

Reajuste de densidad aparente y retención de carbono: Modelos idóneos para arenas cubanas

Niurka Pedro Silva¹; Lourdes Rivas Rodríguez²; Oralís Catalina Alburquerque Brooks³; Yasser Fernández Perera⁴

Recibido: 23 de noviembre del 2017/ Enviado a evaluar: 24 de noviembre del 2017/ Aceptado: 4 de diciembre del 2017

Resumen. En el presente estudio se solicitó un muestreo de arenas gruesas, para reajustar la modelación realizada en las Playa del Este de La Habana de densidad aparente y retención de carbono. Las nuevas muestras se colectaron en la playa de Varadero y en los préstamos Felipe y La Jaula. Se analizó: granulometría, composición, densidad aparente y retención de carbono, a muestras de arenas finas, medias y gruesas, según la clasificación de Wentworth. Se comprobó que los resultados se ajustan a una distribución normal. Los datos obtenidos en las Playas del Este de La Habana y en la playa de Varadero, se unieron, ordenaron y relacionaron en modelos matemáticos con un 95% de confianza. Para elegir los modelos idóneos se pronosticaron valores a partir de la granulometría y se compararon con los resultados del muestreo de las arenas submarinas utilizadas para la recuperación de playas. Se recomendó investigar y mejorar la representatividad de los modelos.

Palabras clave: Arenas carbonatadas; características físicas y químicas; Cuba.

[en] Re-adjustment of apparent density and carbon retention: Suitable models for cuban sands

Abstract. In the present study a sampling of coarse sands was requested, to readjust the modeling of the apparent density and the carbon retention that had been carried in the Beaches of Eastern Havana. The samples were collected in the beach of Varadero and Felipe and La Jaula loans. It's analyzed: granulometry, composition, apparent density and carbon retention in samples of fine, medium and gross sand, according to the Wentworth classification. It was found that the results fit a normal distribution. The results obtained in the Beaches of Eastern Havana and in Varadero Beach, were gathered, ordered and related them in mathematical models with 95% confidence. To choose the ideal models, values were predicted based on particle size and compared with the sampling results of the underwater sands used for

¹ Inversiones Gamma, S.A. (Cuba).
E-mail: niurka.pedro@gmail.com

² Departamento de Procesos Físicos del Instituto de Ciencias del Mar (ICIMAR). Ministerios de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente.

³ Departamento de Química del Instituto de Ciencias del Mar (ICIMAR). Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio ambiente.

⁴ Departamento de Procesos Físicos del Instituto de Ciencias del Mar (ICIMAR). Ministerios de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente.

artificial beach nourishment. It was recommended to investigate and improve the representativeness of the models.

Key words: Carbonated sands; physical and chemical characteristics; Cuba.

[fr] Ré-ajustement de la densité apparente et de la rétention du carbone: Modèles adaptés aux sables cubains

Résumé. Dans la présente étude un échantillonnage de sables grossiers a été demandé afin de réajuster la modélisation de la densité apparente et de la rétention de carbone réalisée sur les Plages de l'Est de La Havane. Des échantillons ont été recueillis sur les plages de Varadero et Felipe et La Jaula. Nous avons analysé: la granulométrie, la composition, la densité apparente et la rétention du carbone, en des échantillons de sables fines, moyennes et grossières, selon la classification de Wentworth. Il a été constaté que les résultats correspondent à une distribution normale. Les résultats obtenus dans les Plages de l'Est de La Havane et dans la plage de Varadero ont été réunis, ordonnés et associés dans des modèles mathématiques avec un degré de confiance de 95%. Pour choisir les modèles idéaux, les valeurs ont été prédites en fonction de la taille des particules et comparées aux résultats d'échantillonnage des sables sous-marines utilisés pour la récupération des plages. On a recommandé d'étudier et d'améliorer la représentativité des modèles.

Mots clés: Sables carbonatés; caractéristiques physiques et chimiques; Cuba.

Cómo citar. Pedro Silva, N., Rivas Rodríguez, L., Albuquerque Brooks, O.C. y Fernández Perera, Y. (2017): Reajuste de densidad aparente y retención de carbono: Modelos idóneos para arenas cubanas. *M+A Revista Electrónica de Medioambiente*, 18(2), 117-135.

Sumario. 1. Introducción. 2. Colecta y análisis de las muestras. 2.1. Colecta de muestras. 2.2. Análisis de las muestras. 2.2.1. Análisis de granulometría y composición. 2.2.2. Determinación de densidad aparente y retención de carbono. 3. Ajustes y selección de modelos. 3.1. Ajuste de los modelos. 3.2. Selección de modelos idóneos. 4. Entorno y características de las arenas. 4.1. Sitios de muestreo. 4.2. Características de las arenas. 4.2.1. Granulometría y composición. 4.2.2. Densidad aparente y retención de carbono. 5. Modelos para pronósticos. 5.1. Relación granulometría vs. fracción de carbonato de calcio. 5.2. Relación granulometría vs. densidad aparente. 5.3. Modelos más idóneos para pronósticos. 6. Conclusiones. 7. Recomendaciones. 8. Bibliografía

1. Introducción

En la modelación de la densidad aparente y retención de carbonato de calcio de las arenas Playas del Este de La Habana, se recomendó incluir resultados de arenas gruesas (Pedro Silva, N., 2017). Con este fin se solicitó un muestreo en la playa de Varadero, península Hicacos, provincia de Matanzas. En la selección de los puntos de muestreo, se incluyeron localidades con sedimentos de granulometrías gruesas, medias y finas, según la clasificación propuesta por Wentworth en el Shore Protection Manual (1984). En el diseño del muestreo se concibió con la caracterización de la morfología de las playas, la ubicación de los puntos de colecta, la realización de análisis de granulometría, composición, densidad aparente y retención de carbono por las arenas.

