

# Transporte eólico de sedimentos: calibración de modelos mediante trampas de sedimento y perfiles de viento

J. Alcántara-Carrió<sup>1</sup> e I. Alonso<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Geociencias Marinas y O.T. Universidad de Vigo. carrió@uvigo.es

<sup>2</sup> Dpto. de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. ignacio.alonso@fisica.ulpgc.es

## ABSTRACT

*The Isthmus of Jandía (S of Fuerteventura), with more than 54 km<sup>2</sup>, presents different aeolian deposits such as dunes, sandsheets, and serir. Actually, a great amount of sediments are blowing from the Isthmus to the lee beaches. Therefore, the quantification of the aeolian sediment transport is basic for the characterisation of its sedimentary dynamic.*

*To calibrate the models it is necessary to apply some empirical methods such as the use of sand traps. Between the different designs of sand traps we are chosen the Leatherman one (Leatherman, 1978), slightly modified to avoid scouring. Simultaneously wind profiles were measured at the same location with an anemometer tower (cup anemometers at 0.23, 0.5, 1 and 4 m height) during one day, with 5 minutes sampling period.*

*Field experiments were carried out at seven stations and two seasonal periods (winter and summer), and finally, six theoretical models were calibrated: Kawamura (1951), Zingg (1952), Bagnold (1956), Williams (1964), Hsu (1973, 1977), and Lettau & Lettau (1978) (see references in Sherman & Hotta, 1990). In conclusion, the Bagnold model is the most accurate one in order to predict the aeolian sand transport.*

**Key words:** aeolian sand transport, sand traps, wind profiles, calibration, Canary Islands.

## INTRODUCCIÓN

El Istmo de Jandía, en el S de Fuerteventura, es el más extenso ambiente eólico de las Islas Canarias, con 54.2 km<sup>2</sup>. En él se localizan gran diversidad de depósitos eólicos antiguos y modernos, intercalados con costras carbonatadas (caliches), afloramientos volcánicos y depósitos aluviales (Fig. 1).

Su borde costero en la vertiente de barlovento es un acantilado activo de 11.6 km de longitud y más de 30 m de altura en algunos tramos. Las pocas playas que existen en dicho tramo son de cantos o arenas, pero carecen en cualquier caso de franja supramareal. Los estudios con foraminíferos y análisis mineralógicos, así como datos geomorfológicos y texturales demuestran que en la actualidad no existen aportes marinos desde dicho tramo a los ambientes subaéreos del istmo (Alcántara-Carrió, 1999).

Por su parte, en la vertiente de sotavento existe también un acantilado, pero inactivo, debido a que sobre él se apoyan varias dunas de caída (*falling dunes*), así como las extensas playas de sotavento, que incluyen ambientes de llanura mareal, isla barrera y playa. La mayor parte de la superficie del Istmo está incluida en el Parque Natural de Jandía, mientras que el resto del área soporta en las últimas

décadas una fuerte presión urbanística, asociada al uso turístico de las playas de sotavento.

La erosión de la superficie del Istmo es en la actualidad una fuente importante de sedimentos para dichas playas. El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados de la cuantificación del transporte eólico obtenida mediante datos empíricos con trampas de sedimentos, mediciones de perfiles de viento en la zona y la aplicación de modelos físicos, durante dos campañas realizadas en febrero y agosto de 1998.

## METODOLOGÍA

Los estudios se iniciaron con la evaluación *in situ* de la intensidad del transporte eólico mediante la utilización simultánea de una torre de anemómetros que sirve para caracterizar la energía y demás parámetros del viento, junto a trampas de sedimentos que miden el flujo real de las arenas, toma de muestras de sedimentos de la superficie del depósito y mediciones de otros parámetros ambientales (vegetación, pendiente, etc.).

