

CÁLCULO DEL MOVIMIENTO DE ARENA EN ZONAS COSTERAS DEBIDO AL VIENTO.

Mendoza Grande Manuel, Ramírez Xicotencatl Rodolfo, Noe Toledano Vega
mmendoza@imt.mx, rramirez@imt.mx, ntodelano@imt.mx

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de nuestro conocimiento actual sobre la capacidad del viento para erosionar y transportar la arena data de los años 20s a los 40s con los trabajos del investigador Rafael Bagnold en los desiertos del Norte de África. En sus numerosas observaciones y experimentos relacionados con el movimiento de arena, Bagnold descubrió muchos de los principios claves que controlaban el transporte de la arena en los desiertos.

En las zonas coteras, el transporte de la arena debido al viento es un mecanismo importante que contribuye al cambio en la morfología de la playa, este cambio se debe tomar en cuenta en las playas donde exista infraestructura importante, como son: portuaria, habitacional, turística, etc.

La velocidad del viento, su gradiente vertical cerca de la tierra y las características de los sedimentos (tamaño, distribución de tamaño, etc) son factores importantes en la determinación de cuánto sedimento será transportado a fin de establecer los patrones eventuales de la erosión y de la deposición de la arena.

ESTADO DEL ARTE

El viento transporta la arena de tres maneras, por suspensión, saltación, y rodamiento (ver figura 1), según sea el tamaño del material y la velocidad del viento. El movimiento conocido como rodamiento, se identifica como el primer movimiento de las partículas. En vientos fuertes, las partículas tan grandes como los pequeños guijarros pueden moverse a través del rodamiento. Alrededor del 20 al 25 por ciento de erosión debida al viento está dado por el rodamiento. El segundo tipo de transporte de sedimento debido al viento implica a las partículas que son quitadas de la tierra y son suspendidas por el aire, y después vuelven a la superficie de tierra varios centímetros en dirección al viento; este tipo de transporte se llama saltación, y este proceso explica el transporte de sedimento en 75 a 80 % en ambientes donde la tierra está seca. Finalmente, cuando las partículas son movidas por saltación y existen vientos fuertes, estas partículas son llevadas a cientos de metros en su otro proceso conocido como suspensión.

Para que se produzca deposito basta que el viento disminuya su velocidad hasta que las partículas o granos de los sedimentos no puedan mantenerse en el aire. Esta disminución de la velocidad puede deberse a los obstáculos que existen en el suelo como árboles, edificios, altos topográficos naturales, etc., o también el hecho de haber cesado las causas que provocan el movimiento de aire.

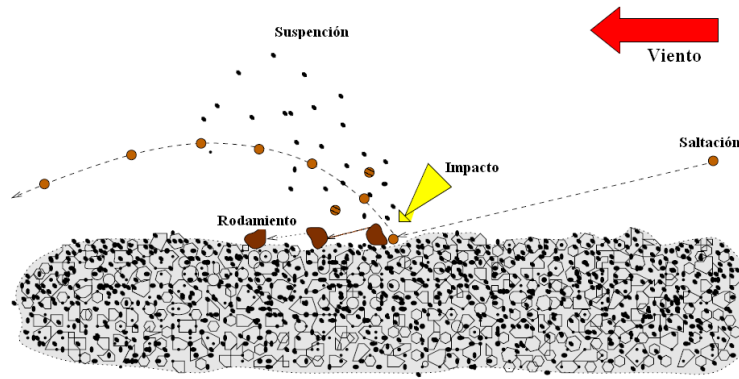


Figura 1. Esquema de las diferentes maneras de transportación de la arena debido al viento.

Los tipos de movimiento suspensión, saltación y rodamiento debidas al viento fueron descritas y definidas por Bagnold (1936, 1954) en un estudio de laboratorio utilizando un túnel de viento. Su trabajo fue el punto inicial para los estudios cuantitativos para los procesos físicos del transporte eólico.

El proceso de saltación es el más importante para el movimiento de la arena por el viento. El mayor volumen de arena que viaja se mueve por saltación. Las fórmulas derivadas por los investigadores Rafael Bagnold y Kawamura, para el transporte debida al viento, están basadas en el movimiento de arena por saltación.

