

## *CALCULO DEL AVANCE DE LAS DUNAS LITORALES*

JUAN JOSE TAPANES\*

### RESUMEN

Basados en una fórmula desarrollada por Ertel para calcular el avance de las dunas desérticas transversales, presentamos una aplicación a las dunas litorales, así como el efecto introducido por las variaciones anuales en el rumbo, intensidad y persistencia de los vientos, y la influencia del contenido de agua (humedad) en las arenas de las dunas.

Es interesante hacer notar que la velocidad del viento, que prácticamente comienza a "mover" la duna, es similar a la que transforma la superficie del mar de hidrodinámicamente lisa en áspera ( $6,5 \text{ m seg}^{-1}$ , aproximadamente).

### ABSTRACT

An application to the litoral dunes using a formula developed by Ertel to compute the forward movement of the desertic transversal dunes, is presented. The effect introduced by annual variations in the direction, intensity and persistence of the winds and the influence of the water content (humidity) in the dunes sands is discussed.

It is interesting to point out that the velocity of the wind that "moves" the dune is similar to the one that transforms the surface of the sea from hydrodynamically smooth to rough (about  $6.5 \text{ m sec}^{-1}$ ).

\* *Centro de Investigaciones Pesqueras, La Habana.*

## INTRODUCCION

Debido a condiciones geofísicas diversas, alrededor de una quinta parte de la superficie terrestre está cubierta por zonas desérticas, y a su vez la quinta parte de estos desiertos están cubiertos de arena (Holmes, 1952). Algunos de los complicados factores que regulan la formación y desarrollo de estas acumulaciones de arena comprenden (Bagnold, 1941): a) naturaleza, extensión y porcentaje de la erosión de la formación geológica que los alimenta, b) tamaño de los granos de arena y fragmentos asociados, c) rumbo e intensidad del viento, d) grado de rugosidad o pulimentación de la superficie desértica, por ejemplo, presencia o no de guijarros.

Estas acumulaciones de arena, no obstante, no son privativas de las zonas citadas, ya que la mayoría de las áreas costeras también pueden presentar dichas formaciones. Según Holmes (*op. cit.*), podemos llamar *duna* a cualquier montículo o acumulación de arena —en un desierto o zona costera— con una cresta o cumbre bien definida. Aún así es de notar que este término es interpretado con frecuencia de forma diferente en la literatura geológica o geográfica (Gorshkov y Yakushova, 1970), ya que algunos investigadores llaman *dunas* a todas las formas de acumulación eólica de arena, bien se hallen situadas en el desierto o en el litoral, mientras que otros dan nombres muy específicos a las diferentes formas de acumulaciones en los primeros.

Basados en una fórmula desarrollada por Ertel (1965) para calcular el avance de las dunas desérticas transversales —sujetas a la acción constante de fuertes vientos y de altura considerable— aplicaremos esta teoría a las dunas litorales tropicales (sujetas a la acción de los vientos alisios, por ejemplo) de altura necesariamente menor, sujetas a vientos de amplia variabilidad, pero, sin embargo, de mayor movilidad que las desérticas, salvo cuando se introducen las características de la humedad que le son propias debido a su proximidad al mar.

## ACCION DEL VIENTO

En las regiones donde domina la deflación (desiertos), o un aporte constante de arena (zonas litorales), el viento arrastra las partículas

pulviformes y arenosas más finas transportándolas a grandes distancias y dejando sobre el terreno los materiales detríticos más gruesos.

Las partículas son transportadas de dos formas: a) suspendidas en el aire, b) rodando sobre el suelo, estando el tamaño de la partícula transportada, así como la distancia recorrida, determinadas, por la fuerza del viento. Cuando el viento sopla a una velocidad de  $6,5 \text{ m s}^{-1}$ , transporta polvo y arena fina con partículas de hasta  $0,25 \text{ mm}$  de diámetro. En este punto es interesante hacer notar la similitud que existe entre la velocidad del viento —que prácticamente comienza a “mover” la duna— con la de la intensidad del viento que transforma la superficie del mar, de hidrodinámicamente lisa, en áspera (Dietrich, 1957; Phillips, 1966; Panzarini, 1967).