Se realizaron dos campañas de muestreo, en febrero y agosto de 1998, de acuerdo con las diferencias observadas previamente en el comportamiento del viento y la intensidad del transporte. En la primera de las campañas se eligie-

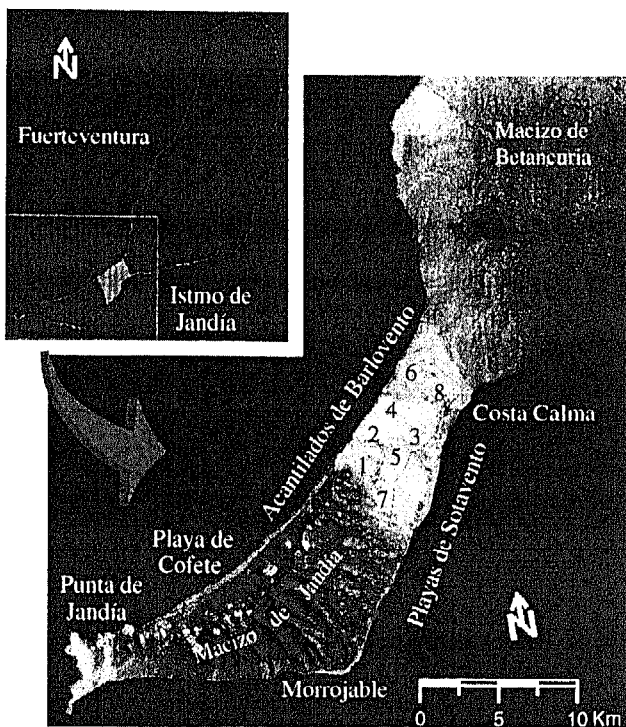


FIGURA 1: Localización de la zona de estudio. Los números sobre la superficie del Istmo corresponden a las estaciones donde se midió el transporte eólico de sedimentos.

ron 7 estaciones de estudio, las cuales se repitieron en la segunda de las campañas, si bien se estudió además una octava estación.

La torre de anemómetros consta de un mástil que sirve de apoyo a 4 sensores de velocidad emplazados a 4, 1, 0.5 y 0.23 m sobre el sustrato y un sensor de dirección ubicado a 2 m de altura. Todos los sensores, así como la unidad de almacenamiento de datos y demás aparatos electrónicos empleados son de la marca Aanderaa. Las frecuencias de muestreo son de 5 minutos en cada estación, y el periodo de muestreo en torno a 24 horas para recoger la variabili-

dad horaria en el comportamiento del viento, coincidiendo con el periodo de muestreo en las trampas.

Las trampas de sedimento elegidas siguen el diseño de Leatherman (1978), si bien tienen pequeñas modificaciones. Entre ellas destaca la ubicación de una tela semienterrada alrededor de las mismas para evitar el socavamiento, obteniéndose un aumento de la eficiencia del 17% (Alcántara-Carrió, 1999). Las trampas se emplazaron en grupos de 4 en cada estación, orientadas respectivamente al N, S, E y O de acuerdo con las sugerencias de Goldsmith *et al.* (1990), para obtener así mediante la suma vectorial las tasas netas direccionales de transporte.

Las muestras tomadas en cada estación y periodo de estudio fueron tamizadas en seco, para obtener a continuación sus parámetros granulométricos. La densidad de los sedimentos era así mismo determinada mediante una técnica de diferencias de pesadas con picnómetros (Alcántara-Carrió, 1999).

Los parámetros obtenidos de los perfiles de viento para los intervalos de tiempo en que se midió el transporte de sedimentos, así como las tasas direccionales y los parámetros de tamaño medio de grano y densidad de las muestras son empleados para aplicar y calibrar los modelos teóricos de transporte.

**RESULTADOS**

Las trampas de sedimento tan sólo detectaron transporte en 7 de las 15 estaciones estudiadas (Est. 1, 2, 3 y 6 de febrero y Est. 1, 3 y 7 de agosto), entre las cuales es claramente inferior el detectado en la estación 6. Los datos de velocidad máxima registrados a 1 m de altura indican que no siempre el transporte se produjo en las estaciones con mayor velocidad del viento, lo cual denota que también influyen otros factores ambientales y sedimentológicos (vegetación, pendiente, contenido en humedad, disponibilidad de sedimentos, etc.).