La velocidad del viento es parte fundamental para mover los granos de arena por saltación. Existe una determinada velocidad, que dependiendo del tamaño del grano de arena lo moverá, a esta velocidad se le conoce como velocidad cortante.

Antes de que la arena sea transportada por el viento, el límite del esfuerzo cortante debe aumentar sobre un cierto valor crítico o de umbral. En todos los estudios el umbral de la velocidad cortante (u_{*t}), está dado por la siguiente ecuación:

$$u_{*t} = A_t \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d} \quad \text{ec. 1}$$

donde ρ_a es la densidad del aire, ρ_s es la densidad de los granos de arena, g es la aceleración debido a la gravedad, d es el diámetro del grano de arena y A_t es un coeficiente empírico que toma un valor constante de 0.1118. Para propósitos de este trabajo el valor de la densidad de aire será de 1.184 kg/m³ a una temperatura de 25° C.

En el aspecto ingenieril, lo más importante es poder estimar el volumen total de la arena en un cierto período. Existen varias fórmulas para predecir la estimación del transporte eólico que se han obtenido teórica o experimentalmente. Las fórmulas para la estimación del transporte eólico que se han encontrado y consideradas desde el punto de vista ingenieril son las ecuaciones por los investigadores: O'Brien y Rindlaub (1936), Bagnold (1941), Chepil (1954), Kawamura (1951), Zingg (1953), Hsu (1974), Nacashima (1979) y Horikawa (1984).

Chapman en 1990, realizó una evaluación de éstas de las ecuaciones para el cálculo del transporte eólico. Los resultados que encontró se muestran en la tabla 1, en donde se observa que el rango de los valores varía entre $r^2 = 0.63$ a $r^2 = 0.87$.

Tabla 1 Coeficientes para varias ecuaciones del transporte de la arena

Ecuación	Valor de r^2
Bagnold	0.63
Horikawa y Shen	0.84
Hsu	0.87
Kadib	0.65
O'Brien y Rindlaub	0.80
Williams	0.80
Zingg	0.78

Como se puede observar en la tabla 1, el valor con mayor coeficiente es la ecuación de Hsu, con un $r^2 = 0.87$, y su ecuación es:

$$q = K \left[\frac{u_*}{\sqrt{gd}} \right]^3 \quad \text{ec. 2}$$

El término que se muestra en los corchetes es el número adimensional de Froude. Los valores de K que están en función del diámetro de grano de la arena y se obtiene de la figura 2.

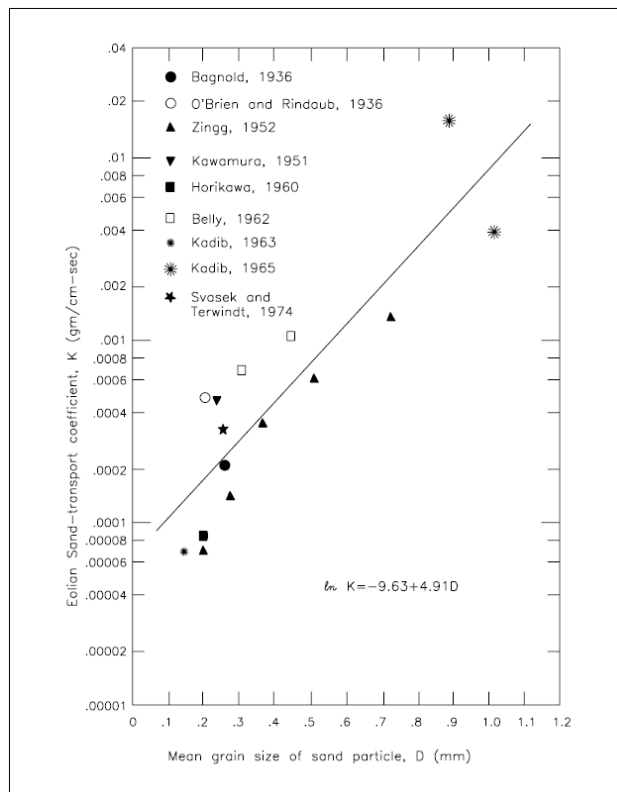


Figura 2 Gráfica para determinar el coeficiente K en función del diámetro medio de la arena.

Una de las formas para determinar el movimiento de los sedimentos por el viento es por medio de trampas verticales, las cuales son diseñadas para atrapar la arena que es movida por saltación y suspensión. dichas trampas tienen sus ventajas, como son: fácil instalación y de recuperación de la arena captada ya que tiene tapas removibles.