Con velocidad de  $10 \text{ m s}^{-1}$ , el viento alza y transporta granos de arena de hasta  $1 \text{ mm}$  de diámetro; a  $20 \text{ m s}^{-1}$ , partículas de hasta  $4$  o  $5 \text{ mm}$ , mientras que los huracanes pueden arrebatarse hasta piedrecillas. No obstante, la distancia de transporte es muy variable, pudiendo llegar a ser de varios cientos, o aun miles, de kilómetros (Gorshkov y Yakushova, *op. cit.*). En la mayoría de los casos, la arena es, o bien arrastrada sobre la superficie, o bien se desplaza a saltos, esto es, elevándose a una cierta altura para volar horizontalmente, caer al suelo, volver a volar, y así sucesivamente.

La acción del viento se manifiesta no sólo en los desiertos, sino también en ciertas zonas de clima más húmedo. En éstos las condiciones necesarias para originar las formas topográficas arenosas son las siguientes: a) una reserva suficiente de arena no fijada, b) ausencia casi total de vegetación, c) fuertes vientos. Estas condiciones se hallan presentes, principalmente, en las angostas fajas litorales donde se observa un suministro abundante de arena acarreada sobre la playa por las olas.

## FORMACION Y DESARROLLO

Una duna ideal tiene una larga pendiente a barlovento que se eleva hasta formar una cresta, la cual presenta también una pendiente más pronunciada a sotavento (Figura 1). Esta última determinada por el

hecho de que la arena lanzada por el viento, por sobre la cresta, cae al abrigo de la misma, deslizándose después hasta su ángulo natural de reposo (para la arena *seca*) que es de unos  $30^\circ$  a  $35^\circ$ . Así, la duna va avanzando mediante la sustracción de arena de un lado y su adición en el otro, (Figura 2), detalle que trataremos posteriormente con todo rigor matemático.

En las primeras etapas de su desarrollo, las dunas ocupan una posición transversal con relación al sentido del viento, pero, a medida que avanzan tierra adentro, pueden orientarse en el sentido de éste. Los vientos originados en los litorales marinos, con sentido diurno predominante mar-tierra (vientos de brisa), arrebatan con facilidad la arena *seca* y la transportan tierra adentro. La vegetación y los accidentes aislados constituyen obstáculos que detienen la arena en movimiento, amontonándose ésta y formando pequeños cúmulos arenosos primarios (Figura 3). Al seguir creciendo, éstos se transforman, a su vez, en obstáculos que detienen y acumulan arena.

El peligro representado por las dunas reside en que una vez originada en la orilla, por ejemplo, si no es sujeta por la vegetación: hierba *marram*, pinos u otras plantas con un sistema de raíces horizontales bien desarrolladas (Lange, Ivanova y Lebedeva, 1966), no permanece estacionaria sino que se desplaza paulatinamente hacia el interior del continente o isla, debido a la acción del viento. A medida que una duna costera abandona la orilla del mar que le dio origen, surge otra en su lugar y una vez que ésta haya emigrado, empieza a formarse otra nueva, originándose así varias cadenas sucesivas.

### MOVIMIENTO DE LA DUNA

Todas las dunas transversales son capaces de migrar en cierto grado (dunas *vivas*), a menos que estén tan cubiertas de vegetación que el viento no tenga acceso a la arena (*dunas muertas*). En el caso de las primeras, el viento empuja continuamente la arena sobre la cresta hacia sotavento, de modo que éstas se mueven lentamente con el transcurso del tiempo ( $t$ ), viajando en la misma dirección ( $+x$ ) que el

viento. Toda la sección de la duna cambia, pues, por este proceso (Passarge, 1931; San Miguel de la Cámara, 1955; Pentchev, Popov y Kostova, 1964).

El perfil movedizo,  $H = H(x, t)$ , de la duna transversal puede ser de índole muy diversa. El caso más sencillo, del que nos ocuparemos aquí, puede expresarse por la ecuación (Ertel, 1965)

$$H = f(x - U \cdot t) \quad (1)$$

donde  $x$  espacio recorrido sobre el eje  $X$ ,

$U$  velocidad de traslación de la duna,

$t$  tiempo transcurrido,

que nos dice que el perfil  $H$  se mueve de forma invariable y a velocidad constante.