Tabla 1  
Localización de las estaciones y posición del punto focal a partir de los perfiles de viento.  
 $U_t$  es la velocidad umbral de movimiento y  $z_0$  la rugosidad

	Posición		Febrero de 1998		Agosto de 1998	
	O(UTM)	N(UTM)	$U_t$ (m/s)	$z_0$ (m)	$U_t$ (m/s)	$z_0$ (m)
Estación 1	3113,68	570,06	3	0,01	5	0,02
Estación 2	3115,75	571,19	5,5	0,022	No hay transporte	
Estación 3	3115,59	574,30	1,2	0,045	1,5	0,015
Estación 4	3116,34	571,91	No hay transporte		No hay transporte	
Estación 5	3114,63	563,63	No hay transporte		No hay transporte	
Estación 6	6119,82	585,12	No determinado		No hay transporte	
Estación 7	3110,90	571,20	No hay transporte		1	0,13
Estación 8	3118,52	577,03	Sin datos		No hay transporte	

Tabla 2  
Principales expresiones de cuantificación del transporte eólico

AUTOR	EXPRESIÓN	NOTAS
Bagnold (1941)	$q = C \cdot (\rho_a / g) \cdot (d / D)^{1/2} \cdot U_1^3$ y para arenas típicas de dunas, considerando $d = 0,25$ mm; $C = 1,8$ y $(\rho_a / g) = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^2 / \text{cm}^4$ reduce esta ecuación a: $q = 1,5 \cdot 10^{-9} \cdot (U_1 - U_c)$	$q$ = flujo horizontal de sedimentos ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ). $C = 1,5; 1,8$ ó $2,8$ según el tipo de depósito. $g$ = aceleración de la gravedad ( $g \approx 981 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ ) $d$ = tamaño medio de grano en el depósito (mm) $D$ = tamaño de grano estándar ( $D = 0,25$ mm) $U_1$ = velocidad del viento a 1 m de altura
Kawamura (1951)	$q = K \cdot (\rho_a / g) \cdot (U_s + U_{c_c})^2 \cdot (U_s - U_{c_c})$ $\forall U_s > U_{c_c}$	$K$ = coeficiente empírico que varía entre 1 y 2,78 Si $U_s \leq U_{c_c}$ entonces $q = 0$
Zingg (1953)	$q = Z \cdot (\rho_a / g) \cdot (d / D)^{3/4} \cdot U_s^3$	$Z$ = coeficiente empírico ( $Z = 0,83$ )
Bagnold (1956)	$q = C \cdot (\rho_a / g) \cdot (d / D)^{1/2} \cdot (U_s - U_{c_c})^2 \cdot U_s$ $\forall U_s > U_{c_c}$	Si $U_s \leq U_{c_c}$ entonces $q = 0$
Williams (1964)	$q = a' \cdot (\rho_a / g) \cdot U_s^{b'}$	$a'$ y $b'$ = coeficientes empíricos que para arenas valen 0,17 y 3,42 respectivamente
Hsu (1973, 1977)	$q = H \cdot Fr^3 = H \cdot U_s^3 \cdot (g \cdot d)^{-3/2}$	$H$ = variable empírica $H = 10^{-4} \cdot \exp(-0,47 + 4,97 \cdot d)$ $Fr$ = número de Froude ( $Fr = U_s \cdot (g \cdot d)^{-1/2}$ )
Lettau y Lettau (1978)	$q = L (d/D)^{1/2} \cdot (\rho_a / g) \cdot U_s^2 \cdot (U_s - U_{c_c})$ $\forall U_s > U_{c_c}$	$L$ = coeficiente empírico ( $L = 4,2$ ) Si $U_s > U_{c_c}$ entonces $q = 0$

Tabla 3

Ajuste lineal entre los valores de transporte predichos (X) y las tasas reales de transporte medidas con las trampas de sedimento (Y)