Las medidas de granulometría obtenidas en las Playas del Este de La Habana, se unieron a las medidas en la playa de Varadero. Se reajustaron seis modelos que se

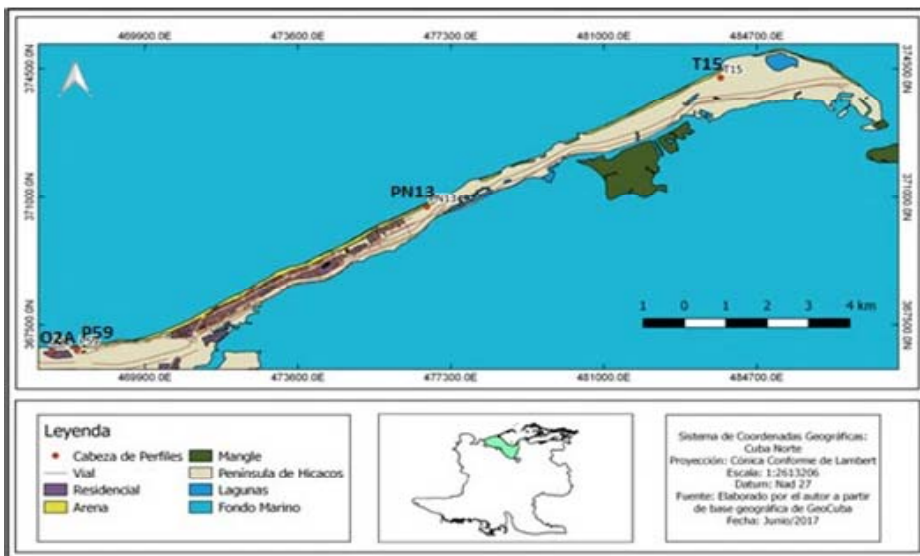
validaron para la elección de los más idóneos para los pronósticos, a partir de los resultados de las muestras de arenas extraídas en las cuencas de arena de Felipe y La Jaula. Estos sitios son submarinos y sirven de préstamo de arena para la recuperación de playas localizadas en los cayos Coco y Guillermo del archipiélago Jardines del Rey, al norte de la provincia de Ciego de Ávila. Las muestras se analizaron con las siguientes variables: granulometría, composición, densidad aparente y retención de carbono por las arenas.

Los muestreos realizados propiciaron reajustar los modelos de densidad aparente y retención de carbono en arenas carbonatadas cubanas, su validación y elección de los modelos más idóneos para los pronósticos.

2. Colecta y análisis de las muestras

La playa Varadero se encuentra ubicada en la península de Hicacos, provincia de Matanzas, en la costa norte de Cuba. Para el muestreo, se escogieron sitios a lo largo de la costa. Los cuatro puntos seleccionados fueron los perfiles: O-2A, P- 59, PN-13 y T-15, ubicados de oeste a este (Figura 1). El monitoreo llevado a cabo durante décadas en esta playa sitúa los perfiles O-2A y P-59 a ambos lados del canal de Paso Malo, en los sectores Oasis y Varadero Histórico, respectivamente. El perfil PN-13 también se encuentra situado en el Varadero Histórico, mientras T-15 se ubica en el sector Los Tainos.

Figura 1. Ubicación de las localidades muestreadas.



Fuente: Elaboración propia.

Las zonas de préstamo donde se extrajeron las arenas para la recuperación de las playas en Jardines del Rey, se localizan en dos sitios. Uno al noreste de Cayo Jaula, La Jaula a los efectos de esta investigación y otro al noreste del Cayo Felipe de Barlovento, Felipe a los efectos de esta investigación.

2.1. Colecta de muestras

En Varadero, se colectaron un total de 16 muestras de arena. En cada sitio seleccionado se midió el perfil de la playa y se tomaron dos muestras en la duna y dos en la postplaya. Excepto en el perfil P-59 que por ausencia de duna se muestreó en la posplaya alta. Todas las muestras se colectaron de forma manual (Figura 2). Ocho muestras se destinaron para el análisis químico, envasadas en frascos plásticos de 45 cc de capacidad. Ocho muestras se destinaron para el análisis granulométrico, conservadas en sacos de tela previamente identificados. Cuatro muestras de las ocho separadas para el procesamiento granulométrico, se escogieron para el análisis de la composición.

Figura 2. Colecta manual de las muestras en la playa de Varadero.



Fuente: Elaboración propia.

De los préstamos Felipe y La Jaula, se tomaron 8 muestras. El material colectado en la cántara de la draga (Figura 3), fue extraído durante el vertimiento de arenas

realizado de septiembre a diciembre del 2016, en el archipiélago Jardines del Rey, en la provincia de Ciego de Ávila. Se seleccionaron 8 muestras con diferentes granulometrías. Dado el predominio de arenas medias, en cada zona de préstamo se escogieron: dos muestras de arena media, una de arena fina y una de arena gruesa.

Figura 3. Colecta de muestra de arena en la cántara de la draga.



Fuente: Elaboración propia.