Exner (1951), estableció una fórmula para  $U$ , en la que interviene el flujo volumétrico  $V$  de la arena, o sea, la cantidad de  $m^3$  de arena que pasan por unidad de tiempo por unidad de trayecto de la cresta de la duna, esto es

$$U = \frac{V}{H_m} \quad (2)$$

donde  $V$  flujo volumétrico de la arena,

$H_m$  altitud de la arena sobre el plano del mar o desierto vecinos.

Podemos considerar que  $V$  tiene la dimensión de  $m^3 \text{ s}^{-1} \cdot m^{-1}$  o sea,  $V = m^2 \text{ s}^{-1}$ , pudiendo considerarse la ecuación (2) como la ecuación de continuidad de la arena, la cual constituye la condición cinemática del avance de las dunas con perfiles invariables (Bagnold, *op. cit.*; Exner, *op. cit.*; Scheidegger, 1961).

En su trabajo, Ertel (*op. cit.*) ofrece la representación de la velocidad  $U$  en función de dos magnitudes dinámicas: el esfuerzo tangencial del viento ( $T$ ), y la movilidad de la arena ( $M$ ). O sea

$$U = f(T, M)$$

donde  $T$  esfuerzo tangencial del viento (dinas  $\text{cm}^{-2}$ ),

$M$  movilidad de la arena, definida como la velocidad de la arena en la capa superficial bajo la acción de un campo de fuerzas de intensidad unidad, por unidad de volumen ( $10^{-1} \text{ cm s}^{-1}$  por dina  $\text{cm}^{-3}$ ), Moore (1953).

En este punto debemos introducir algunas hipótesis sobre la fuerza tangencial del viento aplicada a un elemento superficial (Exner, *op. cit.*) ya que la complejidad de los procesos físicos en la superficie de las dunas así lo requieren. La fuerza tangencial ( $F$ ), por unidad de superficie procede, en parte, del esfuerzo tangencial ( $T$  del viento y en parte, de la tracción ( $-R$ ) bajo la influencia de la componente tangencial de la gravedad ( $g_h$ ).

Respecto al esfuerzo tangencial podemos suponer, que, en el caso de arenas litorales o desérticas, éste puede calcularse por la misma fórmula empleada para el cálculo sobre zonas oceánicas (por ejemplo, Munk, 1947). Para el caso que nos ocupamos aquí, o sea, el de dunas litorales, podemos tomar valores similares a los dados por Hidaka (1958), o calcular nosotros estos esfuerzos tangenciales para velocidades del viento entre 1 y 10  $\text{m s}^{-1}$  (fuerzas 1 a 5 de la escala Beaufort, ver Bowditch, 1958), como presentamos en la Tabla 1.

El movimiento no se origina hasta que la fuerza ( $T - R$ ) alcance un cierto valor  $L$ , denominado fuerza de arrastre límite, y que según hemos visto, parece ser de  $L = 6,5 \text{ m s}^{-1}$ . Es decir que, para calcular el movimiento de la arena en la superficie de la duna, sólo hay que considerar la fuerza tangencial

$$F = T - R - L \quad (3)$$

por unidad de superficie (dina  $\text{cm}^{-2}$ , ver Tabla 1). Para una velocidad del viento de  $6,7 \text{ m s}^{-1}$ , por ejemplo, vale 14 dinas  $\text{cm}^{-2}$ .

Un aumento de esta fuerza tangencial en el sentido del viento, producirá (por transporte de material) un descenso en la altura ( $H$ ) de la duna, en el lugar correspondiente, por unidad de tiempo, dependiendo este efecto, además, de la movilidad de la arena. Podemos plantear, entonces

$$- \frac{\partial H}{\partial t} = M. \frac{\partial F}{\partial x} \quad (4)$$

o bien, según la ecuación (3)

$$- \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ M. (\tau - R) \right\} \quad (5)$$

si suponemos que tanto  $M$  como  $L$  son constantes.

