intervalos de confianza para la velocidad de caída media por grupos de fracciones granulométricas, se calcularon aplicando la prueba t de Student. Como referencia adicional de la confianza en los valores medios de velocidad de caída calculados para cada fracción granulométrica se determinó el coeficiente de variación (C_v) y el error relativo.

El análisis de la velocidad de caída se completó comparando los resultados obtenidos para Varadero, con teorías generales y derivaciones propuestas por otros autores. La comparación incluyó los resultados de Maiklem (1968) citados por Stoddart (1978) y Juanes (1996), las familias de curvas propuestas por Vanoni (1975) resumidas en la Fig. 2 y la función potencial de Hallermeier (1981).

La determinación de los coeficientes de mejor ajuste a la distribución de (w) se realizó por métodos de optimización mínimo-cuadráticos, considerando la función del error (e) igual a:

$$s = L (a_{i,obs} - (j)_{pred})^2$$

Para evaluar el comportamiento del parámetro A , se utilizó la ecuación $A = 0.067a_i^{0.44}$ propuesta por Dean (1987) que relaciona la forma del perfil con la velocidad de caída. Los resultados de aplicar la expresión se compararon con los valores de A recomendados para las playas continentales (Tabla 2 y Fig. 3).

La evaluación del comportamiento de m , incluye un análisis estadístico del ajuste de los perfiles medidos en la pendiente submarina a la función $h(x,y) = Aym$. Para cada perfil se determinaron los parámetros A y m que hacen mínima la expresión del error:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i - h_{pi}}{h_i} \right)^2 * 100\%$$

En la que h es la profundidad medida y h_p la pronosticada, mientras i denota el índice de la distancia a partir de la costa.

1.3. Aplicación a otras playas tropicales

La posibilidad de aplicar los resultados obtenidos a otras playas cubanas e incluso a las costas de otros países caribeños, se basa en demostrar en que medida los rasgos distintivos de Varadero son representativos a nivel regional. La comparación se centró en los elementos que mayor influencia tienen en el funcionamiento del perfil de equilibrio, como es la composición de los sedimentos y el grado de exposición al oleaje.

Se hace referencia a los resultados de Zenkovich V.P. y AS. Ionin (1969), que desde etapas muy tempranas hacen una clara identificación de la participación que tienen los materiales biogénicos en la formación de las playas. Igualmente se citan los resultados de Ionin, A. Y. Pavlidis y O. Avello (1977), resumidos en la monografía "Geología de la plataforma cubana".

Además de los estudios de carácter general, para probar la aplicación de los resultados obtenidos en Varadero a otras playas biogénicas se recurre a proyectos de investigación y estudios específicos que ofrecen información cuantitativa acerca de la génesis de los sedimentos y la forma del perfil. Entre las playas cubanas evaluadas se encuentran las playas del Este de la Habana, las playas del

subarchipiélago Sabana - Camagüey y la costa Norte de Holguín. Se analizan además algunas playas de la República Dominicana.

11. CRONOLOGÍA DE LAS ACCIONES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN EN VARADERO

A finales de la década del 60 y principios del 70, en la playa de Varadero comenzaron a observarse los primeros indicios de erosión costera. El afloramiento de superficies rocosas y la formación de escarpes en las dunas fueron las primeras manifestaciones del proceso de deterioro que sufría la playa. En años posteriores, este fenómeno se fue agravando y las olas de los temporales extremos llegaron a afectar incluso las instalaciones más próximas a la costa.

Ante esta problemática, en el año 1978 el Instituto de Oceanología de la Academia de Ciencias, comenzó un programa de investigaciones dirigido a conocer la magnitud de los procesos de erosión y evaluar alternativas para su control.

Identificadas las principales causas del deterioro de la playa, a finales de la década del 70 se adoptaron las primeras medidas normativas y regulativas para la protección de la costa y se iniciaron algunos trabajos de recuperación.

En la actualidad, en Varadero se cuenta con más de 20 años de experiencia en la aplicación de alternativas para el control de la erosión. Aunque cronológicamente se han alternado e incluso superpuesto trabajos de diversa naturaleza, es posible diferenciarlos de acuerdo con el objetivo para el cual fueron concebidos y las técnicas de ejecución empleadas.

Una primera clasificación permite identificar dos grandes categorías: por una parte los trabajos encaminados a restituirle a la playa sus condiciones naturales y por otra, las medidas dirigidas exclusivamente a proteger instalaciones de alto valor económico o social.

Dentro de la primera categoría pueden enmarcarse los trabajos de Alimentación Artificial de Arena y los proyectos de "Recuperación de las dunas mientras que en el segundo grupo estarían los trabajos realizados para la protección de instalaciones empleando geotextiles. Aunque los proyectos de Alimentación Artificial de Arena y los trabajos de recuperación de las dunas han tenido el objetivo común de rescatar

los valores naturales de la playa, han estado dirigidos a combatir diferentes causas de erosión y para su ejecución, también se ha requerido de técnicas diferentes lo que permite tratarlos como acciones independientes.

De este modo, los trabajos para la recuperación de la playa ejecutados en Varadero a lo largo de más de 20 años, pueden ser clasificados en tres grandes grupos (Tabla 3):

Alimentación Artificial de Arena: Ha estado dirigida a suplir el déficit en los ingresos naturales de arena a la playa y a restituir el material que fue retirado para la industria de la construcción. En los casos en que el vertimiento se realizó directamente sobre la berma se logró el incremento del ancho de la playa con el consiguiente mejoramiento de sus condiciones recreativas y estéticas. El vertimiento en la pendiente submarina fortaleció las barras que también forman parte del perfil dinámico. Los medios empleados para su ejecución fueron dragas de succión en marcha, dragas estacionarias y equipos de movimiento de tierra para la conformación final del perfil. Los pequeños vertimientos de mantenimiento se han realizado con camiones o pequeñas dragas.

Recuperación de las dunas: Esta acción se ha orientado al rescate de las dunas por constituir la defensa natural de la playa ante la ocurrencia de eventos extremos. Los trabajos han comprendido la eliminación de viejas instalaciones, muros y vegetación inapropiada, lo que ha representado una de las principales acciones para eliminar los agentes erosivos antrópicos que aún están presentes en la playa. Los trabajos de demolición se han realizado con equipos pesados para el movimiento de tierra y para el vertimiento de la arena se han empleado camiones y bulldozer. Los vertimientos por tierra también han contribuido a suplir el déficit en los ingresos naturales de sedimentos. En muchos casos, se ha incluido la reforestación de las dunas con vegetación apropiada para la estabilidad de los sedimentos, manteniendo un entorno compatible con la actividad turística.

Protección de instalaciones con Geotextiles: Aunque ha constituido una medida de emergencia dirigida exclusivamente a proteger instalaciones de alto valor económico o social, su concepción y ejecución ha velado por guardar la armonía con el entorno. El uso de los geotextiles ha permitido evadir la introducción en la playa de

estructuras rígidas de hormigón y acero que resultan extremadamente impactantes en los ambientes naturales. Para la ejecución de los trabajos se han empleado geotextiles BOLSAROCA ST-8 que se han llenado con una mezcla de arena y agua empleando pequeñas bombas. Para la conformación final del relieve se han utilizado equipos pesados de movimiento de tierra.

111. FUNDAMENTO, DISEÑO Y EFECTIVIDAD DE LAS ACCIONES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN EN VARADERO

En la concepción de la mayoría de las actuaciones para la recuperación de la playa se han considerado los resultados del monitoreo sistemático de las variaciones morfológicas y sedimentológicas y se han aplicado variados modelos matemáticos con vistas a lograr el diseño óptimo. Igualmente, se han realizado considerables esfuerzos por mantener un control posterior de los trabajos para evaluar de manera precisa su efectividad.

A continuación se presenta una descripción de los elementos considerados en la selección y diseño de cada una de las acciones a partir de proyectos tipo y se evalúan los principales resultados obtenidos.

111.1. Alimentación Artificial de Arena

La Alimentación Artificial de Arena se aplicó por primera vez en Varadero en el año 1987 y hasta el año 2003 se habían realizado 8 campañas con un volumen total vertido de 1.87 millones de metros cúbicos de material. El proyecto de mayor envergadura se ejecutó en el verano de 1998 (Foto 1) y fueron depositados en la playa más de 1 millón de m³ de arena (Juanes, J. L., García, C., y Álvarez, A., 1998). A continuación se sintetizan los criterios de diseño y efectividad de esta obra.

111.1.1. Fundamento y Diseño

El estudio partió de una evaluación de las afectaciones que podía sufrir la playa en caso de no ejecutarse el vertimiento y en que medida el suministro artificial de 1 millón de metros cúbicos podía solucionar el problema. De acuerdo con los criterios del Ministerio del Turismo, si existía la garantía de que en un período de cinco años

la playa conservaba sus condiciones estéticas y recreativas, los trabajos podían considerarse satisfactorios.

Para desarrollar el análisis se tomó como referencia el perfil ubicado al este del antiguo restaurante "El Caney" en la zona urbanizada de Varadero (473101.09E, 368859.97N), donde históricamente han sido más críticos los problemas de erosión (Fig. 4). Bajo este criterio era de esperar que si para el perfil de "El Caney", el volumen propuesto a verter satisfacía los requerimientos de la playa, en el resto de los sectores también resultaría efectivo.

En correspondencia con los intereses del turismo, el pronóstico del comportamiento de la playa se dividió en 4 etapas: **Estado inicial**, **Condición de equilibrio**, **Evolución esperada a los 5 años** y **Respuesta a la ocurrencia de una tormenta**. El **estado inicial** sin vertimientos, se describió a partir de la nivelación topográfica de febrero de 1996 que era el perfil erosivo más reciente. Para la condición con vertimientos, se superpuso al perfil un volumen de arena de 100 m³ por metro lineal.

La **condición de equilibrio** de la parte emergida sin vertimientos se describió por el promedio de los desniveles de una serie de 120 perfiles topográficos mensuales medidos en el período de 1978 a 1996. En la pendiente submarina, el perfil se continuó siguiendo la forma de equilibrio teórica establecida por Brunn (1954) con el parámetro A calculado de acuerdo con la expresión propuesta por Dean (1987), y utilizando los resultados experimentales de velocidad de caída (w) de una muestra tipo de Varadero (Tabla 4). Finalmente, se realizaron las correcciones debidas al retroceso experimentado por la costa de acuerdo con la tendencia erosiva (García, C. y Juanes, J. L., 1995 y Juanes, J. L., 1996). Para conocer la condición de equilibrio en caso de ejecutarse el vertimiento, se aplicaron los criterios de Dean y Brunn para una diferencia en volumen (LIV) de 100 m³/m.