2.2. Análisis de las muestras

2.2.1. Análisis de granulometría y composición

El análisis granulométrico se realizó según la metodología propuesta por Petelín, (1967). El contenido arenoso de las muestras se determinó mediante tamizado en seco. Se empleó una tamizadora analítica Restsh As 200 y un juego de tamices con mallas de 0,063; 0,125; 0,25; 0,50; 1; 2 y 4 milímetros (mm). Los datos de peso por tamiz se procesaron mediante el software GRADISTAT Versión 8.0 elaborado por Simon Blott (Blott, 2010), obteniéndose por el método de los momentos, el diámetro medio de la partícula (M) en mm y σ , la desviación estándar, la asimetría y la curtosis. Para la clasificación del sedimento se empleó la propuesta por Wentworth, en el Shore Protection Manual, 1984, (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de la granulometría por Wentworth.

TIPO DE SEDIMENTO	M
Arcilla	0,0024 – 0,0039
Limo	0,0039 – 0,063
Arena muy fina	0,063 – 0,125
Arena Fina	0,125 – 0,25
Arena Media	0,25 – 0,50
Arena Gruesa	0,50 – 1,00
Arena muy gruesa	1,00 – 2,00
Grava	2,00 – 4,00

Fuente: Shore Protection Manual (1984).

El análisis de composición de las muestras de sedimento se realizó según la metodología de Avello y Pavlidis, (1975). Se escogieron las fracciones de 2 a 1, de 1 a 0,5 y de 0,5 a 0,25 milímetros (mm). Por medio del microscopio, se tomaron de forma aleatoria 200 granos de cada una de ellas. A continuación, se procedió a la separación de los diferentes grupos de biocomponentes, de acuerdo con las

características morfológicas que se apreciaron. Finalmente se obtuvieron las proporciones de cada grupo respecto al total de la muestra.

Como biocomponentes pueden aparecer: fragmentos de algas calcáreas, conchas de moluscos y foraminíferos. Otros componentes biogénicos como: los corales, alcionarios, briozoos, ostrácodos, espículas de esponjas, espinas y fragmentos del esqueleto de equinodermos, anélidos, muelas de cangrejos, entre otros, se contabilizan en bajos porcentajes y se agrupan en categoría de “Otros Grupos”. Entre los restos inorgánicos se encuentran: litoclastos, minerales y otros fragmentos no biogénicos, incluidos los de origen antrópico.

2.2.2. Determinación de densidad aparente y retención de carbono

Para la determinación de carbonatos y carbono orgánico, las muestras fueron secadas a 105 °C por 24 horas, el carbonato se determinó por volumetría (Jackson, 1970) y el carbono orgánico por el método del ácido crómico, valorando el exceso de reactivo con sulfato ferroso amónico (Walkley and Black, 1934).

La densidad de la arena se determinó a partir de un volumen de muestra y se transfirió a un recipiente previamente tarado. La masa de la muestra, se estimó por diferencia entre el peso del recipiente vacío y él con muestra. La densidad aparente de la arena, se calculó por división de la masa entre el volumen de la muestra.

3. Ajustes y selección de modelos

3.1. Ajuste de los modelos

Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó el programa STATGRAPHICS Centurion (StatPoint, Inc 2006). Los resultados del muestreo de la playa de Varadero se adicionaron a los anteriores procedentes del análisis realizado en las Playas del Este de la Habana (Pedro N. 2017). Se ordenaron en 3 columnas: granulometría en mm, la densidad aparente en gramos por centímetros cúbicos (g/cm^3) y la fracción de CaCO_3 en valor porcentual (%) deducido de la relación entre los miligramos (mg) de CaCO_3 por gramo (g) de arena. En el menú clásico de STATGRAPHICS Centurion se calcularon los estadígrafos: promedio, desviación estándar, mínimo, máximo, sesgo estandarizado, curtosis estandarizadas e intervalos de confianza. Se analizó la procedencia normal de los resultados.

Las columnas de los datos se relacionaron y generaron 3 modelos: 2 ecuaciones lineales y 1 de segundo orden. En el menú clásico de STATGRAPHICS Centurion se eligió; relacionar, un factor, regresión simple y regresión polinomial. Primero se generó el modelo lineal, él se convirtió en un modelo alternativo en la opción; tablas, comparación de modelos alternativos y se convirtió al de mayor R^2 . Se generó un modelo polinomial de segundo orden. Los modelos se analizaron en la opción Tablas se eligió; Análisis, Prueba de Carencia de Ajuste y Pronóstico.

Los modelos se analizaron con el estadígrafo R2. El error estándar indicó la desviación estándar de los residuos. Se pronosticaron nuevos valores de la fracción de carbonato de calcio y la densidad aparente para los valores mínimo y máximo de la granulometría. Se generaron los intervalos de predicción y confianza para un 95%. Se comprobó si los pronósticos se encontraban dentro de los intervalos de predicción y de confianza de las cotas internas y externas de la gráfica del modelo ajustado. Se realizó la prueba de carencia de ajuste del modelo.

3.2. Selección de modelos idóneos

Los modelos ajustados se validaron para la selección de los más idóneos. Con cada modelo se generaron series de datos de fracción de carbonato de calcio y densidad aparente, a partir de la granulometría de las arenas en Felipe y La Jaula. Los valores pronosticados se compararon con los resultados del muestreo, mediante el procedimiento de comparación de muestras arregladas en pares. Este procedimiento evalúa diferencias significativas entre dos muestras de datos que fueron colectados o agrupados como parejas. El objetivo de la comparación de muestras pareadas es determinar si la diferencia media es igual a cero. En el menú Estándar de STATGRAPHICS Centurion se eligió: Comparar, Dos Muestras, Muestras Pareadas. Se optó como modelo más idóneo para los pronósticos, el que demostró un valor de la media de las diferencias más cercano a cero.