Sabemos también que la forma  $H = H(x - U.t)$  del perfil movedido de la duna constituye una solución de la ecuación diferencial

$$\frac{\partial H}{\partial t} + U. \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

luego, según las ecuaciones (5) y (6) tendremos

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ U.H - M(\tau - R) \right\} = 0 \quad (7)$$

que integrando, nos quedará

$$U.H - M.(\tau - R) = \text{const} \quad (8)$$

tanto a lo largo del perfil de la duna ( $H > 0$ ), como dentro del mar vecino, el cual podemos considerar como un plano horizontal (Figura 4).

En cada instante, el perfil tiene un máximo ( $H_m$ ) que es la cresta de la duna. La tracción ( $-R$ ), que es nula dentro de la zona desértica (u oceánica) vecina ( $H = 0$ ), se anula también para ( $H = H_m$ ) en la berma de la cresta, por ser el ancho de la misma un infinitesimal. Si ahora, para ( $H = H_m$ ) tenemos  $\tau = \tau_m$ , y para ( $H = 0$ ) podemos escribir ( $\tau = \tau_o$ ), plantharemos finalmente que

$$U \cdot H_m - M (\tau_m - \tau_o) = 0 \quad -R = 0 \quad (9)$$

donde la diferencia ( $\tau_m - \tau_o = \Delta \tau$ ) significa la *amplificación* del esfuerzo tangencial del viento sobre la duna.

Según la ecuación (9), la velocidad de traslación de la duna será

$$U = M. \frac{(\tau_m - \tau_o)}{H_m} \quad (10)$$

pero, recordando que ( $\tau_m - \tau_o = \Delta \tau$ ), podemos escribir

$$U = M. \frac{\Delta \tau}{H_m} \quad (10')$$

Para el cálculo numérico consideraremos que la movilidad de la arena seca tiene un valor de  $10^{-1} \text{ cm s}^{-1}$  por dina  $\text{cm}^{-3}$ , cuando la amplificación del esfuerzo tangencial es de 1 dina  $\text{cm}^{-2}$  (Ertel, *op. cit.*). Sustituyendo en la ecuación (10') hemos construido la Tabla 2 que nos presenta el avance de la duna ( $U$  en  $\text{km año}^{-1}$ ) en función de la altura de la cresta ( $H_m$ ). Presentamos el avance según el por ciento de días al año que un viento sopla sobre la duna en sentido transversal. En el caso de que diferentes vientos estén ejerciendo su influencia durante una parte del año, el resultado final del movimiento será la composición vectorial de los desplazamientos anuales individuales, fácilmente calculables por la Tabla 2.

#### HUMEDAD DE LA ARENA

Sería interesante calcular la movilidad ( $M$ ) en función de la cantidad de agua (humedad) que contenga la arena. Es obvio que a mayor cantidad de agua en la mezcla arena-agua, menor será la movilidad, o sea, para una arena perfectamente húmeda, la movilidad necesariamente tendrá que ser nula, y para una arena completamente seca será máxima. Ahora bien, suponemos que la función que represente a  $M$  sea algo así como

$$M = ae^{kx} \quad (11)$$

y aunque aún no hemos hallado  $a$  ni  $k$ , una representación gráfica pudiera ser la presentada en la Figura 5.

TABLA 1

Esfuerzo tangencial del viento ( $\tau$ ) sobre la superficie del mar o desierto vecino, según las relaciones:

$\tau_1 = 0,008\rho W^2$  dinas  $\text{cm}^{-2}$ , para ( $W < 6,5 \text{ m s}^{-1}$ ) y  $\tau_2 = 0,026\rho W^2$  dinas  $\text{cm}^{-2}$ , para ( $W > 6,5 \text{ m s}^{-1}$ ), donde  $W$  se sustituye en  $\text{cm s}^{-1}$ . Hemos empleado un valor de  $\rho = 0,0012 \text{ g cm}^{-3}$ , y velocidades del viento entre 1 y  $10 \text{ m s}^{-1}$ .