La **evolución esperada a los 5 años** se calculó, tanto para la condición con vertimientos como sin vertimientos, considerando la tendencia erosiva estimada a partir de las nivelaciones históricas (García, C. y Juanes, J. L., 1995 y Juanes, J. L., 1996). Teniendo en cuenta que este perfil describe únicamente la condición de equilibrio, para conocer las máximas afectaciones que podía sufrir la playa se consideraron los efectos de un temporal extremo.

La **respuesta a la ocurrencia de una tormenta** se pronosticó siguiendo los criterios de Dean (1991), según los cuales el retroceso adimensional de la línea de costa (ay') se calcula en función de los niveles adimensionales de la marea y la sobre-elevación y las características morfológicas del perfil de playa.

Como resultado de todo el análisis, se concluyó que con el vertimiento de un millón de metros cúbicos de arena quedaría garantizada la estabilidad de la playa y la seguridad de las instalaciones por un período de al menos 5 años, aún cuando se produjeran eventos erosivos extremos. En caso de no ejecutarse los trabajos, se podían esperar serias afectaciones estéticas y funcionales de la playa, además de cuantiosas pérdidas materiales.

111.1.2. Efectividad

Como parte de las tareas del proyecto, el Instituto de Oceanología concibió un amplio programa de monitoreo para la supervisión y control de las obras y la evaluación precisa de su efectividad (García, C. y col., 2000 y García, C. y col., 2001). Para facilitar los estudios, el monitoreo se estructuró en cuatro grandes grupos de actividades de acuerdo con los elementos dinámicos a evaluar: **Forma en planta de la playa, Perfil emergido, Perfil submarino y Sedimentos.**

Con los levantamientos de la línea de costa y las nivelaciones se pudieron cuantificar las variaciones en la **forma en planta de la playa**. Comparando las mediciones realizadas en Mayo de 1998 con el levantamiento que siguió a la ejecución de los trabajos, se calculó que la playa ganó de manera instantánea 350 596.72 m² de área de sol. El incremento promedio del ancho fue de 22 m (prácticamente el doble del valor estimado).

Las nivelaciones topográficas sistemáticas constituyeron la fuente fundamental de información para conocer la evolución morfológica del **perfil emergido**. De acuerdo con los cálculos realizados, al concluir el vertimiento, la playa había ganado 931 979 m³ de arena en su parte emergida y zona próxima a la orilla, lo que representa más del 85 % del volumen total vertido. En el período analizado, los cambios más importante en el perfil se produjeron en Noviembre del 2001, cuando Varadero sufrió los efectos del Huracán Michelle con categoría IV en la escala Saffir/Simpson y que

fue catalogado por el Instituto de Meteorología como uno de los más intensos que ha azotado a Cuba en las últimas décadas. Las mediciones realizadas inmediatamente después del huracán (Noviembre de 2001) mostraron que aún bajo estas condiciones la playa conservó más del 80 % del material vertido (Tabla 5), lo que está en correspondencia con las valoraciones hechas en el apartado de fundamento y diseño (Fig. 5).

Con el interés de evaluar los cambios morfológicos del **perfil submarino** en 6 puntos seleccionados dentro del sector beneficiado, a las nivelaciones topográficas se les dio continuidad hacia el mar hasta profundidades superiores a 10 m. Las mediciones se realizaron con ecosondas y GPS. En general los perfiles se caracterizaron por presentar uno o dos niveles de barras muy estables. Sólo durante la ocurrencia del huracán Michelle se registró un movimiento de las barras en dirección al mar, lo que constituyó un importante indicador del ajuste del perfil a la condición de equilibrio de tormenta.

Para la caracterización de los **sedimentos**, previo a la ejecución del vertimiento (Mayo de 1998), se realizó un muestreo detallado de los materiales de la playa. Los resultados del muestreo realizado al cabo de un año (Septiembre de 1999), revelaron que como resultado del vertimiento la granulometría había sufrido poca variación aunque tenía una distribución por sectores más homogénea. En los sitios donde el diámetro del sedimento nativo era grueso, después del vertimiento la granulometría se redujo. Sin embargo, en los sectores donde la arena era más fina, se observó un aumento en el tamaño del grano.

En la actualidad, a más de 5 años de concluidos los trabajos, la playa conserva excelentes condiciones tanto por su ancho como por la calidad de la arena.

11.2. Recuperación de las dunas

Las primeras acciones ejecutadas en Varadero para la recuperación de las dunas tuvieron un carácter espontáneo y respondieron fundamentalmente a intereses relacionados con la actividad turística. Con la elaboración en 1986 del primer plan de Medidas para la Recuperación y Mantenimiento de la Playa (INTUR, 1986), es que se establece una estrategia científicamente fundamentada para la recuperación de

las dunas. A partir de la década del 90, los trabajos para la recuperación de las dunas recibieron un apoyo adicional y como resultado, de las 255 construcciones y 4 700 m lineales de muros que existían en la década del 70, ya en el año 1995 se habían retirado 63 instalaciones y más de la tercera parte de los muros.

Entre las acciones realizadas, se destaca el proyecto ejecutado entre los años 1994 y 1995 para la remodelación del sector costero Kawama-Punta Blanca (Juanes, J. L. y García, C., 1994), con el que se logró recuperar más de 2 km. de playa (Foto 2). A continuación se describe el fundamento técnico y los criterios de diseño de este proyecto tipo. Se incluye además una evaluación de efectividad.

111.2.1. Fundamento y Diseño

Como resultado del proceso de erosión, a principios de la década del 90 el sector de Kawama-Punta Blanca se encontraba en un estado crítico. Las afectaciones a las construcciones, los escarpes en la duna y los afloramientos rocosos, constituían ilustrativos indicios del deterioro que sufría la imagen turística del lugar. Para dar solución a este problema, el Instituto de Oceanología propuso la eliminación por fases de algunas casas y varios de los muros periféricos de las construcciones para minimizar su efecto erosivo y conformar una duna con vegetación apropiada, en armonía con la propuesta general de desarrollo turístico (Juanes, J. L. y García, C., 1994).

Demoliciones

En primer lugar se decidió la retirada de todos aquellos muros que se encontraban destruidos total o parcialmente por lo que además de no ofrecer protección a las construcciones, representaban un peligro para los bañistas. También se propuso la demolición de los muros que debido a la frecuencia con que eran alcanzados por las olas, constituían agentes erosivos importantes y además su eliminación no representaba un peligro inmediato de afectación a las instalaciones. En cuanto a los muros que ofrecían protección a las construcciones, se valoró su sustitución por una duna que garantizara la estabilidad de la playa aún ante la ocurrencia de marejadas extremas.

Finalmente, en el proyecto presentado por el Instituto de Oceanología (Juanes, J. L. y García, C., 1994) se proponía la retirada de 660 m de muros (aproximadamente el 70 % del total), y dos instalaciones.

Conformación de las dunas

El diseño de las dunas se orientó a restablecer el funcionamiento dinámico del perfil natural, garantizar la protección de las instalaciones que permanecerían en la costa y ofrecer un entorno turístico agradable. Para el cálculo del volumen de arena, se estableció como premisa que la playa fuera estable aún en las condiciones de oleaje de tormenta.

El perfil de equilibrio que podía esperarse durante la ocurrencia de marejadas extremas se determinó a partir de la expresión propuesta por Vellinga (1983). Para la selección de la arena tipo que conformaría el perfil de equilibrio, previo a la ejecución de los trabajos se realizó un muestreo en la playa y las áreas que se utilizarían como préstamo de arena. El valor de velocidad de caída (v_{10}), se determinó a partir de los resultados de un gran número de experimentos realizados en el Instituto de Oceanología con granos de arena correspondientes a las diferentes fracciones granulométricas de una muestra tipo de Varadero.

Finalmente, el proyecto quedó concebido para el vertimiento de 33 720 m³ de arena a lo largo de 885 m de playa. Los sedimentos serían depositados fundamentalmente en el área de la duna y su pendiente hacia el mar, a razón de 30 a 60 m³/m de playa a regenerar.

Selección y evaluación de las áreas de préstamo

El proyecto se concibió en dos fases. Para la primera fase se propuso la extracción de 6 000 m³ de arena de playa Camacho, localizada aproximadamente 2 km. al oeste del hotel Oasis. En la segunda fase, serían empleados los materiales depositados en el Canal de Paso Malo.

El cálculo del volumen de arena disponible en playa Camacho se realizó a partir del control morfológico del Instituto de Oceanología. Para el Canal de Paso Malo, los volúmenes fueron calculados por métodos batimétricos y sismoacústicos por el

Instituto Cubano de Hidrografía En ambos sitios se realizó una cuidadosa descripción de la granulometría y composición de los sedimentos para conocer la compatibilidad con el material nativo de la playa.

111.2.2. Efectividad

A finales de 1995 la regeneración de las dunas había concluido. En total se retiraron 450 m de muros y 4 instalaciones. El vertimiento, se había realizado de acuerdo con las densidades previstas y los perfiles se habían conformado respetando el diseño morfológico. Los primeros meses la forma del perfil sufrió muy poca variación en correspondencia con las condiciones de oleaje de baja energía, y la mayor parte del material vertido sobre la duna y su pendiente hacia el mar no experimentó alteraciones.

Aproximadamente a un año de concluido el proyecto, la costa Norte de Cuba se vio afectada por el huracán Lili. Utilizando los datos del Global Tropical Cyclone Climatic Atlas <http://navv.ncdc.noaa.gov/products/gtccalgtccamain.html> y los registros de presión atmosférica de la estación meteorológica de Varadero, se estimaron las olas y sobre-elevación que afectó a la playa. El modelo utilizado para describir el campo de presiones y vientos fue el SPH (Standard Project Hurricane), que permite calcular los parámetros de la tormenta a partir de consideraciones estadísticas (CERC, 1984). Con el interés de evaluar en que medida el modelo empleado para el diseño de las dunas había garantizado la efectividad de los trabajos, se realizó una nueva simulación matemática de la evolución del perfil empleando los parámetros estimados para el huracán. En los cálculos se consideraron nuevamente los criterios de Vellinga (1983).

Al superponer la curva teórica de erosión y el perfil medido previo a la ocurrencia del huracán, se obtuvo una diferencia en volumen de 6.0 m³, que es equivalente a la cantidad de arena que podía esperarse que fuera erosionada de la playa y el frente de la duna por metro lineal. Realmente, las nivelaciones topográficas realizadas después del huracán mostraron que en casi todos los perfiles la pérdida de arena fue inferior y el volumen de erosión promedio fue de 2.6 m³

En contraste con el comportamiento de la playa en el área del proyecto, en los sitios donde los muros e instalaciones permanecían ocupando el área de las dunas, los daños provocados por el huracán fueron considerables.