	Estación 1		Estación 2	Estación 3		Estación 7
	Febrero	Agosto	Febrero	Febrero	Agosto	Agosto
Kawamura (1951)	$Y = 0,15 \cdot X$ $R^2 = 0,91$	$Y = 0,37 \cdot X$ $R^2 = 0,95$	$Y = 4,68 \cdot X$ $R^2 = 0,99$	$Y = 0,03 \cdot X$ $R^2 = 0,98$	$Y = 0,17 \cdot X$ $R^2 = 0,80$	$Y = 0,05 \cdot X$ $R^2 = 0,93$
Zingg (1952)	$Y = 1,81 \cdot X$ $R^2 = 0,96$	$Y = 2,70 \cdot X$ $R^2 = 0,99$	$Y = 24,60 \cdot X$ $R^2 = 1,00$	$Y = 2,28 \cdot X$ $R^2 = 0,99$	$Y = 3,26 \cdot X$ $R^2 = 0,91$	$Y = 1,17 \cdot X$ $R^2 = 0,92$
Bagnold (1956)	$Y = 0,90 \cdot X$ $R^2 = 0,96$	$Y = 1,44 \cdot X$ $R^2 = 0,99$	$Y = 12,76 \cdot X$ $R^2 = 1,00$	$Y = 1,04 \cdot X$ $R^2 = 1,00$	$Y = 1,56 \cdot X$ $R^2 = 0,92$	$Y = 0,60 \cdot X$ $R^2 = 0,92$
Williams (1964)	$Y = 0,49 \cdot X$ $R^2 = 0,90$	$Y = 1,46 \cdot X$ $R^2 = 0,98$	$Y = 21,49 \cdot X$ $R^2 = 1,00$	$Y = 0,02 \cdot X$ $R^2 = 0,70$	$Y = 0,64 \cdot X$ $R^2 = 0,74$	$Y = 0,08 \cdot X$ $R^2 = 0,73$
Hsu (1973, 1977)	$Y = 0,28 \cdot X$ $R^2 = 0,88$	$Y = 0,62 \cdot X$ $R^2 = 0,92$	$Y = 8,75 \cdot X$ $R^2 = 0,99$	$Y = 0,56 \cdot X$ $R^2 = 0,85$	$Y = 0,12 \cdot X$ $R^2 = 0,70$	$Y = 0,68 \cdot X$ $R^2 = 0,68$
Lettau y Lettau (1978)	$Y = 0,18 \cdot X$ $R^2 = 0,93$	$Y = 0,34 \cdot X$ $R^2 = 0,98$	$Y = 3,70 \cdot X$ $R^2 = 1,00$	$Y = 0,06 \cdot X$ $R^2 = 0,99$	$Y = 0,25 \cdot X$ $R^2 = 0,85$	$Y = 0,45 \cdot X$ $R^2 = 0,94$