De entre los diferentes tipos de trampas verticales de arena, destaca la diseñada por Horikawa, la cual es una de las trampas de fácil instalación y de construcción, consta de 13 niveles a diferentes distancias unas con otras, su abertura para que ingrese la arena es de 1 cm (ver figura 3).

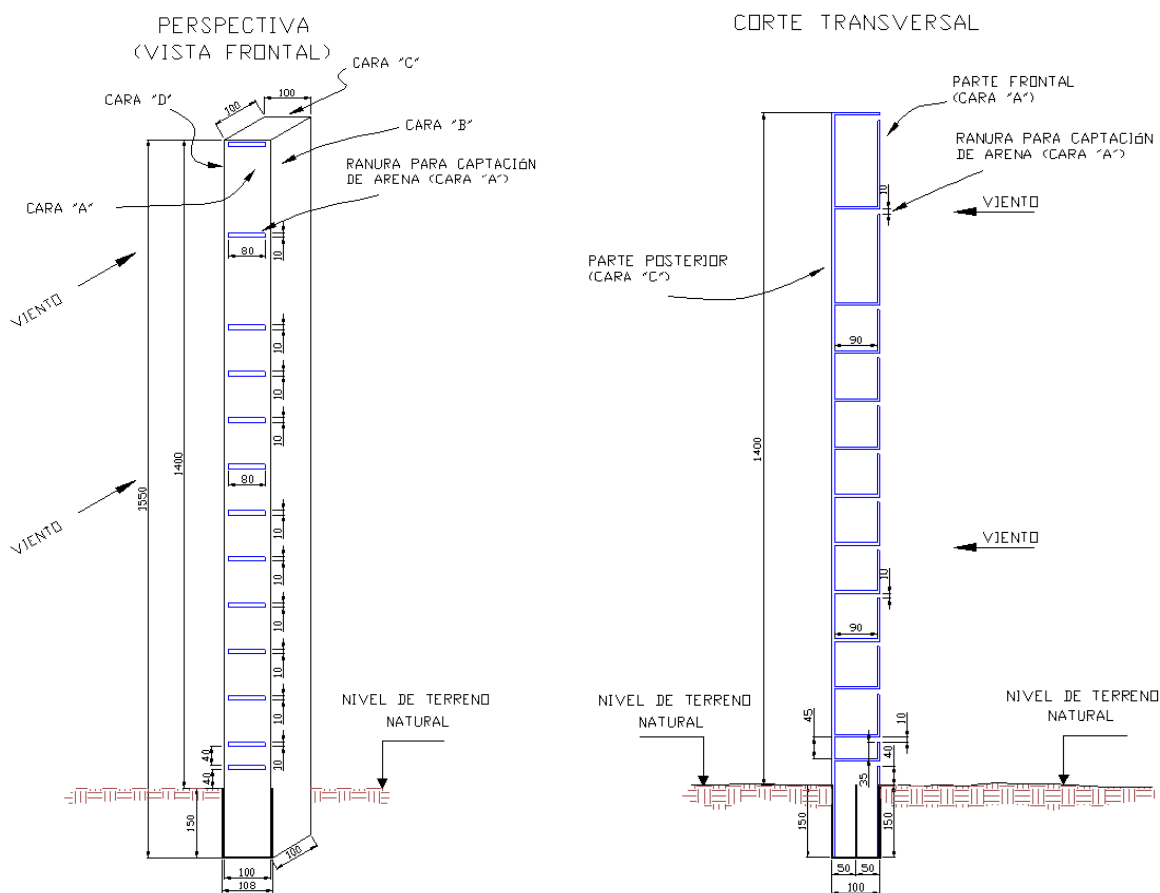


Figura 3 Vista de la de la trampa de arena en perspectiva y corte transversal.