4. Entorno y características de las arenas

4.1. Sitios de muestreo

El trabajo de campo en la playa de Varadero, se realizó bajo condiciones de tiempo normales, con viento de componente este y poco oleaje.

El perfil O-2A, ubicado al oeste del canal de Paso Malo, próximo al hotel Oasis, se caracteriza por ser un sector de playa encajada con barrera protectora, limitada en ambos extremos por estructuras rígidas. Presenta un perfil incompleto, dado la ausencia de barras submarinas. Tiene una pequeña duna que no sobrepasa el metro de altura. La longitud del perfil emergido no alcanza los 60 metros (m). La pendiente de la postplaya y anteplaya va desde moderada a pronunciada con dirección al mar y presenta un fondo arenoso-rocoso. Muestra un sustrato arenoso con vegetación arbustiva y arbórea en la postduna, mientras que la duna está parcialmente cubierta por vegetación herbácea y rastrera. En la postplaya aparece un escarpe suavizado, probablemente por la acción eólica unido al paso de los bañistas por la playa.

El perfil P-59, situado al este del canal de Paso Malo, próximo al hotel Punta Arena, constituye una playa apoyada sin barrera protectora, ya que su extremo occidental se sustenta en el espigón este de dicho canal, el cual interrumpe el transporte de sedimento de este a oeste, lo cual propicia su acumulación en ese extremo. El perfil emergido presenta una extensa postplaya, con una longitud algo mayor de 110

m y una altura sobre el nivel medio del mar entre 2,50 y 3 metros. Se considera que es un perfil incompleto, dado la ausencia de duna y barra submarina. En la parte alta de la postplaya existe vegetación arbustiva, fundamentalmente uva caleta y cocoteros. Además se aprecia césped. Aproximadamente a ocho kilómetros al este del perfil P-59, se encuentra PN-13, situado en el frente de playa del hotel Star Fish Cuatro Palma. Este sector costero clasifica como una playa lineal sin barrera protectora, de perfil incompleto, con una parte emergida que no supera los 45 m y una postplaya que oscila entre uno y 3,5 metros sobre el nivel medio del mar. En el momento de las mediciones existía un pequeño escarpe (aproximadamente de 50 cm) muy próximo a la zona de la anteplaya. Parte de la postplaya se encuentra ocupada por numerosas sombrillas y tumbonas, destinadas a satisfacer las necesidades de los usuarios del hotel. A lo largo del perfil no existe vegetación. En el único montículo de duna existente donde se colectó la muestra de sedimento, lo que existe es césped.

El último perfil medido fue T-15, el mismo se ubica próximo al hotel Paradisus, en un sector de playa considerada como apoyada con barrera protectora, ya que hacia su extremo este se encuentra un saliente rocoso. La longitud del perfil emergido se encuentra alrededor de los 75 m, con una pequeña duna que no excede el metro de altura. En la postplaya, aproximadamente a los 45 m de distancia de la cabecera del perfil, aparece un montículo de arena, que pudiera considerarse una duna embrionaria. Entre esta y el inicio del perfil la postplaya tiene forma convexa. En la parte alta de la postplaya existe vegetación arbustiva, fundamentalmente uva caleta y cocoteros. Sobre la duna lo que existe es césped. En general, el ancho de la playa emergida oscila entre 45 y 110 m y la altura de las dunas en ningún caso superan el metro. Es característico de estas localidades el poco desarrollo de las mismas. Por ejemplo, en el perfil PN-13 existen instalaciones turísticas ubicadas sobre la misma duna. Hay que señalar que el Perfil P-59 se encuentra ubicado donde no se ha realizado la alimentación artificial de arena, ya que este sector se alimenta por transporte sedimentario. Mientras que los sitios donde se encuentran los perfiles O-2A, PN-13 y T-15 se han beneficiados por este tipo de acción.

4.2. Características de las arenas

4.2.1. Granulometría y composición

Como se puede observar en la Tabla 2, en los dos perfiles ubicados hacia el oeste existe un predominio de arena gruesa, mientras que en los situados más al este el grupo textural que más abunda es la arena fina. Como es de esperar en cada perfil se aprecia una disminución del tamaño del grano en la duna respecto a la postplaya. Esta diferencia es mayor en los perfiles con sedimentos más gruesos. Dicha disminución responde a que los granos finos, al ser más pequeños, hacen menos resistencia a ser movidos por el viento, por lo que se transportan a mayor distancia hacia tierra.

Tabla 2. Granulometría y composición de las arenas en la playa de Varadero.

Muestras		Diámetro (mm)	Composición (%)				Otros Grupos
Perfil	Sitio		Algas calcáreas	Moluscos	Foraminíferos	Bioclastos no identificados	
O2-A	D	0,45					
	PP	0,78					
P-59	PP(alta)	0,53	54,50	19,83	13,66	11,83	0,16
	PP	0,62	55,33	18,16	12,16	14,16	0,16
PN-13	D	0,21					
	PP	0,22					
T-15	D	0,19	48,21	18,52	19,47	13,06	0,71
	PP	0,27	53,33	18,00	15,83	12,50	0,33

Nota: O2-A, P-19, PN-13, T-15 colecta en Varadero, Duna (D), Post playa (PP).

Fuente: Elaboración propia.