111.3. Protección de instalaciones con geotextiles

A pesar de los esfuerzos realizados para recuperar las dunas, a mediados de la década del 90, aún existía una cantidad considerable de instalaciones en el llamado Varadero histórico, que no podían ser eliminadas a corto plazo por su valor económico o social. Debido al crítico estado de la playa, muchas de estas construcciones se encontraban en peligro de ser afectadas por las olas.

Conscientes del deterioro que sufría la playa, en el año 1995 la dirección del MINTUR y el CITMA elaboraron una estrategia de emergencia para proteger las construcciones más valiosas empleando geotextiles (Foto 3).

111.3.1. Fundamento y diseño

La decisión de aplicar un plan de emergencia para la protección de instalaciones, tuvo como fundamento un cuidadoso análisis estadístico de la probabilidad de ocurrencia de eventos erosivos extremos (Álvarez A, Juanes J.L., García, C., 2001). Se consideraron como eventos extremos a los frentes fríos, huracanes y otros fenómenos meteorológicos que provocaron afectaciones generalizadas a la playa.

El análisis se centró en el ajuste de los fenómenos reportados entre 1979 y 1992 a una ley de probabilidades de Poisson (Álvarez A, Juanes J.L., García, C., 2001). Como resultado de los cálculos, se concluyó que las probabilidades de ocurrencia de 0, 1 y 2 eventos extremos por año, adquieren valores de 65%, 28% y 6%, respectivamente. Además, cada 2.8 años como promedio, se producen uno o dos eventos de esta naturaleza.

Teniendo en cuenta que en el momento del análisis, la baja extratropical ocurrida en Febrero de 1992, era el evento erosivo más reciente, se dedujo que era alta la probabilidad de que en los meses finales de 1995 y durante los años 1996 y 1997 se produjera al menos un evento extremo. En ese caso, debían esperarse graves afectaciones a la playa y las instalaciones, pues debido al proceso sostenido de

erosión, los volúmenes de arena existentes resultaban insuficientes para garantizar la conformación del perfil de equilibrio de erosión.

Luego de un cuidadoso análisis de la playa, se decidió la protección de 10 instalaciones. Para los trabajos se seleccionaron unidades de Bolsaroca ST-8, patentados por la empresa mexicana Control de la Erosión S.A. Los sacos tienen 1.4 m de ancho, 0.4 m de altura y 5 m de largo y están contruidos con una fibra geotextil de alta resistencia a la tensión y el desgaste por abrasión.

En total, entre los años 1995 y 1997 fueron protegidas 10 instalaciones, para lo que se utilizaron 748 geotextiles.

111.3.2. Efectividad

Para el diseño y supervisión de los trabajos, en las áreas a proteger se establecieron puntos de control topográfico del perfil de la playa. Al concluir la ejecución, se mantuvo un monitoreo sistemático de estos perfiles que permitió evaluar de manera precisa el funcionamiento de las estructuras bajo diferentes condiciones meteorológicas.

Como se había previsto al calcular la probabilidad de ocurrencia de eventos erosivos, entre los meses finales de 1996 y principios de 1998, la playa se vio afectada por marejadas que provocaron el retroceso generalizado de la línea de costa e importantes pérdidas de arena. Entre los eventos de mayor intensidad estuvieron los ciclones Josephy y Lili, en Octubre de 1996, la baja extratropical de Diciembre de 1997 y el frente frío ocurrido en Febrero de 1998.

De las 10 estructuras contruidas con geotextiles, durante la ocurrencia de estos eventos, 6 estuvieron sometidas al impacto directo de las olas y constituyeron una protección incuestionable para las edificaciones.

IV. FUNCIONAMIENTO DEL PERFIL DE EQUILIBRIO EN PLAYAS BIOGÉNICAS Y SU INFLUENCIA EN EL DISEÑO DE ACTUACIONES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN

En la búsqueda de alternativas para combatir la erosión en Varadero ha sido necesario probar reconocidos modelos matemáticos de evolución costera. La mayoría de estos modelos, aunque cuentan con un sólido respaldo teórico, han sido desarrollados para

las costas continentales y asumen una serie de parámetros que no son comunes a nuestras playas de naturaleza insular y génesis eminentemente marina.

Los esfuerzos realizados por mantener el monitoreo de la playa al concluir cada una de las acciones de recuperación ha permitido conocer cuan acertados han sido los pronósticos y en consecuencia, realizar los ajustes necesarios. Uno de los principales resultados ha sido la descripción del funcionamiento del perfil de equilibrio, que ha estado presente en el diseño de la mayoría de las acciones para la regeneración de la playa.

IV.1. Perfil de equilibrio

Básicamente, los estudios realizados en Varadero se sustentaron en la conocida fórmula de Dean (1977), que confirma los resultados obtenidos por Brunn (1954).

$$h(y) = Ay^m$$

De acuerdo con esta expresión, la profundidad de cualquier punto a lo largo del perfil se relaciona con la distancia a la costa a través de un parámetro de escala A y un exponente m . El parámetro A , depende de las propiedades físico mecánicas de los sedimentos, en particular su velocidad de caída (m), mientras que el exponente m , guarda una estrecha relación con la energía del oleaje y la forma en que ésta se disipa durante la aproximación a la costa.

Velocidad de caída

El análisis de las muestras colectadas históricamente en Varadero, ha permitido conocer que a diferencia de las playas continentales la arena está formada en más de un 90 % por sedimentos carbonatados entre los que se destacan los fragmentos de algas calcáreas, moluscos y foraminíferos (Tabla 6).

Para conocer de manera efectiva la velocidad de caída de esta arena y su influencia en la forma de equilibrio del perfil, como parte de la Tesis se realizó un análisis de los resultados experimentales obtenidos en la Facultad de Física de la Universidad de la Habana, con la participación de especialistas del Instituto de Oceanología (Fig. 6).

Al comparar la velocidad de caída de la arena de Varadero con las curvas presentadas por Vanoni (1975) se comprobaron diferencias significativas. En el caso

de la fracción más fina (0.01 - 0.25 mm), la velocidad calculada para Varadero es ligeramente mayor, lo que está en correspondencia con el mayor peso específico de la calcita (2.716 kg/m³) en relación con el cuarzo (2.648 kg/m³). Sin embargo, a partir de la fracción de 0.25 - 0.50 mm, se invierte la relación de velocidades y los valores calculados para Varadero pasan a ser menores lo que es contrario al comportamiento esperado si se considera sólo la densidad y el diámetro de los materiales.

Profundizando en el análisis, si aceptamos la validez de la ecuación potencial planteada por Hallenmeier (1981}, entonces la relación entre el diámetro de los sedimentos de Varadero (D) y su velocidad de caída (CD) también puede ser expresada por una función potencial del tipo $(V = aDb)$, donde a y b toman valores de 7.26 y 0.5 respectivamente.

$$(V = 7.26D^{0.5})$$

Esta ecuación presenta un coeficiente de correlación (R) de 0.78 y explica el 61.4 % de la variabilidad de los datos originales.

Sustituyendo la fórmula de velocidad de caída en la ecuación $A = 0.067CD^{0.44}$ propuesta por Dean (1987), se puede calcular directamente el parámetro A utilizando el diámetro de los sedimentos de Varadero (Tabla 7):

$$A = 0.067(1)^{0.44} = 0.067(7.26D^{0.5})^{0.44} = 0.16D^{0.22}$$

Esta relación difiere de la curva utilizada para las playas continentales Dean (1977) y (CERC, 2002). Los resultados se resumen en la Fig. 7.

Disipación de la energía del oleaje

De acuerdo con la fórmula de Dean (1977), existe una relación entre la curvatura del perfil representada por el exponente *m* y la forma en que las olas disipan su energía. Ante la ausencia de mediciones de oleaje en Varadero, la forma que adopta la pendiente próxima a la orilla constituye el mejor indicador de la interacción entre las olas y el fondo y permite llegar a conclusiones acerca de la condición de equilibrio de la playa.

En una primera aproximación, para cada uno de los perfiles batimétricos de Varadero se determinaron estadísticamente los parámetros A y m que describían el mejor ajuste entre la función potencial ($h(y) = Aym$) y el relieve del fondo (Fig. 8).

El análisis estadístico de m mostró que este parámetro sigue una distribución normal. El valor medio fue 0.69 con una desviación estándar de 0.22.

Profundizando en el análisis, se introdujo el parámetro A calculado según la expresión $A = 0.16D^{0.22}$ calculada para Varadero. Cada uno de los perfiles fue tratado de manera individual considerando las características de la arena en el sector que estaban ubicados (Tabla 8). La clasificación por sectores se basó en los resultados del muestreo efectuado sobre los perfiles históricos en mayo de 1998, coincidiendo con los levantamientos topográficos y sondeos previos al vertimiento (Fig. 9).

Bajo esta nueva consideración, el parámetro m estimado tuvo una media de 0.67 con una desviación estándar de 0.02. Resulta significativo que la media coincide con el valor reportado por Dean (1977) para las costas de los Estados Unidos y que se deduce al considerar una disipación uniforme de la energía de las olas por unidad de volumen de agua.

Los resultados anteriores se resumen en dos importantes conclusiones:

El parámetro m puede considerarse constante (0.67), tal como propone Dean (1977) atendiendo a la forma en que las olas disipan su energía.

La expresión para el cálculo de A estimada para Varadero describe adecuadamente la influencia del diámetro de los sedimentos en la forma del perfil de equilibrio.

IV.2. Aplicación a otras playas tropicales

Atendiendo a que la mayor parte de las playas exteriores de Cuba son biogénicas, su ajuste a la condición de equilibrio debe mostrar un mejor ajuste a las expresiones propuestas para Varadero, que a las fórmulas para el cálculo de w y A aplicables a los materiales terrígenos (Vanoni, 1975; Moore, 1982; CERC, 1989; CERC, 2002). Algo similar ocurre con muchas playas de la isla de La Española (República Dominicana y Haití) y algunas playas de los pequeños estados insulares del Caribe.