DETERMINACIÓN DEL TRANSPORTE EÓLICO DE SEDIMENTOS

Para determinar el transporte eólico de debe considerar la siguiente metodología, la cual se muestra a continuación:

- A. Construir trampas de arena con las características que se presentan en la figura 3 o alguna otra similar sugerida en la literatura correspondiente

- B. Determinar las características de la arena, como son: la densidad y el diámetro medio.
- C. Conocer las características del viento (velocidad y la dirección), mediante la instalación de sensores o a través de los registros de estaciones climatológicas cercana a la zona de estudio
- D. Calcular el esfuerzo cortante crítico, en términos de la velocidad cortante, expresado por el investigador Rafael Bagnold (1941), mediante la siguiente ecuación.

$$u_{*t} = A_t \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)gd}{\rho_a}} \quad \text{ec. 3}$$

Donde:

- ρ_s La densidad de la arena (gr/cm³)
- ρ_a La densidad del aire (1.184X10⁻³ gr/cm³)
- A_t Coeficiente adimensional (0.118).
- g Aceleración de la gravedad (cm/s²)
- d Diámetro medio de la arena (cm)

- E. Determinar la velocidad crítica (u^*), en términos de la velocidad de viento a 2 metros de altura (U_{2m}), dicha relación está dada por:

$$u_* = 0.044U_{2m} \quad \text{ec. 4}$$

Donde:

- u^* Velocidad crítica
- U_{2m} Velocidad del viento a 2 m de altura.
- 0.044 Es un coeficiente para la condición de playa

- F. Dependiendo de la altura que se encuentra la medición del viento, las velocidades críticas del viento para cada una de las secciones consideradas deberán transformarse a dicha altura, mediante la siguiente ecuación, donde u^* es considerada igual a u_{*t} , debido a que la velocidad cortante es independiente de la altura:

$$u_* = \frac{\kappa(U_{Z2} - U_{Z1})}{\ln(Z_2/Z_1)} \quad \text{ec. 5}$$

Donde:

κ Constante de Karman ($\kappa = 0.4$)

U_{Z2} Velocidad del viento a Z₂

U_{Z1} Velocidad del viento a Z₁

Z₂ Altura Z₂ (m)

Z₁ Altura Z₁ (m)

- G. Definir la dirección de los vientos que actúan, y las cuales aportan la mayor cantidad del movimiento de arena, estas son generalmente las que soplan del mar a la costa.
- H. Calcular el transporte eólico mediante la ecuación del investigador S. A. Hsu, mediante la siguiente ecuación:

$$q = K \left(\frac{u_*}{\sqrt{gd}} \right)^3 \quad \text{ec. 6}$$

Donde:

q Transporte de arena en gr/cm-s

u_* Velocidad crítica (cm/s)

g Aceleración de la gravedad (cm/s²)

d Diámetro medio (cm)

K Coeficiente eólico del transporte de arena (gr/cm-s), expresado como

$\ln K = -9.63 + 4.91d$ d está en milímetros.

- I. Determinar el transporte de arena volumétrico, este se define mediante la siguiente ecuación.

$$q_v = \frac{q}{\rho_s(1-p)} \quad \text{ec. 7}$$

Donde:

q_v Transporte eólico expresado en volumen (cm³/cm-s)

q Transporte eólico expresado en peso (gr/cm-s)

p Porosidad de la arena (0.4)

ρ_s Densidad de la arena (gr/cm³)

- J. Finalmente, una vez calculado el transporte eólico anual por dirección e intensidad del viento para cada una de las zonas, se calcula el transporte eólico que se produce en la dirección perpendicular a la costa, tal y como se muestra en la figura 4, mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{vn} = \sum (q_{vi} \cos \alpha_i) \quad \text{ec. 8}$$

Donde:

Q_{vn} Transporte eólico anual total en volumen según la normal a la costa.

q_{vi} Transporte eólico anual total en volumen con respecto a la dirección i.

α_i Ángulo que forma el norte geográfico con la dirección i.