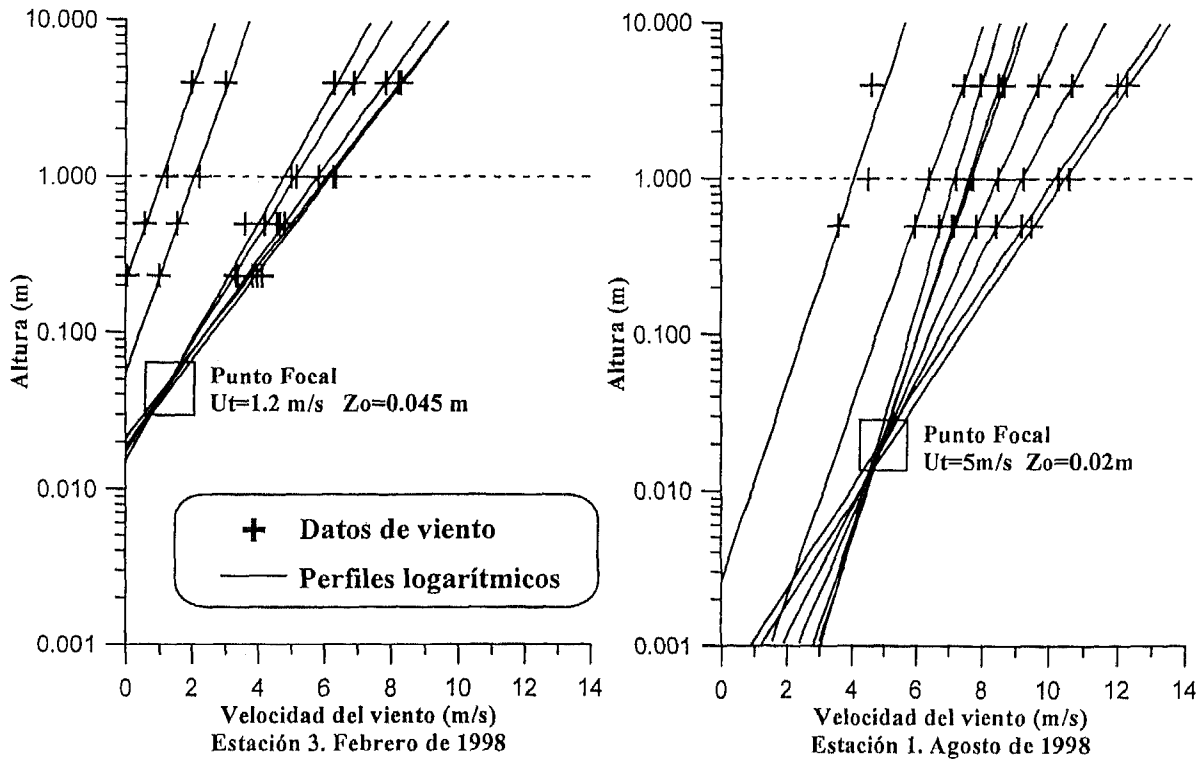


FIGURA 2.

Las tasas de transporte obtenidas empíricamente ( $q_{real}$ ) mediante las trampas de sedimentos tienen una relación exponencial con la velocidad del viento a 1 m de altura (Alcántara-Carió, 1999).

Los perfiles verticales de la velocidad del viento muestran en todos los casos un comportamiento logarítmico, si bien sólo es posible obtener las coordenadas del punto focal en aquellas estaciones y momentos en que se detecto transporte (Tabla 1 y Fig. 2). La posición del punto focal ( $U_f$ ;  $Z_0$ ) y los datos de velocidad del viento a 1 m de altura permiten determinar en cada estación una serie de velocidades de fricción y la velocidad de fricción umbral. Teniendo en cuenta que la velocidad de fricción umbral es aquella a partir de la cual se inicia el transporte, se ha tomado con el gradiente vertical de la velocidad cuando el transporte alcanza los 0.01 kg/m h. Los valores así obtenidos difieren de los valores teóricos predichos según Bagnold (1941), pero se emplean los datos empíricos por considerarse más próximos a la situación real.

Los parámetros del viento en cada estación, la densidad de los sedimentos superficiales y su tamaño medio de grano han sido empleados para aplicar diferentes modelos de predicción del transporte eólico: Kawamura (1951), Zingg (1952), Bagnold (1956), Williams (1964), Hsu (1973, 1977) y por último Lettau y Lettau (1978) (ver referencias en Sherman y Hotta, 1990). La tabla 2 muestra las expresiones de cada uno de estos modelos.

Los resultados de estos modelos han sido comparados mediante ajustes lineales ( $Y=a \cdot X$ ) y coeficientes de corre-

lación con las tasas netas empíricas, determinadas con las trampas de sedimento en las mismas condiciones (Tabla 3).