CONCLUSIONES

En correspondencia con la hipótesis planteada en la Tesis se llega a las siguientes conclusiones:

1. Las medidas adoptadas para combatir la erosión en Varadero han resultado adecuadas para detener el deterioro de la playa y al mismo tiempo garantizar la protección de instalaciones de alto valor económico o social.
2. La *Alimentación Artificial de Arena* ha sido la actuación más efectiva para enfrentar la erosión. Esto reafirma con nuevos elementos los resultados generales presentados por Juanes (1996) para las playas cubanas. Sólo con el vertimiento ejecutado en Varadero en el verano de 1998, la playa ganó de manera instantánea 910 291 m³ de arena y un área de sol de 350 596.72 m², lo que significó devolverle las condiciones que tenía más de 15 años atrás. El monitoreo que siguió a los trabajos demostró que al cabo de 5 años, la playa conservaba excelentes condiciones, aún después de ser afectada por eventos meteorológicos extremos como los huracanes Georges (Septiembre de 1998) y Michelle (Noviembre de 2001).
3. Con el programa de *Recuperación de las Dunas* se ha logrado restituir las condiciones morfológicas del perfil en amplios sectores y minimizar el efecto erosivo de las construcciones. Los trabajos realizados en Varadero demostraron que la retirada de muros e instalaciones, unida al suministro artificial de arena y la reconfiguración del perfil ha permitido restablecer el funcionamiento dinámico de la playa y contrarrestar el efecto erosivo de las olas durante los temporales extremos.
4. La *Protección de Instalaciones con Geotextiles* ha sido una alternativa exitosa para defender las construcciones de mayor valor económico o social frente a la acción erosiva de las olas, comprobándose sus ventajas técnicas y ambientales sobre las alternativas tradicionales de muros, rompeolas y otras estructuras rígidas de protección.
5. Como resultado de evaluar la velocidad de caída de los sedimentos de Varadero y el funcionamiento de los perfiles naturales se comprueba:

La función $h(y) = Aym$ propuesta por Dean (1977), resulta adecuada para describir el comportamiento del perfil de equilibrio.

Existe una estrecha relación entre el parámetro A y la velocidad de caída de los sedimentos, que para el caso de la arena de Varadero se ajusta convenientemente a la función $(v) = 1.26D^{0.5}$.

La relación entre A y el diámetro de la arena (D) se describe por la función potencial $A = 0.16D^{0.22}$

El parámetro m puede considerarse constante (0.67), tal como deduce Dean (1977) al considerar una disipación uniforme de la energía de las olas por unidad de volumen de agua.

6. La ecuación del perfil de equilibrio propuesta para Varadero, puede ser aplicada a otras playas biogénicas de Cuba y de la región del Caribe con mejores resultados que los que se obtienen al considerar los parámetros propuestos para las playas continentales formadas por materiales terrígenos. La ecuación $h(y) = Aym$, con $A = 0.16D^{0.22}$ y $m = 0.67$ muestra un adecuado ajuste a los perfiles de estas playas, a pesar de que la información disponible se limita en la mayoría de los casos a la zona próxima a la orilla.

RECOMENDACIONES

Tornando como base los resultados obtenidos en nuestro trabajo y reconociendo la necesidad de llegar a un conocimiento cada vez más completo del funcionamiento de las playas para garantizar su explotación turística bajo los preceptos del desarrollo sostenible, recomendamos:

1. Mantener el monitoreo sistemático de las variaciones morfológicas y sedimentológicas de la playa de Varadero para profundizar en el conocimiento de su funcionamiento y diseñar de forma eficiente las futuras acciones de mantenimiento y regeneración,
2. Evaluar preferentemente el uso de la *Alimentación Artificial de Arena* y los programas de *Recuperación de las Dunas* como las alternativas más convenientes para combatir la erosión y conservar las condiciones estéticas

de las playas tropicales. Esto, reafirma con nuevos elementos las recomendaciones de Juanes (1996) y Tristá (2003).

3. Garantizar que la aplicación de alternativas para el control de la erosión, incluida la *Alimentación Artificial de Arena* y los programas de *Regeneración de las Dunas*, esté sustentada en una correcta interpretación del funcionamiento del Sistema Costero y una evaluación integral tanto de la zona a regenerar como de las reservas de arena a ser utilizadas.
4. Lograr que en las playas mejor potenciadas para el turismo se priorice la implementación y mantenimiento de los programas de monitoreo de las variaciones morfológicas y sedimentológicas. En este sentido resulta de vital importancia garantizar el uso de técnicas de medición y análisis que permitan la comparación de los resultados. En los programas debe estar incluida la medición del perfil submarino hasta la profundidad de cierre.
5. Realizar experimentos de velocidad de caída de los sedimentos biogénicos haciendo una clasificación previa de acuerdo a su composición (algas *halimedas*, moluscos, foraminíferos, restos de corales, etc) y utilizando intervalos granulométricos que respeten un tamaño uniforme en unidades ϕ ($<P$).
6. En ausencia de experimentos de velocidad de caída, utilizar las expresiones $h(y) = Aym$ y $A = 0.16D^{0.22}$ para describir la forma del perfil de equilibrio de las playas biogénicas, en lugar de los valores recomendados para los materiales terrígenos de las playas continentales.

Finalmente, quisiéramos destacar que los resultados obtenidos en la lucha contra la erosión en Varadero demuestran que la conservación de nuestras playas es posible y constituyen un palpable ejemplo de que el éxito de las acciones depende del conocimiento alcanzado acerca de su funcionamiento dinámico y la voluntad de garantizar su desarrollo sostenible. En aras de hacer extensivos estos resultados a otras playas de nuestro archipiélago, nos sumamos a la recomendación de Juanes, J. L. (1996) y Tristá, E. (2003), de implementar un Programa Nacional de Preservación de Playas que garantice la explotación racional y conservación de estos importantes recursos.

Tabla 1. Clasificación del manejo y las respuestas ingenieras para la protección costera.

Tipo	Identificador común	Ejemplos
Acorazar	Fijar la costa	Malecones y revestimientos
Moderar	Reducir los ritmos de retroceso	Espigones y rompeolas
Restaurar	Rellenar las playas	Alimentación de arena
Abstención	No actuar	-
Adaptación	Convivir con el problema	-

Fuente: Pope (1997), tomado de CERC (2002).

Tabla 2. Valores tabulados del parámetro A (m^{1/3}) en función del diámetro del sedimento (mm). Tomado del CERC (2002).

D(mm)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.0630	0.0672	0.0714	0.0756	0.0798	0.084	0.0872	0.0904	0.0936	0.0968
0.2	0.1000	0.1030	0.1060	0.1090	0.1120	0.1150	0.1170	0.1190	0.1210	0.1230
0.3	0.1250	0.1270	0.1290	0.1310	0.1330	0.1350	0.1370	0.1390	0.1410	0.1430
0.4	0.1450	0.1466	0.1482	0.1498	0.1514	0.1530	0.1546	0.1562	0.1578	0.1594
0.5	0.1610	0.1622	0.1634	0.1646	0.1658	0.1670	0.1682	0.1694	0.1706	0.1718
0.6	0.1730	0.1742	0.1754	0.1766	0.1778	0.1790	0.1802	0.1814	0.1826	0.1838
0.7	0.1850	0.1859	0.1868	0.1877	0.1886	0.1895	0.1904	0.1913	0.1922	0.1931
0.8	0.1940	0.1948	0.1956	0.1964	0.1972	0.1980	0.1988	0.1996	0.2004	0.2012
0.9	0.2020	0.2028	0.2036	0.2044	0.2052	0.2060	0.2068	0.2076	0.2084	0.2092
1.0	0.2100	0.2108	0.2116	0.2124	0.2132	0.2140	0.2148	0.2156	0.2164	0.2172

Tabla 3. Síntesis de las actuaciones para el control de la erosión en Varadero

Actuaciones	Fecha	Descripción
	1987	Vertimiento de 50 000 m ³ de arena en la pendiente submarina frente a las playas de Kawama-Punta Blanca. Depósito adicional de 17 000 m ³ con camiones en la orilla.
	1988	Vertimiento de 61 000 m ³ de arena en el sector comprendido entre "El Coppelia" y "La Herradura". La arena fue bombeada directamente hacia la playa.
	1990	Vertimiento de 204 000 m ³ a lo largo de 1 500 m de costa entre "Los Delfines" y la villa "Tropical-Los Cocos". La arena fue bombeada directamente hacia la playa.
	1991	Vertimiento de 195 000 m ³ a lo largo de más de 2 km entre el hotel "Kawama" y el lado Este del Canal de Paso Malo. La arena fue depositada en la playa.
	1992	Vertimiento de 178 000 m ³ de arena entre "Villa Barlovento" y "Punta Blanca", se regeneraron 1 200 m de costa. La arena fue bombeada directamente hacia la playa.
	1996	Depósito de 40 000 m ³ de arena con draga, en la pendiente submarina del sector comprendido entre la calle 16 y el hotel "Kawama"
	1997	Vertimiento de 35 000 m ³ de arena con draga, en la pendiente submarina del sector comprendido entre la calle 16 y el hotel "Kawama"
	1998	Vertimiento de 1 087 835 m ³ de arena con draga de succión en marcha. Se beneficiaron 11.5 km de playa entre los espigones de entrada al Canal de Paso Malo y la playa del hotel Meliá Sol Palmeras. También fueron regenerados 800 m del litoral frente al hotel Oasis.
	2002	Trabajos de mantenimiento en la zona del hotel "La Herradura" y casa del MICONS con el bombeo hacia la playa de 6 800 m ³ de arena desde las barras submarinas.

ns
e:
!
et
o)
"c
ns
Ü
iii:
t:
et
e:
-e
-ü
ns
e:
o)
E
et

- 2003-2004 Vertimiento de 460 000 m³ de arena en el sector "Las Calaveras" - "Punta Molas" (Varahicacos). Se beneficiaron 4 km de costa y en los trabajos se utilizaron de forma combinada una draga de succión en marcha y otra de succión estacionaria.
- 2000-2005 Vertimientos de mantenimiento con camiones. Se destaca el vertido de 2 494 m³ de arena frente al Hotel "La Herradura" y casa del MICONS. La arena fue extraída del lado este del Canal de Paso Malo.
- 1975-1985 Demolición de 8 instalaciones y algunos muros aislados
- 1985-1995 Demolición de 55 instalaciones y 1 500 m de muros aproximadamente. A finales de este período fue ejecutado el proyecto para la regeneración del sector Kawama - Punta Blanca, con el que se suministraron a las dunas 45 000 m³ de arena aproximadamente.
- 1995-2004 Demolición de 21 instalaciones y más de 500 m de muros. Con los vertimientos realizados en 1998 y 2003-2004, también se fortalecieron las dunas y su pendiente hacia el mar.
- 2000-2005 Trabajos de mantenimiento y reforestación de las dunas. Se destacan las acciones para reforestar las dunas luego del paso del huracán Michelle (Noviembre de 2001).
- 1996-1997 Protección de 10 instalaciones con el uso de geotextiles BOLSAROCA ST-8. Se utilizaron aproximadamente 750 sacos, que fueron cubiertos con arena para conservar las condiciones recreativas y estéticas de la playa. Los trabajos se complementaron con los vertimientos realizados en los años 1996 y 1997.