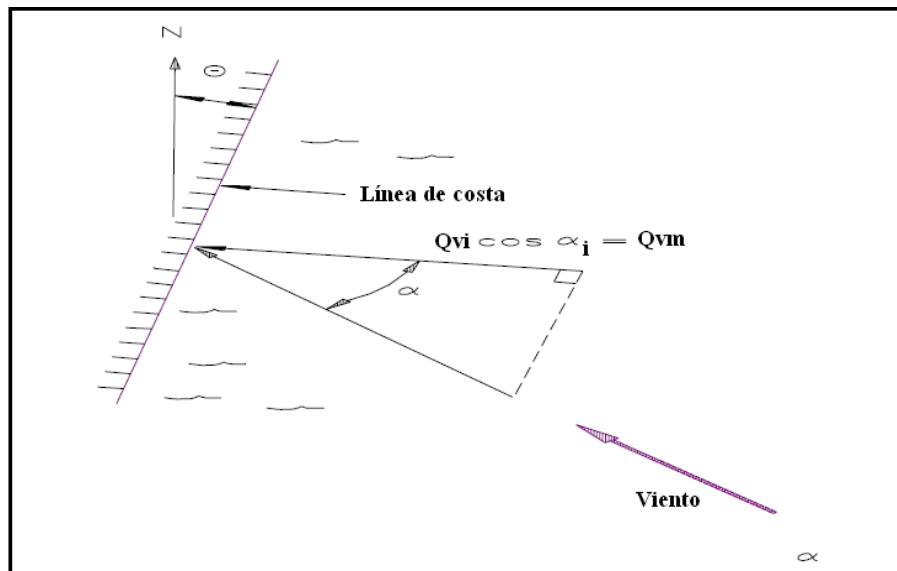


Figura 4 Transporte neto, tomando en cuenta la dirección del viento.

EJEMPLO DE ANALISIS EN LAS PLAYAS DEL PUERTO DE COATZACOALCOS

En el Poniente del puerto de Coatzacoalcos, Ver., el viento que actúa en la zona genera problemas debido al movimiento de la arena, el cual provoca acumulación de esta en las vialidades cercanas al malecón costero.

Para conocer la cantidad de arena que se mueve, se consideró ubicar tres puntos de análisis: el punto 1 se localiza en la playa Poniente a 6,000 m de la escollera Oeste al frente de la calle Matamoros; el punto 2 se localiza en la playa Poniente a 4,000 m de la escollera Oeste al frente de la avenida Platón; y el punto 3 se localiza en la playa Poniente a 2,000 m de la escollera Oeste al frente de la avenida de las Palmas, los cuales se muestran en la figura 5.

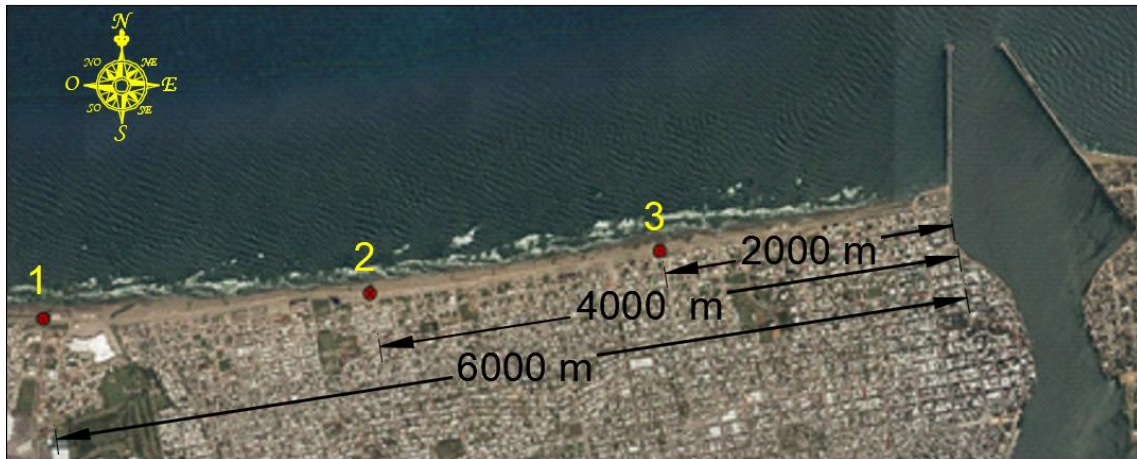


Figura 5 ubicación de los puntos de medición

Para la medición del transporte eólico se fabricaron 3 trampas de arena (las dimensiones de las trampas se describieron en la figura 3). Se colocaron las trampas en 3 puntos donde la arena ha provocado problemas, como es en el Boulevard que se encuentra sobre la zona costera, y la cual ha producido una acumulación de arena debido al viento (ver figura 6).



Figura 6 Colocación de las trampas de arena.