$W$	Beaufort	$\tau$ (dina $\text{cm}^{-2}$ )
1	1	0,1
2		0,4
3	2	0,9
4		1,5
5	3	2,4
6		3,4
6,7		14,0
7	4	15,3
8		20,0
9	5	25,3
10		31,2

TABLA 2

Cálculo del avance de una duna ( $U$  en  $\text{km año}^{-1}$ ), en función de la altura de la cresta ( $H_m$  en metros). Se presenta también el avance según el por ciento de días al año que sopla el viento predominante. Por ejemplo, 15% significa que el viento sopla durante 55 días al año, aproximadamente, y en ellos una duna de 15 m de altura puede llegar a avanzar hasta  $0,3 \text{ km año}^{-1}$ , o sea, unos 300 m.

$U$

$H_m$	100	75	50	20	15	10	5	1
1	31,6	23,5	15,8	6,0	4,5	3,0	1,6	0,3
2	15,7	21,0	7,9	4,0	3,0	2,0	1,0	0,2
5	6,3	4,7	3,2	1,2	0,9	0,6	0,3	0,06
10	3,2	2,4	1,6	0,6	0,45	0,3	0,15	0,03
15	2,1	1,7	1,1	0,4	0,3	0,2	0,1	0,02
20	1,6	1,2	0,8	0,32	0,24	0,16	0,08	0,016
30	1,0	0,7	0,5	0,20	0,15	0,1	0,05	0,01
50	0,6	0,45	0,3	0,12	0,06	0,06	0,03	0,006

### CONCLUSIONES

Conociendo la altura sobre el nivel del mar, así como el rumbo, intensidad y persistencia del viento sobre una zona cubierta de dunas, es posible calcular el avance anual de las mismas, aun en el caso de rumbos e intensidades variables, pues la solución puede hallarse por la composición vectorial de los desplazamientos individuales.

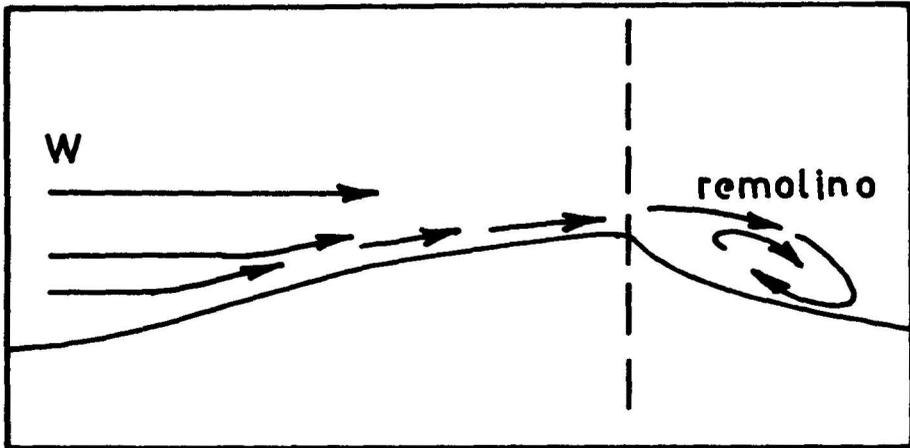


Figura 1. Estructura de una duna (según Holmes, 1952, ligeramente modificado).

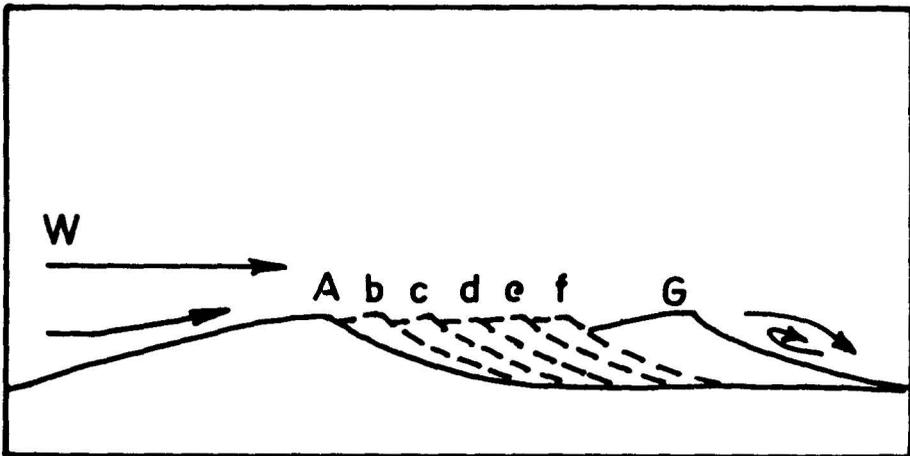


Figura 2. Crecimiento y migración de las dunas. Una duna estacionaria, A, crece avanzando su cresta hasta posiciones sucesivas b, c, d, e, f, y G, cuando el suministro de arena y la velocidad del viento son favorables (según Holmes, 1952).