En todos los casos el componente que más contribuye a la formación de las arenas son las algas calcáreas, representando alrededor de la mitad de las muestras analizadas. El segundo lugar lo ocupa los moluscos. Solo en la postplaya del perfil P-59, los bioclastos no identificados sobrepasan los porcentajes reportados por los foraminíferos. Los organismos que se incluyen en "Otros Grupos" no resultan de importancia en la formación de los sedimentos observados, de acuerdo a los valores alcanzados por los mismos. En ninguna de las muestras sujetas a análisis se observaron restos inorgánicos, sedimento oolítico, ni fragmentos de origen antrópico.

El resumen estadístico para el conjunto de 16 datos de granulometría (8 de la playa de Varadero y 8 de las Playas del Este de La Habana), mostró un promedio de 0,342 mm, una desviación estándar de 0,184, el valor mínimo fue 0,18 mm y el máximo 0,78 mm, el sesgo estandarizado resultó 1,846 y la curtosis estandarizada 0,379. Los valores de sesgo y curtosis estandarizados indican que los datos se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 3. Granulometría y composición de las arenas en los préstamos.

Muestras		Diámetro (mm)	Composición (%)				Otros Grupos
Préstamo	Viaje		Algas calcáreas	Moluscos	Foraminíferos	Bioclastos no identificados	
Felipe	66	0,15	38,66	16,50	38,83	5,50	0,50
Felipe	161	0,47	41,00	19,33	18,00	20,50	1,16
Felipe	181	0,58	42,33	22,50	11,50	20,16	3,50
Felipe	201	0,33	42,16	20,33	19,16	17,66	0,66
Jaula	245	0,59	62,00	16,83	9,33	11,00	0,83
Jaula	257	0,30	48,50	19,00	12,66	18,00	1,83
Jaula	375	0,40	55,50	15,83	12,16	15,66	0,83
Jaula	407	0,22	50,66	20,66	19,33	8,50	0,83

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 muestra de forma sintética la granulometría y composición de las muestras seleccionadas en las zonas de préstamo Felipe y La Jaula.

4.2.2. Densidad aparente y retención de carbono

La densidad de las arenas, en general, fue ligeramente superior en las postplayas (PP), con excepción del perfil T-15 el cual presenta los valores más bajos de densidad (Tabla 4). Esto pudiera estar asociado a que la vegetación en las dunas es escasa, por lo no ocurren los procesos de remineralización que son ocasionados por la descomposición de la materia orgánica y los procesos de disolución del carbonato de calcio no se producen. De acuerdo a la literatura revisada, existen pocos estudios sobre la densidad de arenas carbonatadas en playas tropicales. En latitudes más templadas se reportan densidades entre 2,70 y 2,91 g/cm³ (Töpke, 2013 y Kotwicki, 2013). En las Playas del Este de La Habana, se reportan densidades entre 1,238 y 1,480 g/cm³ (Pedro Silva N., 2017).

Las concentraciones de carbonato (CO₃²⁻) en las dunas fluctuaron entre 416 mg/g (693 mg/g de CaCO₃) y 527 mg/g (878 mg/g CaCO₃), y en las postplaya entre 455 mg/g (759 mg/g de CaCO₃) y 541 mg/g (901 mg/g de CaCO₃), valores característicos de sedimentos carbonatados de origen biogénico.

Tabla 4. Caracterización físico química de las arenas en la playa de Varadero.

Perfil	Muestras Sitio	Densidad (g/cm ³)	CO (mg/g)	CO ₃ ²⁻ (mg/g)	CaCO ₃ (mg/g)
O2-A	D	1,557	0,18	527	878
	PP	1,585	0,17	541	901
P-59	PP(alta)	1,455	0,18	455	759
	PP	1,476	0,15	526	877
PN-13	D	1,497	0,29	416	693
	PP	1,556	0,25	455	759
T-15	D	1,412	0,25	434	724
	PP	1,355	0,25	530	883

Nota: O2-A, P-19, PN-13, T-15 colecta en Varadero, Duna (D), Post playa (PP).

Fuente: Elaboración propia.

El resumen estadístico para el conjunto de 16 datos de densidad aparente (8 de la playa de Varadero y 8 de las Playas del Este de La Habana), mostró un promedio de 1,449 g/cm³, una desviación estándar de 0,084, el valor mínimo fue 1,238 g/cm³ y el máximo 1,585 g/cm³, el sesgo estandarizado resultó, -0,178 y la curtosis estandarizada 1,307. Los valores de sesgo y curtosis estandarizados indican que los datos se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

El resumen estadístico para el conjunto de 16 datos de contenido de carbonato de calcio (8 de la playa de Varadero y 8 de las Playas del Este de La Habana), mostró un

promedio de 816 mg/g, una desviación estándar de 0,085, el valor mínimo fue 675 mg/g y el máximo 917 mg/g, el sesgo estandarizado resultó -0,712 y la curtosis estandarizada -1,338. Los valores de sesgo y curtosis estandarizados indican que los datos se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

El préstamo Felipe mostró densidades de las arenas ligeramente superiores que en La Jaula. Las concentraciones de carbonato (CO_3^{2-}) fluctuaron entre 480 mg/g (801 mg/g de CaCO_3) y 532 mg/g (887 mg/g CaCO_3). Estos valores son característicos de sedimentos carbonatados de origen biogénico (Tabla 5).

Tabla 5. Caracterización físico química de las arenas en los préstamos.