Tabla 4. Resumen de los cálculos de velocidad de caída de las partículas de arena de una muestra con la composición tipo de Varadero

	Fracciones granulométricas (mm)			
	0.10-0.25	0.25-0.50	0.50-1.00	1.00-2.00
Número de casos (n)	210	210	210	115
Mínimo (w_{min}) cm/seg	2.17	3.12	3.13	4.97
Máximo (W_{max}) cm/seg	4.52	6.67	12.5	14.49
Media (w) cm/seg	3.20	4.49	5.94	9.18
Desviación estándar (σ) cm/seg	0.47	0.77	2.14	2.32
Coficiente de variación C_v	0.15	0.17	0.36	0.25
Error relativo	1.03	1.17	2.48	2.33

Tabla 5. Comportamiento de los volúmenes de arena a partir del vertimiento ejecutado en el verano de 1998.

Volúmenes de arena cuantificados en los monitoreos (rn")										
Ago-98	Abr-99	Sep-99	Nov-99	Ene-00	Feb-00	Mar-00	Abr-00	Jun-00	Jul-00	Sep-00
910291	652993	688929	680831	744135	755072	780298	777452	851554	863642	897024
100%	71.73%	75.68%	74.79%	81.75%	82.95%	85.72%	85.41%	93.55%	94.87%	98.54%

Volúmenes de arena cuantificados en los monitoreos (m")										
Oct-00	Nov-00	Ene-01	Feb-01	Mar-01	Abr-01	May-01	Jul-01	Sep-01	Oct-01	Nov-01
908688	856941	829635	960571	771930	815384	955517	868686	901115	869983	760630
99.82%	94.14%	91.14%	105.52%	84.80%	89.57%	104.97%	95.43%	98.99%	95.57%	83.56%

Tabla 6. Composición de los sedimentos de la muestra tipo de Varadero(%)

Fuente	Foraminíferos	Moluscos	Algas calcáreas	otros restos orgánicos	Restos inorgánicos
Muestreos 1985 - 86 (Juanes, 1996)	12.40	31.00	45.00	3.00	8.00
Proyecto Kawama - Punta Blanca (Juanes, J. L. y García, C. 1994)	14.83	37.33	41.83	3.66	2.35
Proyecto vertimiento (Juanes, J. L., García, C., y Álvarez, A., 1998)	25.00	20.00	40.00	10.00	5.00
Proyecto Varahicacos (Juanes, J. L., Caballero, V., Izquierdo, M. y Hemández, K., 2002)	12.17	25.09	42.59	17.11	2.91

Tabla 7. Valores de A calculados por diferentes métodos Comparación entre los resultados al considerar el diámetro del sedimento y su velocidad de caída.

Expresiones	Fracciones (mm)			
	0.10- 0.25	0.25-0.50	0.50-1.00	1.00-2.00
		Diámetro medio (mm)		
	0.175	0.375	0.750	1.500
		Velocidad de caída (cm/seg)		
	3.20	4.49	5.94	9.18
Gráfico de Moore (1982)	0.085	0.150	0.200	0.360
Fórmulas de GENESIS				
$A = 0.41(d_{50})^{0.94} \quad d_{50} < 0.4$	0.080	0.163	0.210	0.262
$A = 0.41(d_{50})^{1.94} \quad 0.4 \leq d_{50} < 1.0$				
CEM (2002)				
Valores tabulados	0.0936	0.1410	0.1895	-
$A = 0.067a^{0.44}$	0.112	0.130	0.147	0.178

Tabla 8. Valores de m calculados considerando el parámetro A calculado según la expresión ($A = 0.16D^{0.22}$)

Perfil	Parámetro m / coeficiente de correlación (R)				
	Junio 1998	Octubre 1998	Abril 1999	Diciembre 1999	Abril 2000
Duna M	0.64	0.68	0.67	0.64	0.67
	0.90	0.93	0.92	0.89	0.92
Caney	0.67	0.68	0.67	0.69	0.70
	0.93	0.94	0.93	0.95	0.95
Museo	0.64	0.68	0.67	0.65	0.69
	0.92	0.95	0.95	0.94	0.98
Internacional	0.63	0.66	0.68	0.66	0.66
	0.91	0.89	0.93	0.84	0.90

Se han incluido solamente los perfiles formados completamente por arena.

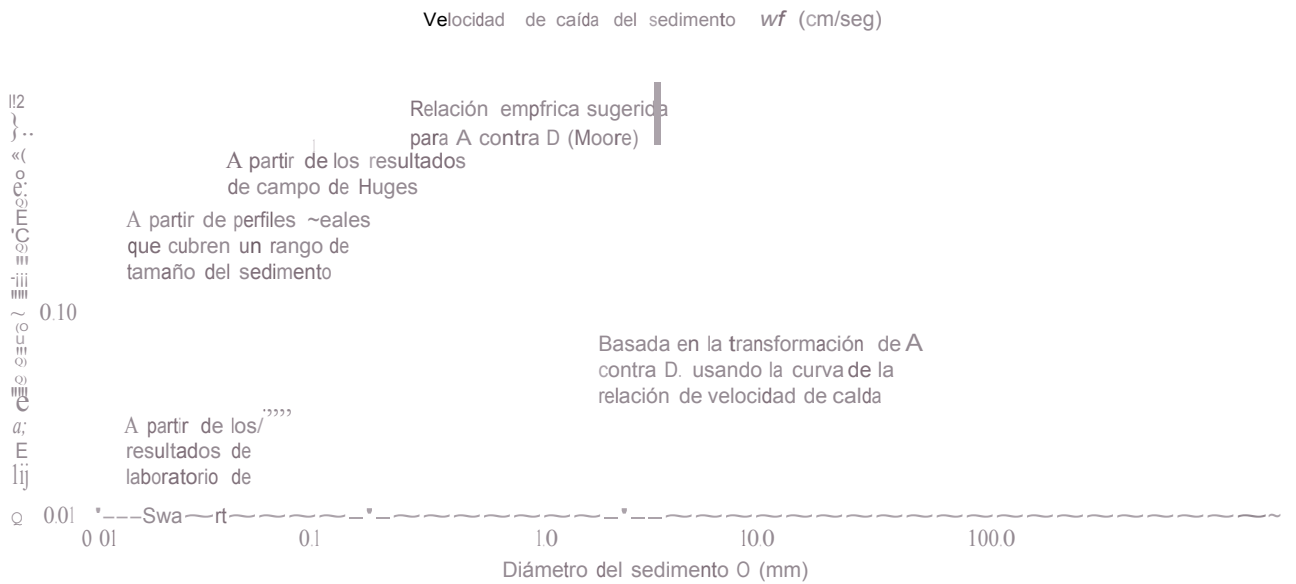


Fig. 1. Variación del parámetro de escala A en función del diámetro del sedimento D (Dean 1987, tomado de CERC, 2002)

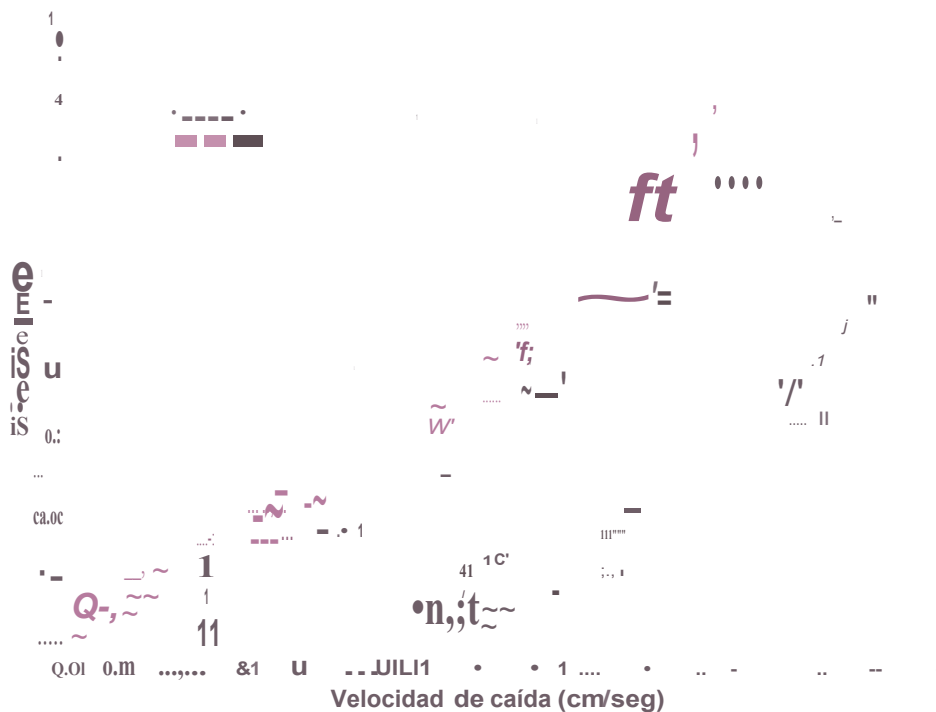


Fig. 2. Velocidad de caída de las esferas de cuarzo en el aire y el agua (Vanoni 1975). Tomado del CERC (2002).