El modelo de Bagnold (1956) tiene en general el mejor ajuste con los datos empíricos, con los valores del coeficiente «a» de la ecuación más próximos a 1 y coeficientes de correlación también muy próximos a 1. Bagnold (1941) define el coeficiente C de su modelo en función de las características del medio, con un valor de 1.8 para el caso de arena típica de dunas, con tamaño de grano de arena media y bien seleccionada y 2.8 para arena del mismo tamaño pero mal seleccionada. Por tanto, se ha calculado cuales deben ser los valores de dicho coeficiente para obtener un ajuste aún mejor:

A excepción de la estación 2, los valores de C son muy semejantes a los propuestos por Bagnold (1941). No obstante, el número de valores obtenido es más amplio y C varía también para una misma estación entre ambas épocas del año. Estas variaciones son probablemente consecuencia de las diferencias entre la situación real y las condiciones ideales en que el autor define su ecuación: una superficie de arena uniforme de tamaño medio, totalmente seca, sin pendiente ni obstáculos topográficos, ausencia total de vegetación y contenido nulo en humedad de la superficie del depósito, viento velocidad constante y un perfil logarítmico en la vertical (Sherman y Hotta, 1990).

El comportamiento anómalo de la estación 2 se explica por la fuerte inclinación de la superficie topográfica en dicha estación (7°). Al aplicar el modelo de Hardisty y Whitehouse (1988) para el efecto de la pendiente se logra

un buen ajuste a los datos empíricos ( $q_{\text{real}} = 0.82 \cdot q_{\text{Hardisty-Whitehouse}}$  y  $R^2 = 0.96$ ).

Respecto al resto de modelos, el coeficiente «a» de la correlación indica que las ecuaciones de Hsu (1973, 1977), Lettau y Lettau (1978), Kawamura (1951), y Williams (1964) producen sobrestimación del transporte mientras que la ecuación de Zingg (1952) lo subestima.

Por otra parte, las ecuaciones de Kawamura (1951), Bagnold (1956) y Lettau y Lettau (1978), que incluyen como variable la velocidad de fricción umbral ( $U_{*c}$ ), muestran en general una mejor predicción del transporte en las situaciones próximas al umbral de movimiento, y por tanto se confirma la necesidad de emplear dicha variable en el análisis de la cuantificación del transporte.

En conclusión, aunque los modelos físicos han sido definidos en condiciones ideales, mediante su calibración con tasas empíricas obtenidas con trampas de sedimentos son válidos para predecir el transporte en casos reales. La ecuación de Bagnold (1956) en el caso de superficies con muy poca pendiente y el modelo de Hardisty y Whitehouse (1988) en el caso de superficies inclinadas son los que mejor se ajustan a los datos de transporte medidos.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto 1/95 de la Consejería de Educación y Cultura del Gobierno de Canarias.

#### REFERENCIAS

- Alcántara-Carrió, J. (1999): Dinámica sedimentaria eólica en el Istmo de Jandía. Modelización y cuantificación del transporte. Tesis Doctoral. Departamento de Física de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Servicio de Publicaciones del Cabildo de Gran Canaria (En Prensa).
- Bagnold, R.A. (1941): The physics of blown sand and desert dunes. Methuen, London, 265 p.
- Folk, R.L. y Ward, W.C. (1957): Brazos river bar. A study in the significance of grain size parameters. *J. Sed. Petrol.*, 27: 3-26.
- Goldsmith, V.; Rosen, P. y Gertner, Y. (1990): Eolian transport measurements, winds, and comparison with theoretical transport in Israeli coastal dunes. En: Coastal dunes. Form and Process. K.F. Nordstrom, N. Psuty y B. Carter (Eds.). John Wiley & Sons, England: 159-176.
- Hardisty, J. y Whitehouse, R.J.S. (1988): Evidence for a new sand transport process from experiments on Sahara dunes. *Nature*, 332: 532-534.
- Leatherman, S.P. (1978): A new aeolian sand trap design. *Sedimentology*, 25: 303-306.
- Sherman, D.J. y Hotta, S. (1990): Aeolian sediment transport: theory and measurements. En: Coastal Dunes, Form and Process. K.F. Nordstrom, N. Psuty y B. Carter (Eds.). John Wiley & Sons, England: 17-37.