Muestras		Densidad (g/cm^3)	CO (mg/g)	CO_3^{2-} (mg/g)	CaCO_3 (mg/g)
Préstamo	Viaje				
Felipe	66	1,210	0,34	484	806
Felipe	161	1,126	0,34	480	801
Felipe	181	1,228	0,34	516	860
Felipe	201	1,126	0,34	480	801
Jaula	245	1,127	0,31	495	824
Jaula	257	1,203	0,31	520	866
Jaula	375	1,124	0,38	522	870
Jaula	407	1,127	0,40	532	887

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados para el carbono orgánico (CO), tanto en Varadero como en Felipe y La Jaula, fueron homogéneos en ambos sitios inferiores a 1mg/g, concentraciones características de sedimentos carbonatados de grano grueso con baja superficie de adsorción.

5. Modelos para pronósticos

5.1. Relación granulometría vs. fracción de carbonato de calcio

De la relación granulometría y la fracción de carbonato de calcio, se ajustaron tres modelos: dos de regresión simple (lineal y alternativo doble inverso) y uno de regresión polinomial de segundo. La variable dependiente fue la fracción de carbonato de calcio expresada en (%) y la variable independiente fue la granulometría en (mm).

Modelo 1

Salida de ajustar un modelo lineal:

$$\text{fracción de carbonato de calcio} = 0,761686 + 0,159494 \cdot \text{granulometría}$$

El valor-P del análisis de la varianza resultó 0,1929 mayor que 0,05, muestra que no hay una relación estadísticamente significativa entre fracción de carbonato de calcio y granulometría con un nivel de confianza del 95%. El estadístico R² indicó que el Modelo 1, explica el 11,7918% la variabilidad en fracción de carbonato de calcio en función de la granulometría. El error estándar del estimado indicó que la desviación estándar de los residuos es 0,0830055. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones. Se hicieron los siguientes pronósticos: para 0,18 mm (mínimo de granulometría) resultó 1,409

% de fracción de carbonato de calcio y para 0.78 mm (máximo de granulometría) resultó 1,557 %. Los valores predichos son ilógicos, superiores a los resultados de las muestras de arena. No obstante, se encuentran dentro de los intervalos de predicción y de confianza de los pronósticos. Los intervalos para las predicciones fueron: 1,409 (1,242 -1,367) y 1,557 (1,577-1,747). Los intervalos de confianza resultaron: 1,409 (1,356-1,452) y 1,557 (1,463-1,662). Los valores pronosticados están dentro de las cotas internas y externas de la gráfica del modelo con un 95% de confianza. La prueba de falta de ajuste demostró el valor- P igual a 0,1929 para el modelo y 0,6489 para la carencia de ajuste, propio de un modelo adecuado a los datos observados con un nivel de confianza del 95%.

Modelo 2

Salida de transformar el modelo lineal a doble inverso:

$$\text{fracción de carbonato de calcio} = \frac{1}{1,11247 + \frac{0,345246}{\text{granulometría}}}$$

El valor-P del análisis de la varianza resultó 0,1346 mayor que 0,05, muestra que no hay una relación estadísticamente significativa entre fracción de carbonato de calcio y granulometría con un nivel de confianza del 95%. El estadístico R² indicó que el modelo explica 15,2622% de la variabilidad en fracción de carbonato de calcio en función de la granulometría. El coeficiente de correlación igual a 0,390668, indicó una relación relativamente débil entre las variables. El error estándar del estimado indicó que la desviación estándar de los residuos es 0,129272. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones. Se predijeron valores para el mínimo y el máximo de la granulometría resultaron en el entorno de los resultados de las muestras de arenas: 0,18 mm derivó 0,767 % y 0,78 mm 0,864%. Los intervalos de predicción fueron para 0,767 (0,623-0,995) y para 0,864 (0,683-1,176). Los intervalos de confianza fueron: para 0,767 (0,705-0,839) y para 0,864 (0,777-0,974). Los valores pronosticados están dentro de las cotas internas y externas de la gráfica del modelo con un 95% de confianza. La prueba de falta de ajuste demostró el valor-P igual a 0.1356 para el modelo y 0,7096 para la carencia de ajuste,

propia de un modelo adecuado para los datos observados con un nivel de confianza del 95%.

Modelo 3

Salida de ajustar un modelo polinomial de segundo orden:

fracción de carbonato de calcio =

$$0,747289 + 0,243876 \cdot \text{granimetría} - 0,097348 \cdot \text{granimetría}^2$$

El valor-P del análisis de la varianza resultó 0,4382 mayor que 0,05, muestra que no hay una relación estadísticamente significativa entre fracción de carbonato de calcio y granulometría con un nivel de confianza del 95%. El estadístico R^2 explica 11,9218% de la variabilidad en fracción de carbonato de calcio. El estadístico R^2 ajustada, que es más apropiado para comparar modelos con diferente número de variables independientes resultó 0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0860753. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones. Las predicciones resultaron en el entorno de las muestras: para 0,18 mm 0,788% y para 0,78 mm, 0,878%. Los intervalos de predicción fueron para 0,788 (0,588-0,988). Los intervalos de confianza fueron: para 0,788 (0,715-0,861) y para 0,878 (0,705-1,052). Los valores pronosticados están dentro de los intervalos de predicción, cotas internas y externas de la gráfica del modelo con un 95% de confianza. La prueba de falta de ajuste demostró el valor-P igual a 0,4382 para el modelo y 0,6075 para la carencia de ajuste. El modelo parece adecuado para los datos observados con un nivel de confianza del 95.0%. El valor-P en el término del segundo orden resultó 0,891919 mayor que 0,05, muestra que el segundo orden no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95% y se debería considerar reducir el orden del modelo.