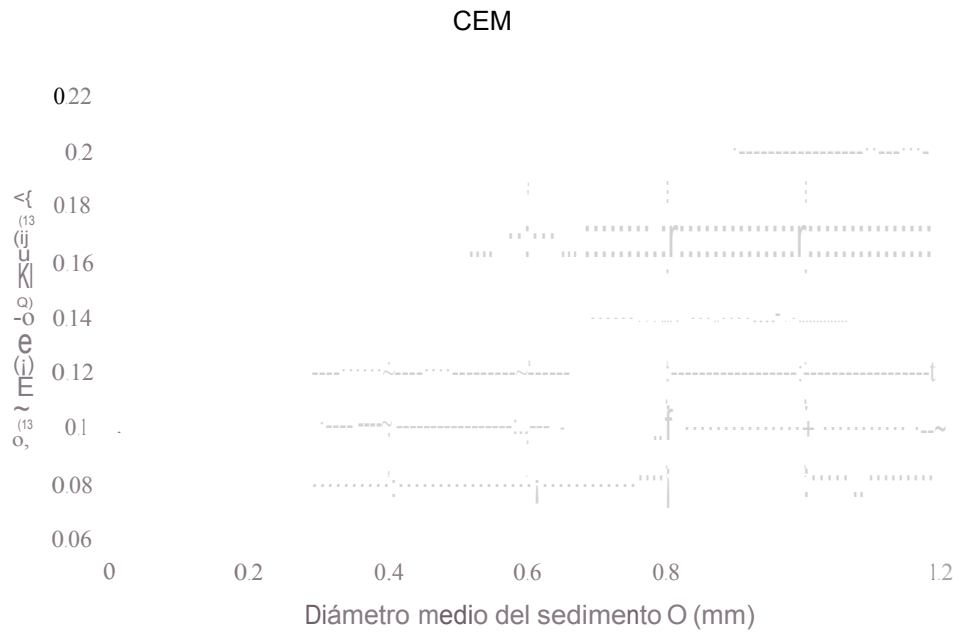
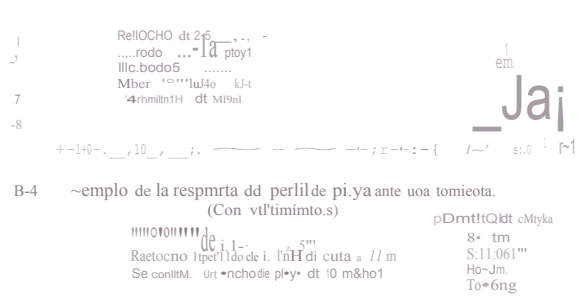
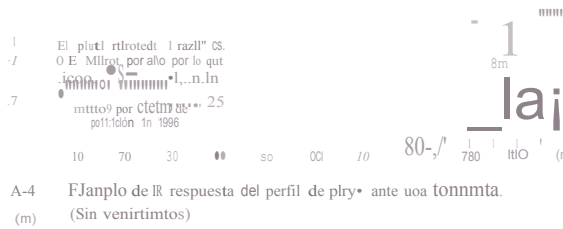
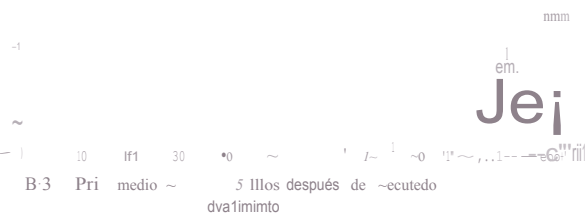
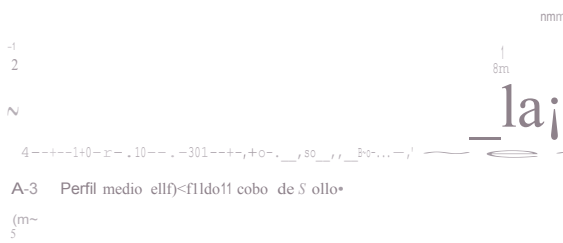
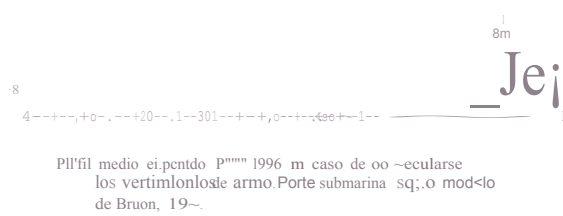


Fig. 3. Relación entre el parámetro A y el diámetro del sedimento. (Tomado del CERC (2002), a partir de los resultados de Dean (1978}y Dean (2001)).

A-1 Perfil real de febrero de 1996

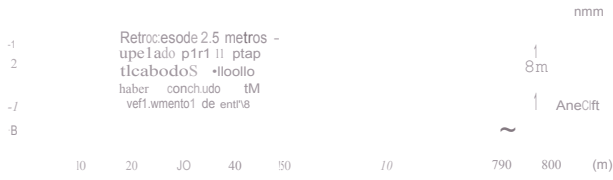


La plll,ya desap.,c•y lu conuocclones son efecbldas por el ol•llf•

Se conserv• un 11ncho de playa de 10 m y las conuocclonel no son alc.,zadu porlHolu

Fig. 4. Comparación de la evolución esperada del perfil de playa sin vertimientos (A) y con vertimientos (B). Perfil con instalaciones en la duna. (Juanes, J. L., García, C., y Álvarez, A., 1998)

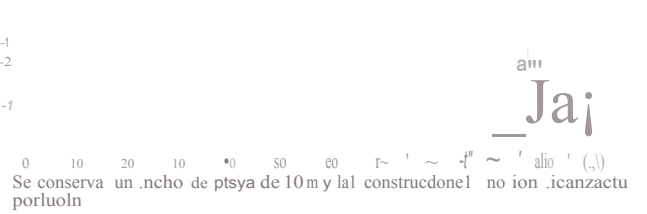
Perfil medio esperado 5 años después de ejecutado el vertimiento



Ejemplo de la respuesta del perfil de playa a una tormenta (Coo vatmeotos)

Procedimiento: 1. Se toma una línea de costa de 77 m.
 Se construye un ancho de playa de 10 metros

Se construye un ancho de playa de 10 metros
 B= 1m
 S=0.67 m
 Ho=3m
 TD=6 HO



26 de Octubre de 2001
 (Antes de Michelle)

11 de Enero de 2002
 (Después de Michelle)

Fig. 5. Comparación entre la evolución esperada de la playa y el comportamiento real en respuesta a la ocurrencia del huracán Michelle.

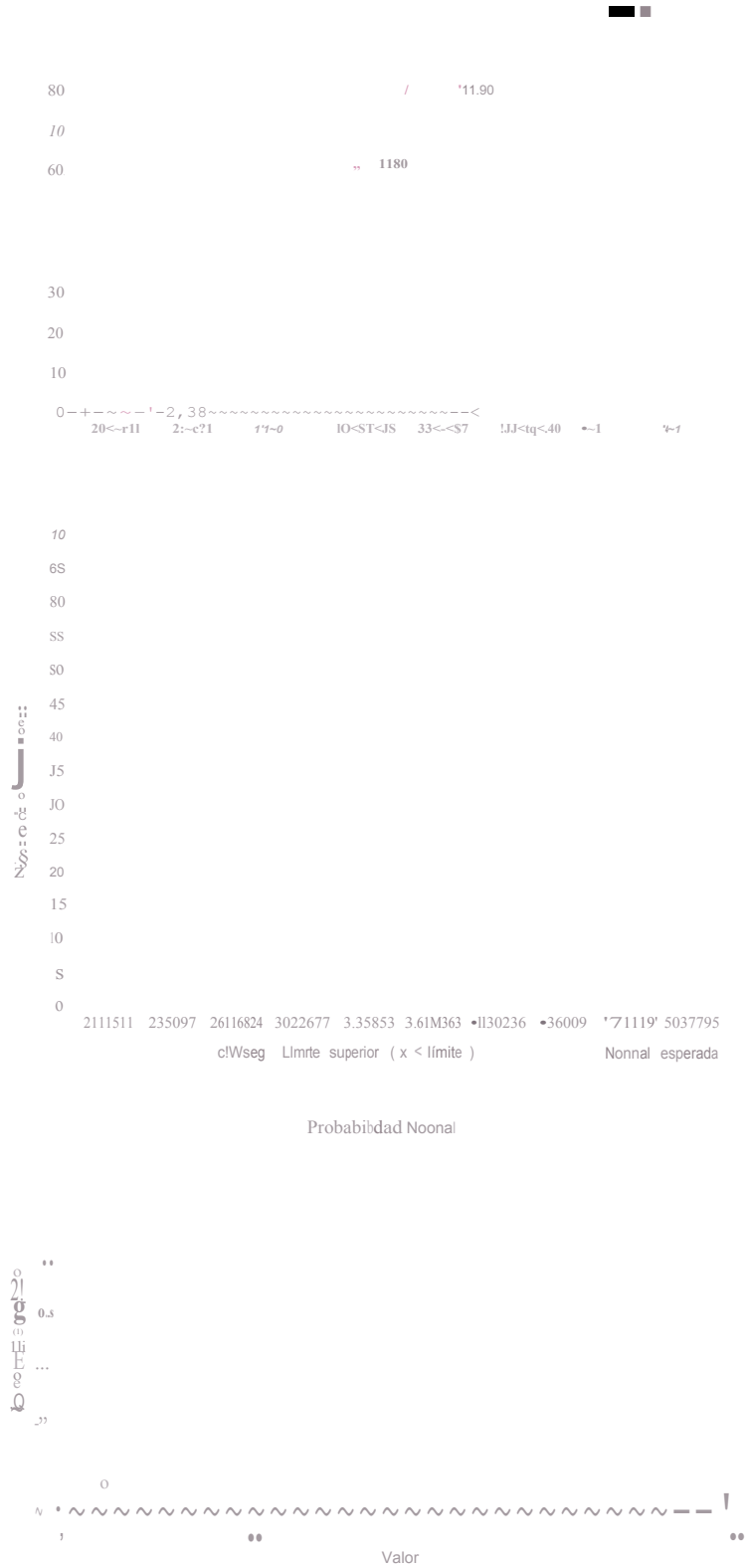


Fig. 6. Distribución de frecuencia de la velocidad de caída de los sedimentos de Varadero Fracción 0.10 - 0.25 mm

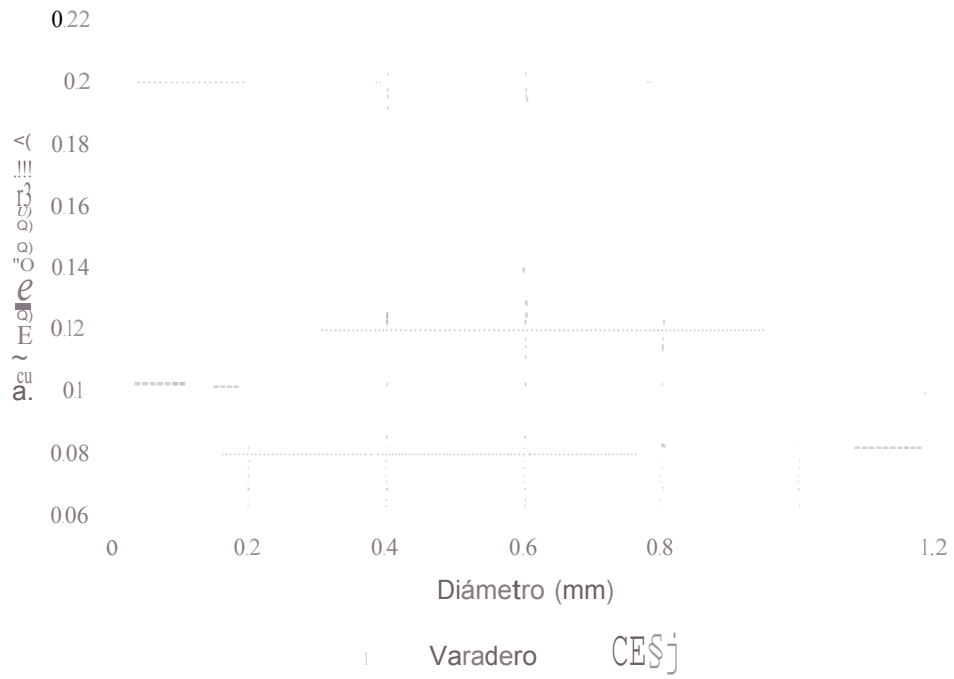


Fig. 7. Relación entre el diámetro de los sedimentos y el parámetro A. Comparación entre las curvas calculadas para Varadero y la relación propuesta por Dean (19n) recogida en el CERC (2002).