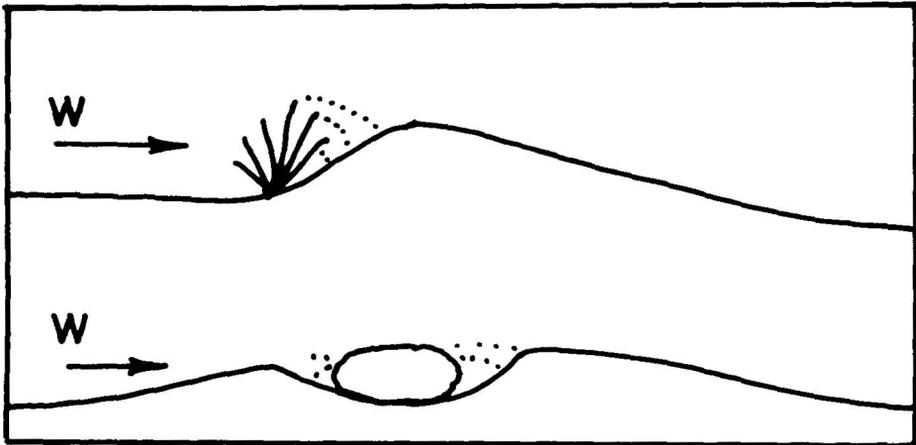


Figura 3. a) formación de un montículo junto a un arbusto, b) delante y detrás de una roca (según Lange *et al*, 1966).

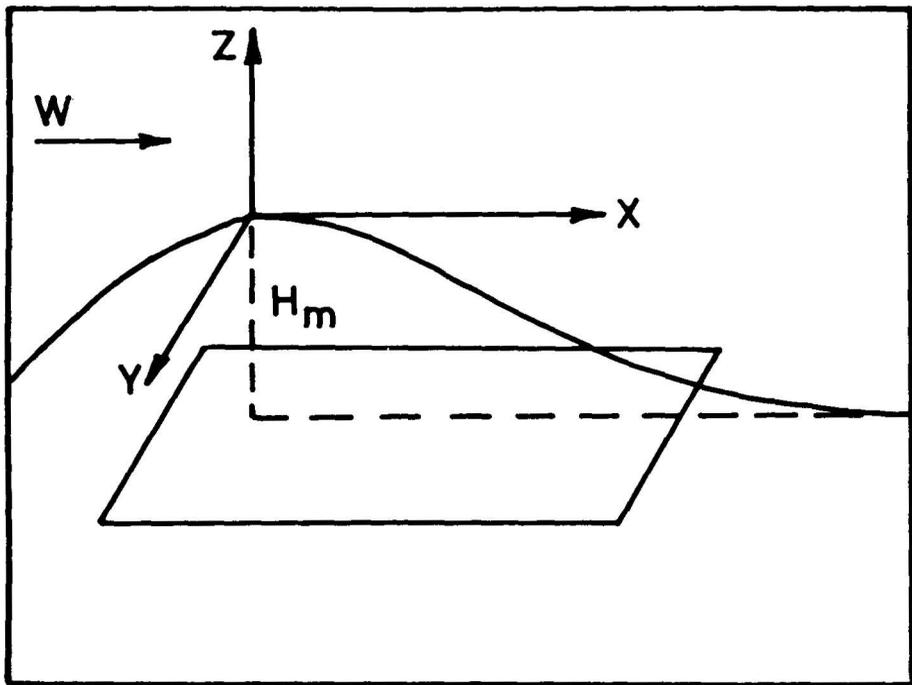


Figura 4. Sistema de coordenadas y plano de referencia.