5.2. Relación granulometría vs. densidad aparente

De la relación granulometría y densidad aparente se ajustaron tres (3) modelos: dos de regresión simple (lineal y Y-cuadrada raíz cuadrada-X) y uno regresión polinomial de segundo orden. La variable dependiente es la densidad aparente expresada en (gr/cm^3) y la variable independiente es la granulometría en (mm).

Modelo 4

Salida de ajustar un modelo lineal:

$$\text{densidad aparente} = 1,36515 + 0,246454 \cdot \text{granulometría}$$

El valor-P del análisis de la varianza resultó 0,0323 menor que 0,05, muestra que existe una relación estadísticamente significativa entre densidad aparente y granulometría con un nivel de confianza del 95%. El estadístico R^2 indicó que el modelo ajustado explica 28,7296% de la variabilidad en densidad aparente en función de la granulometría. El coeficiente de correlación igual a 0,536, indicó relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indicó que la desviación estándar de los residuos es 0,0738624. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones. Las predicciones resultaron mayores que los resultados de las muestras: para 0,18 mm, 1,409 gr/cm³ y para 0,78 mm, 1,55739 gr/cm³. Los valores pronosticados están dentro de los intervalos de predicción para 1,409 (1,24226-1,57676) y para 1,55739 (1,36728-1,7475) y de confianza inferior para 1,409 (1,35589-1,46314) y para 1,55739 (1,45229-1,66248). Los valores pronosticados están dentro de los intervalos de predicción cotas internas y externas de la gráfica del modelo con un 95% de confianza. La prueba de falta de ajuste demostró el valor-P igual a 0,0323 para el modelo. La carencia de ajuste resultó un valor-P igual 0,0635. El modelo parece adecuado para los datos observados con un nivel de confianza del 95%.

El Modelo 5

Es la salida de ajustar un modelo Y-cuadrada raíz cuadrada-X:

$$\text{densidad aparente} = \sqrt{(1,60281 + 0,889895 \cdot \sqrt{\text{granulometría}})}$$

El valor-P del análisis de la varianza resultó 0,0294, menor que 0,05, muestra que existe una relación estadísticamente significativa densidad aparente y granulometría con un nivel de confianza del 95%. El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 29,6008% de la variabilidad en densidad aparente después de transformar a una escala logarítmica para linearizar el modelo. El coeficiente de correlación es igual a 0,544066, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,20911. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones. Las predicciones resultaron mayores que los resultados de las muestras: para 0,18 mm, 1,40725 gr/cm³ y para 0,78 mm, 1,54556 gr/cm³, son menores que los pronosticados con los Modelo 4 y 6. Los valores pronosticados están dentro de los intervalos de predicción para 1,40725 (1,22658-1,56723) y para 1,54556 (1,36529-1,70689) y de confianza inferior para 1,40725 (1,34957-1,46266) y para 1,54886 (1,45477-1,6313). Los valores pronosticados están dentro de los intervalos de predicción cotas internas y externas de la gráfica del modelo con un 95% de confianza. La prueba de falta de ajuste demostró el valor-P igual a 0,0294 para el modelo. La carencia de ajuste resultó un valor-P igual 0,0627. Parece que el modelo es adecuado para los datos observados con un nivel de confianza del 95%.

Modelo 6

Salida de ajustar un modelo polinomial de segundo orden:

$$\text{densidad aparente} = 1,36478 + 0,248609 \cdot \text{granulometría} - 0,00248624 \cdot \text{granulometría}^2$$

El valor-P en la tabla ANOVA es 0,1106 mayor que 0,05, muestra que no existe una relación estadísticamente significativa entre densidad aparente y granulometría con un nivel de confianza del 95% o mayor. El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 28,7296% de la variabilidad en densidad aparente. El estadístico R^2 ajustada, que es más apropiado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 17,765%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0766505. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones. Las predicciones resultaron mayores que los resultados de las muestras: para 0,18 mm 1,40945 gr/cm³ y para 0,78 mm, 1,55719 gr/cm³. Los valores pronosticados están dentro de los intervalos de predicción 1,40945 (1,23158-1,58733) y para 1,55719 (1,33084-1,78354) y de confianza inferior para 1,40945 (1,3445-1,4744) y para 1,55719 (1,40287-1,7115). Los valores pronosticados están dentro de los intervalos de predicción cotas internas y externas de la gráfica del modelo con un 95% de confianza. Puesto que el valor-P para la carencia de ajuste en la tabla ANOVA es 0,1106 mayor o igual que 0,05, el modelo parece ser adecuado para los datos observados, con un nivel de confianza del 95%. El valor-P en el término de mayor orden es igual a 0,99689. Puesto que el valor-P es mayor o igual a 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95%, se debería considerar reducir el orden del modelo.

5.3. Modelos más idóneos para pronósticos

Para validar los modelos ajustados, se pronosticaron 48 resultados, 24 de la fracción de carbonato de calcio y 24 de la densidad aparente de las arenas. Los valores se pronosticaron a partir de la granulometría de las muestras de Felipe y La Jaula (Tablas 6 y 7).

Los valores predichos en la Tabla 6 demostraron: Modelo 1 (8 valores, promedio 0,822%, en un rango entre (0,786-0,856), Modelo 2 (8 valores, promedio 0,819%, en un rango entre 0,782-0,857), Modelo 3 (8 valores, promedio 0,824%, en un rango entre 0,782-0,857).

Las diferencias entre la muestra y los valores pronosticados (Tabla 6), mostraron los siguientes rangos: Modelo 1 (8 valores entre -0,036 a 0,09, con promedio de 0,017%), Modelo 2 (8 valores entre -0,042 a 0,099, con promedio 0,020%), Modelo 3 (8 valores entre -0,039 a 0,091, promedio 0,016%).