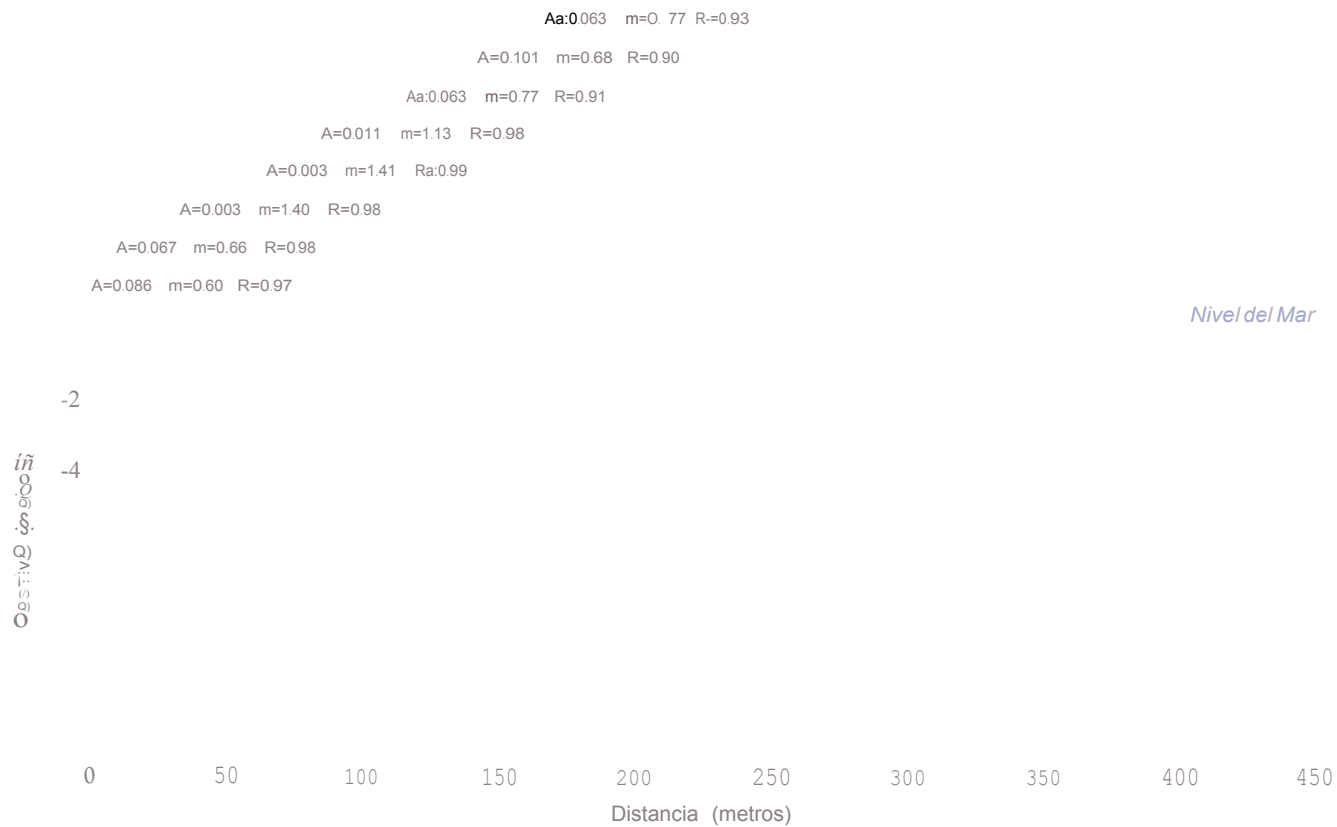


Fig. 8. Cálculo de los parámetros A y m para diferentes longitudes del perfil. Ejemplo del perfil "El Caney" (Junio de 1998).

""ttr

Foto 1. Draga de succión en marcha ALPHA-8, empleada para el vertido de más de 1 millón de m₃ de arena en 1998.

Foto 2. Conformación de las dunas en el sector costero de Kawama - Punta Blanca.

Foto 3. Colocación de la estructura de geotextiles para la protección del restaurante "El Brocal".

PUBLICACIONES REALIZADAS POR EL AUTOR SOBRE EL TEMA DE LA TESIS Y PARTICIPACIÓN EN EVENTOS CIENTÍFICOS

Publicaciones

- 1- "Regeneración de la playa en el sector costero Peñas de Bernardino - Punta Chapelín, Varadero". Revista Ingeniería Civil (95), CEDEX, España. 25 - 38, 1994. Coautor.
- 2- "Propuesta de solución para la regeneración de playa El Salado", Revista de Ingeniería Civil (93), CEDEX, España, 1994. Coautor.
- 3- "Evaluación de la Tendencia Erosiva de la Playa de Varadero". Proceedings: Regional Conference of Latin American and Caribbean Countries, International Geographical Union, 1995. Autor.
- 4- "Research and measures far beach preservation: the case of Varadero Beach, Cuba". Conference on Coastal Change. Intergovernmental Oceanographic Commission, Workshop Report (105), Bordomer, France, 233 - 241, 1995. Coautor.
- 5- "Research and measures for beach preservation: the case of Varadero Beach, Cuba". Proceedings: The future of beach nourishment. EEUU. 1996. Coautor. Publicación repetida de Bordomer.
- 6- Tipología y estado actual de las costas del subarchipiélago Sabana-Camagüey. Proyecto GEF/PNUD. Protección de la biodiversidad y desarrollo sostenible en el ecosistema Sabana-Camagüey. CUB/92/G31. Editorial CESYTA S.L. Madrid, España. 1999. Autor.
- 7- "Alimentación artificial de arena en Varadero. Ejecución y efectividad". Memorias del Congreso MARCUBA' 2000. Ciudad de La Habana, Publicación digital, 2000. Autor.
- 8- "Estudio de factibilidad para la regeneración de la playa de Juan Dolio, República Dominicana". Memorias del Congreso MARCUBA' 2000. Ciudad de La Habana, Publicación digital, 2000. Coautor.
- 9- "Recuperación de la playa de Varadero. Proyecto, ejecución y monitoreo". XIV Forum de Ciencia y Técnica, Ciudad de La Habana, 2001. Autor.

10-"Evaluación de la idoneidad de la arena en la Cuenca de Mono para su empleo en la alimentación artificial de arena en la playa de Varadero". ISBN 959-7160-12-9, Memorias del III Congreso de Geografía. Ciudad de La Habana, 2002. Autor.

Eventos

- 1- Congreso de la Federación Mundial de Organizaciones Ingenieras, FM01'93, La Habana, 1993.(Coautor)
- 2- Manejo Costero en la Región del Caribe. Trinidad Tobago. 1993. (Ponente)
- 3- III Congreso de Ciencias del Mar, MARCUBA'94, La Habana, 1994. (Ponente)
- 4- V Encuentro de Geógrafos de América Latina. La Habana, 1995 (Ponente)
- 5- II Taller de estudio de país sobre diversidad biológica. (Ponente)
- 6- Regional Conference of Latin American and Caribbean Countries. International Geographical Union, La Habana, 1995. (Ponente)
- 7- V Encuentro de Geógrafos de América Latina. 1995. (Ponente)
- 8- Xf-Forum Nacional de Ciencia y Técnica. Obteniendo Premio Relevante con Distinción Especial del Consejo de Estado. 1996. (Coautor)
- 9- IV Congreso de Ciencias del Mar. I Convención Internacional sobre Medio Ambiente y desarrollo de La Habana, 1997. (Ponente)
- 10-Workshop internacional en erosión costera y sedimentación carbonatada. Recife, Brasil. 1997. (Ponente)
- 11-V Congreso de Internacionalde Ciencias del Mar. La Habana, 2000. (Ponente)
- 12-Congreso de Geografía, La Habana, 2001. (Ponente)
- 13-III Congreso de Geografía. Ciudad de La Habana, 2002. (Ponente)

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA FUNDAMENTAL

1. Airy, C. B., "On Tides and Waves". Encyclopaedia Metropolitana, 1845.
2. Álvarez, A., Juanes, J. L., García, C., "Alternativa para la protección de instalaciones turísticas ante la ocurrencia de eventos erosivos extremos en la playa de Varadero". Revista Electrónica Serie Oceanológica. 0, 2001.
3. Álvarez, M. y Ramírez, E., "Estudio de los componentes biogénicos en los sedimentos superficiales de las playas del este de la Ciudad de la Habana». Reporte de Investigación. La Habana. Academia de Ciencias, (9), 1988.
4. American Society for Testing and Materials. Volume 04.08, Soil and Rock (1): 0420-04914, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA., 1994.
5. Avello, O., Ionin, A., Medvediev, V. y Pavlidis, Y., "Estudio geomorfológico y sedimentológico de la Península de Hicacos, costa N de Cuba". (Informe inédito). Instituto de Oceanología, 1973.
6. Bodge, K. R., "Representing Equilibrium Beach Profiles with an Exponential Expression," Journal of Coastal Research, 8 (1) 47 - 55, 1992.
7. Bruun, P., "Coast erosion and the development of beach profiles". Tech. Memo. No. 44, Beach Erosion Board, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS., 1954.
8. Caballero, V., Juanes, J. L., Izquierdo, M., Hernández, K., Felipe, M., Tristá, E., Peña, L., Guerra, R., Peón, C. y Salazar, H., "Recuperación de la playa en el sector Las Calaveras - Punta Molas", XV Forum de Ciencia y Técnica, Ciudad de La Habana, (89), 2004.
9. Cabrera, A. y col., "Programa integrado de acciones para la recuperación, mantenimiento y mejoramiento de la playa de Varadero", Primer Seminario de Manejo de Playas, VARAPLAYAS 2002. Varadero, 2002.

10. Cambers, G., "Towards Integrated Coastal Zone Management in Small Island States". Maul, George A (ed). Coastal and Estuarine Studies (51), 238-249. U.S.A., 1996.
11. Cambers, G., "Coast and Beach Stability in the Eastern Caribbean Islands". Editorial UNESCO, 1985.
12. Campbell, T., Oean, R. G., Mehta, A J. y Wang, H. "Short course on principles and applications of beach nourishment". University of Florida, Florida Shore and Beach Preservation Association and Coastal and Oceanographic Engineering Department, 1990.
13. Center for Civil Engineering Research, Codes and Specifications/ Delft Hydraulics Laboratory, (ed), "Manual on Artificial Beach Nourishment", Report (130), Holland, 1990.
14. Centro de Servicios Ambientales y Oficina de Manejo Integrado Costero, "Mantenimiento de playa en el sector de calle 24 a la calle 38". Informe inédito, Matanzas, (7), 2004.
15. CERC. (Coastal Engineering Research Center), (ed). "Automated Coastal Engineering System". Technical Reference, 1992.
16. CERC. (Coastal Engineering Research Center), (ed). "Coastal Engineering Manual", U.S.A., 2002.
17. CERC. (Coastal Engineering Research Center), (ed). "GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change", Technical Report CERC-89-9. U.S.A., 1991.
18. CERC. (Coastal Engineering Research Center), (ed). "SBEACH: Numerical Model for simulating Storm-Induced Beach Change", Technical Report CERC-89-9. U.S.A., 1996.
19. CERC. (Coastal Engineering Research Center), (ed). "Shore Protection Manual", U.S.A., 1984.