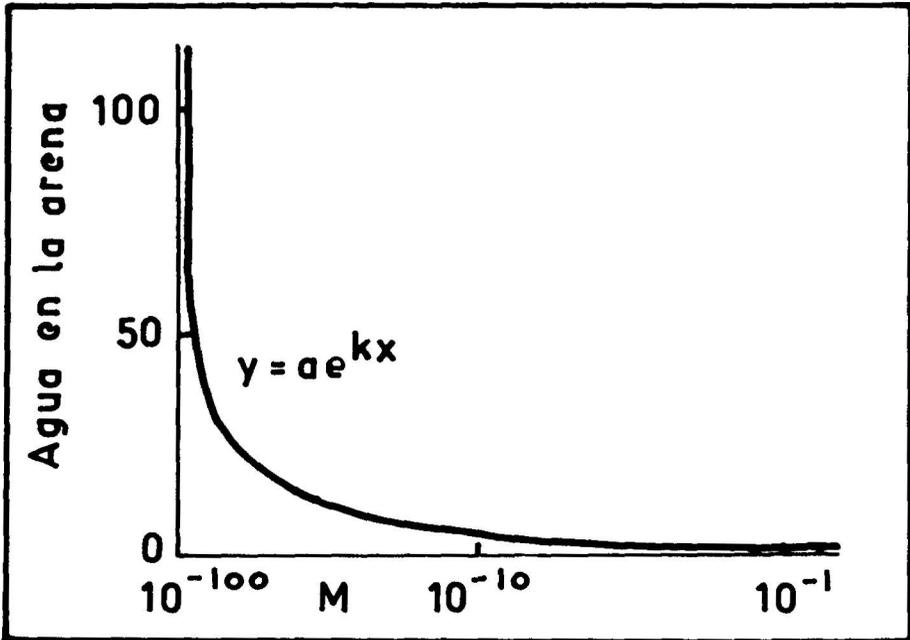


Figura 5. Movilidad de la arena en función del contenido de agua (humedad) de la misma.

## BIBLIOGRAFIA

- BAGNOLD, R. A., 1941. *The Physics of Blown Sands and Desert Dunes*. Methuen, Londres.
- BOWDITCH, N., 1958. *American Practical Navigator*. H. O. Pub. 9, (USA); 1524 pp.
- DIETRICH, G., 1957. *General Oceanography*. Wiley, 588 pp.
- ERTEL, H., 1965. Sobre el avance de las dunas. *Rev. Geofísica*, 96: 331-334.
- EXNER, F. M., 1951. Zur Dynamik des Bewegungformen auf der Erdoberfläche. *Ergebn. Kosm. Physik*, Band I; 403.
- GORSHKOV, G. y A. YAKUSHOVA, 1970. *Geología General*. Mir. Moscú, 624 pp.
- HIDAKA, K., 1958. Computation of wind stresses over the oceans. *Rec. Ocean. Wks. Japan*, 4(2): 77-123.
- HOLMES, A., 1952. *Geología Física*. Omega (Barcelona); 512 pp.
- LANGE, O., M. IVANOVA y N. LEBEDEVA, 1968. *Geología General*. Edit. Pedagógica, La Habana, 370 pp.
- MOORE, W. J., 1953. *Química Física*. Barcelona, 391 pp.
- MUNK, W. H., 1947. A critical wind speed for air-sea boundary processes. *J. mar. Res.*, (6): 203-218.
- PANZARINI, R., 1967. *Compendio de Oceanografía Física*. Inst. Publ Navales, B. Aires, 350 pp.
- PASSARGE, S., 1931. *Geomorfología*. Barcelona; 107-110.
- PENTCHEV, P., V. L. POPOV y B. KOSTOVA, 1964. *Geología Física General*. Ins. Libro, La Habana, 195-1957.
- PHILLIPS, O. M., 1966. *The Dynamics of the Upper Ocean*. Cambridge Univ. Press; 261 pp.
- SAN MIGUEL DE LA CAMARA, M., 1955. *Manual de Geología*. Barcelona; 93-100.
- SCHEIDEGGER, A. E., 1961. *Theoretical Geomorphology*. Berlin/Göttingen/Heidelberg; 299 pp.