El Modelo 2 es el más idóneo para el pronóstico de datos futuros. Demostró la mayor representatividad de los modelos ajustados a juicio de R^2 , igual a 15,2622%. Los valores predichos están en el entorno lógico de las observaciones. La media de

las diferencias (0,020), aunque está más alejada de cero respecto a los otros modelos, no es significativa.

Tabla 6. Muestra y pronósticos de la fracción de carbonato de calcio

Granulometría (mm)	CaCO ₃ (%)	Pronóstico: CaCO ₃ (%)		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
0,15	0,806	0,786	0,745	0,782
0,47	0,801	0,837	0,843	0,840
0,58	0,860	0,854	0,853	0,856
0,33	0,801	0,814	0,822	0,817
0,59	0,824	0,856	0,854	0,857
0,30	0,866	0,810	0,815	0,812
0,40	0,870	0,825	0,834	0,829
0,22	0,887	0,797	0,788	0,796
Promedio de las diferencias		0,017	0,020	0,016

Fuente: Elaboración propia.

Los valores predichos en la Tabla 7, muestra y pronóstico de densidad aparente a partir de la granulometría, demostraron: Modelo 4 (8 valores, promedio 1,464 g/cm³, en un rango entre (1,402-1,551), Modelo 5 (8 valores, promedio 1,031 g/cm³, en un rango entre 0,959 a 1,122), Modelo 6 (8 valores, promedio 1,464 g/cm³, en un rango entre 1,402 a 1,551).

Tabla 7. Muestra y pronósticos de densidad aparente

Granulometría (mm)	Densidad aparente (gr/cm ³)	Pronóstico: Densidad aparente (gr/cm ³)		
		Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
0,15	1,210	1,402	1,122	1,402
0,47	1,126	1,481	0,996	1,482
0,58	1,228	1,508	0,962	1,509
0,33	1,126	1,446	1,045	1,447
0,59	1,127	1,551	0,959	1,551
0,30	1,203	1,439	1,056	1,439
0,40	1,124	1,464	1,020	1,464
0,22	1,127	1,419	1,089	1,419
Promedio de las diferencias		-0,305	0,128	-0,305

Fuente: Elaboración propia.

Las diferencias entre muestra y valores pronosticados, mostraron los siguientes rangos: Modelo 4 (8 valores entre e -0,424 a -0,192, con promedio de 0,305 g/cm³),

Modelo 5 (8 valores entre 0,038 a 0,266, con promedio 0,128 g/cm³), Modelo 6 (8 valores entre -0,424 a -0,192, promedio 0,305 g/cm³).

El Modelo 5 demostró ser el más idóneo para el pronóstico de datos futuros. Indicó una representatividad igual a 29,6008% a juicio de R², superior a los modelos 4 y 6. Los valores pronosticados son ligeramente menores que las observaciones. El promedio de la diferencia entre muestra y pronósticos, demostró estar más cercano a cero para los modelos ajustados.

6. Conclusiones

Se reajustaron 6 modelos con los resultados de los muestreos de arenas de las Playas del Este de La Habana y la playa de Varadero: 3 para el pronóstico de la densidad aparente y 3 para la retención de carbono. Los modelos más idóneos en ambos casos resultaron ser los lineales alternativos, confirmados por validación con muestras de carbonato de calcio y densidad aparente de los préstamos Felipe y La Jaula.

7. Recomendaciones

Continuar las investigaciones de la densidad aparente y el contenido de carbonato de calcio en arenas carbonatadas en otras playas del país, para mejorar la representatividad de los modelos.

8. Bibliografía

- Avello, O y Pavlidis, Y. (1975). Sedimentos de la Plataforma Cubana. *Serie Oceanológica*, No. 30. A.C. de Cuba.
- Blott, S., (2010). GRADISTAT 8.0: *A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments by sieving or laser granulometer*.
- Jackson, A. D. (1970). *Análisis químico de suelos*. La Habana: Editora Revolucionaria, p. 480
- Kotwicki, L. (2013). *Sandy shores*. Disponible en: http://www.coastalwiki.org/wiki/Sandy_shores. [Consultado: 20 de Octubre de 2016].
- Pedro Silva N. (2017). “*Modelación de densidad aparente y retención de carbono: Arenas carbonatadas cubanas*”. *M+A Revis. Elect. Medioambiente*. 18(1) 2017: 49-61.
- Petelin, V. M. (1967). *Análisis granulométrico de los sedimentos marinos*. Editorial Nauta, Moscú, p. 76.
- Shore Protection Manual. (1984). Tomo 1. Capítulo 4. *Coastal Engineering Research Center, Material del litoral*, p 4 - 12.
- StatPoint, Inc (2006). STATGRAPHICS® Centurion XV. Software.
- Töpke, K. (2013). *Sandy shores*. Disponible en: http://www.coastalwiki.org/wiki/Sandy_shores. [Consulta: 25 de Octubre de 2016].

Walkley, A and Black, I. A. (1934). *An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science*, 37, p 29-37.

Agradecimientos

Esta investigación se sufragó con el fondo de desarrollo de Inversiones GAMMA S.A. Se reconoce a Adrián Gómez Armenteros, por su preocupación por el desarrollo científico y tecnológico. A Adrián Niévares Pérez e Ileana García Ramil, investigadores del Instituto de Ciencias del Mar, antiguo Instituto de Oceanología por su profesionalidad en los trabajos de laboratorio. A Ada Teja por la revisión y traducción del resumen.