20. CESIGMA, S. A., "Estudio de factibilidad para la regeneración de la playa de Juan Dolio, República Dominicana". (64), 1999 a.
21. CESIGMA, S. A., "Estudio de factibilidad para la regeneración de las playas de Barahona, República Dominicana". (40), 1999 b.
22. CESIGMA, S. A., "Estudio de factibilidad para la regeneración de la playa de Long Beach, Puerto Plata, República Dominicana". (39), 1999 c.
23. CESIGMA, S. A., "Proyecto ejecutivo. Regeneración de la playa Long Beach. República Dominicana". (27), 1999 d.
24. CESIGMA, S. A., "Proyecto Ejecutivo. Regeneración de playa Barahona". (34), 2001.
25. CESIGMA, S. A., "Factibilidad ingeniero - ambiental para la restauración de la playa Corbanitos, Baní, República Dominicana". (22), 2002.
26. CESIGMA, S. A., "Proyecto ejecutivo. Recuperación de playa Corbanitos, Baní, República Dominicana". (78), 2003.
27. Dean, R. G., "Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications", *Journal of Coastal Research*, 7 (1) 53-84, 1991.
28. Dean, R. G., "Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts," Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report 12, University of Delaware, Newark, DE. USA., 1977.
29. Dean, R. G., "Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions," *Coastal Sediments '87*, American Society of Civil Engineers, New Orleans, LA, 1, 1-24, 1987.
30. Dean, R. G., y Dalrymple, R. A., "*Coastal Processes with Engineering Applications*", Cambridge University (ed), New York, 2001.
31. Dean, R. G., and Maurmeyer.- E. M., "Models for Beach Profile Response" *CRC Handbook on Beach Erosion and Coastal Processes*, P. D. Komar, (ed.), Chapter 7, 151-166, 1983.

32. Dvorstiak, J., Rossik, B., Polomsky, P., Valko, P., Adasek, S., Mihalik, F., López, A. y Armas, B. "Instrucciones técnicas de los trabajos topográficos", Editorial Pueblo y Educación, (226), 1984.
33. EMPACA, "Estudio de impacto ambiental para la regeneración de las playas de Bayahibe utilizando la tecnología de los Reef-Ball". Santo Domingo, República Dominicana, 2004.
34. Folk, R. L. y Ward, W. C., "Brazos River Bar. A Study in the Significances of Grain Size Parameters," *Journal of Sedimentary Petrology*, (27) 3-26, 1957.
35. Gaceta Oficial de la República de Cuba, "Decreto Ley No. 212 para la Gestión de la Zona Costera", 2000.
36. García, C. y Juanes, J. L., "Evaluación de la Tendencia Erosiva de la Playa de Varadero". Regional Conference of Latin American and Caribbean Countries, International Geographical Union, (154), 1995.
37. García, C., Juanes, J. L., Izquierdo, M., Álvarez, A., Hernández, K., Fonseca, V., Salazar, H., Rivas, L. y Felipe, M. "Atimentación artificial de arena en Varadero. Ejecución y efectividad". Memorias del Congreso MARCUBA' 2000. Ciudad de La Habana. (22), 2000.
38. García, C., Juanes, J. L., Izquierdo, M., Álvarez, A., Salazar, H., Felipe, M., Martell, R., Tristá, E., Peña, L., Hernández, K y Rivas, L. "Recuperación de la playa de Varadero. Proyecto, ejecución y monitoreo". XIV Forum de Ciencia y Técnica, Ciudad de La Habana, (65), 2001.
39. García, C., Juanes, J. L., Izquierdo, M., Rivas, L. y Hernández, K. "Evaluación de la idoneidad de la arena en la Cuenca de Mono para su empleo en la alimentación artificial de arena en la playa de Varadero". ISBN 959-7160-12-9, Memorias del III Congreso de Geografía. Ciudad de La Habana, 2002.
40. García, G. y Juanes, J. L. "Beach erosion and mitigation: The case of Varadero beach". Conference Workshop on Small Island Oceanography. UNESCO, Fort de France, Martinique, 1993.

41. García, M. y Menejías, J. G. "Informe monitoreo de playas. Villa Clara, 2003". Informe al Proyecto GEF/PNUO (CUB/98/G32), 2003.
42. Goda, Y., "A Synthesis of Breaker Indices," *Transactions of the Japanese Society of Civil Engineers*, 2 (2), 1970.
43. Gravens, M. S., Kraus, N. C. y Hanson, H., "GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change - Report 2 Workbook and System User's Manual", Technical Report CERC-89-19, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS., 1991.
44. Hallermeier, R.J., "Fall velocity of beach sands", Coastal Engineering Technical Note, CETN-11-4. Coastal Engineering Research Center. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS., 1981.
45. Harris, O.L., "Meteorological Aspects of Storm Surge Generation," *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, HY7 (1859) (25), 1958.
46. INTUR - Instituto de Oceanología, "Plan de medidas para la recuperación y mantenimiento de la playa". Informe inédito. Ciudad de La Habana. (13), 1986.
47. Ionín, A. S., Pavlidis, Y. y Avallo, O., "Geología de la plataforma de Cuba". Editorial Nauka, URSS. (en ruso), 1977.
48. IPF (Instituto de planificación Física), "Plan Director para el desarrollo integral de Varadero". Varadero, Matanzas. (15), 1988.
49. Juanes, J. L. y col., "Investigaciones de morfología litoral y dinámica de arenas en la Península de Hicacos". Informe final Instituto de Oceanología. Ciudad de la Habana, (32), 1981.
50. Juanes, J. L. y col., "Diagnostico de los Procesos de Erosión en las Playas Arenosas del Caribe". UNEP/ROLAC GPA., 2003.
51. Juanes, J. L. y García, C., "Trabajos para la protección y remodelación de un sector de playa en el complejo Kawama - Punta Blanca" Informe inédito Instituto de Oceanología. Ciudad de la Habana, (6), 1994.

52. Juanes, J. L., Caballero, V., Izquierdo, M. y Hernández, K., "Proyecto Ejecutivo para la recuperación de la playa en el sector Las Calaveras - Punta Molas". Informe Instituto de Oceanología. Ciudad de la Habana. (61), 2002.
53. Juanes, J. L., García, C. y Álvarez, A., "Trabajos para la remodelación de las dunas en el sector más urbanizado de Varadero" Informe Instituto de Oceanología. Ciudad de la Habana. (13), 1996.
54. Juanes, J. L., García, C., García, G., "Research and measures for beach preservation: the case of Varadero Beach, Cuba". Conference on Coastal Change. Intergovernmental Oceanographic Commission, Workshop Report (105), Brest, France, 233-241, 1995.
55. Juanes, J. L., García, C., Martell, R. y Rodríguez, R., "Regeneración de la playa en el sector costero Peñas de Bernardino - Punta Chapelín, Varadero". Revista Ingeniería Civil (95), CEDEX, España. 25 - 38, 1994.
56. Juanes, J. L., García, C., y Álvarez, A., "Proyecto vertimiento de arena. Varadero 1998". Instituto de Oceanología. Ciudad de la Habana. (30), 1998.
57. Juanes, J. L., Hernández, E., Tristán, E., Zimmerman, M., Ponce, S., Arteaga, F., Salazar, H., Caballero, M., Felipe, M., Martínez, A. y Perdomo, D. "Evaluación de los vertimientos de arena en Varadero en 1988" (informe inédito). Instituto de Oceanología, 1990.
58. Juanes, J. L., Ramírez, E. y Medvediev, V. S., "Dinámica de los sedimentos en la Península de Hicacos, Cuba I, Variaciones morfológicas del perfil de playa". Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio. (10), 1985.
59. Juanes, J. L., "La erosión de las playas de Cuba. Alternativas para su control". Tesis de Doctorado. Instituto de Oceanología, 1996.
60. Juanes, J.L., Ramírez, E., Caballero, M., Medvediev, V. S., y Yurkevich, M. G., "Dinámica de los sedimentos en la Península de Hicacos, Cuba II, Efecto de las olas de viento en la zona; costera". Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio. (11), 1986.
61. Kriebel, D. L., "Verification Study of a Dune Erosion Model," Shore and Beach. 54 (3) 13-21, 1986.

75. Moore, B. D., "Beach Profile Evolution in Response to Changes to Water level and Wave Height," MS. thesis, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, 1982.
76. Munk, W.H., "The Solitary Wave Theory and Its Application to Surf Problems," *Annals of the New York Academy of Sciences*, (51) 376-462, 1949.
77. Myers, V.A., "Characteristics of United States Hurricanes Pertinent to Levee Design for Lake Okeechobee, Florida" Hydrometeorological Report (32), U.S. Weather Bureau, Washington, D.C., 1954.
78. NCDC. NOAA <http://navy.ncdc.noaa.gov/products/gtccalgtccamain.html> Global Tropical Cyclone Climatic Atlas
79. Onishenko, E. L., "Acerca de la sedimentación de las partículas sólidas en líquidos viscosos". (en ruso). *Revista Meteorología e Hidrografía*. (9), 1978.
80. Osario, P. y col., "Análisis Hidrometeorológico y Estadístico de las Penetraciones del Mar ocurridas en el Malecón Habanero". Grupo de Trabajo para Investigaciones Climáticas Aplicadas a Zonas Costeras, Instituto de Meteorología, 1994.
81. PC Global Wave Statistics Report. Cuadrícula 32. 1988.
82. Pichardo, O., Trujillo, H., Pena, E. y Morales, H. "Informe monitoreo de playas. Villa Clara, 2000". Informe del Proyecto GEF/PNUD (CUB/98/G32), 2000.
83. Pope, J., "Responding to Coastal Erosion and Flooding Damages", *Journal of Coastal Research*.13 (3) 704-710, 1997.
84. Ramírez, E. "Caracterización geomorfológica del litoral norte Habana Matanzas". Tesis. Archivo Científico. Cuba. Instituto de Oceanología, (100), 1989.
85. Ramírez, E., García, C., Marte, J.I. R. y Felipe, M., "Estudio de factibilidad para la regeneración de la playa de Juan Dolio. República Dominicana. Memorias del Congreso MARCUBA' 2000. Ciudad de La Habana (23), 2000.