Como parte elemental para la determinación del transporte eólico, fue necesario conocer las características de la arena, como es el diámetro medio, en cada una de las zonas: punto 1, punto 2 y punto 3. El resultado de los diámetros y densidad se muestra a continuación:

1. Punto 1, diámetro medio de 0.119 mm.
2. Punto 2, diámetro medio de 0.109 mm.
3. Punto 3, diámetro medio de 0.120 mm.

El valor de la densidad de la arena es de 2.65 (ton/m³).

Con objeto de definir las características del viento de la zona de estudio, se recopiló información de las velocidades y direcciones de dicho fenómeno, registradas por el área de Meteorología Aeronáutica del SENEAM de la SCT, la estación climatológica se encuentra en el aeropuerto de Minatitlán. El equipo para medir las condiciones del viento se encuentra a una altura de 39 m.

Tomando en cuenta la información de viento, se procesaron para determinar las características del viento en su régimen anual, y los resultados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2 tiempos de acción por cada dirección contra velocidad.

DIRECCIÓN	VELOCIDADES (m/s)											Días de acción	% de ocurrencias
	<5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	>15		
N	20.53	49.70	12.27	11.62	1.73	0.78	10.31		0.29	0.03	0.49	107.76	29.52%
NNE	13.51	24.87	3.00	1.66	0.20	0.13	0.91					44.29	12.13%
NE	1.66	1.14	0.16	0.23	0.03							3.23	0.89%
NEE	4.11	3.88	0.46	0.13								8.58	2.35%
E	1.93	1.83										3.75	1.03%
SEE	3.59	3.56	0.07	0.07			0.03					7.31	2.00%
SE	0.72	0.29										1.01	0.28%
SSE	3.79	2.06	0.07				0.03					5.94	1.63%
S	9.40	6.17	0.82	1.34	0.10	0.07	1.21				0.03	19.12	5.24%
SSW	7.38	3.52	1.50	0.91	0.16	0.10	0.42				0.03	14.03	3.84%
SW	2.19	1.01	0.36	0.33	0.03	0.03						3.95	1.08%
SWW	18.86	12.47	0.55	0.20			0.42				0.03	32.54	8.91%
W	8.58	2.51	0.07									11.16	3.06%
NWW	5.55	2.58	0.16	0.10		0.07						8.45	2.32%
NW	1.57	0.55	0.16	0.13		0.03	0.10					2.55	0.70%
NNW	8.52	12.83	3.13	5.48	0.46	0.39	7.96	0.10	0.62	0.03	1.08	40.60	11.12%
CALMAS	50.72											50.72	13.89%
Días de acción	162.59	128.98	22.78	22.19	2.71	1.60	21.41	0.10	0.91	0.07	1.66	365.00	100.00%
% de ocurrencias	44.55%	35.34%	6.24%	6.08%	0.74%	0.44%	5.87%	0.03%	0.25%	0.02%	0.46%	100.00%	

Con la tabla 2, se pueden definir las siguientes características del viento en el régimen anual:

- La dirección más frecuente es la Norte con el 29.52%, seguida de la dirección NNE con el 12.13% y NNW con el 11.12%.
- La velocidad del viento más frecuente se encuentra comprendida en el rango de 5 a 6 m/s con un 35.34% equivalente a 128.98 días del año.
- La velocidad máxima del viento registrada fue superior a los 15 m/s para las direcciones NNW y Norte.
- Como se puede observar el 92 % de los vientos son menores de 8 m/s.
- El 53 % de ocurrencia se presentan en las direcciones N, NNE y NNW.

Se calcula el transporte eólico anual, tomando en cuenta las direcciones que inciden y los tiempos de acción de cada que se producen por cada división de la velocidad

definida a 10 m., para cada una de las zonas de estudio (punto 1, punto 2 y punto 3). Los resultados de presentan en las tablas 3, 4 y 5.

Tabla 3 transporte eólico volumétrico para el punto 1.

U _{10L} (m/s)	q (gr/cm-s)	q _v (cm ³ /cm-s)	Q _v (m ³ /m-año)															
			N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
5.7	0.0286	0.0180	1.91	0.47	0.03	0.08		0.02		0.02	0.12	0.23	0.06	0.09	0.02	0.03	0.03	0.48
6.6	0.0444	0.0280	2.80	0.41	0.05	0.02		0.02			0.31	0.22	0.07	0.05		0.02	0.02	1.33
7.5	0.0652	0.0410	0.60	0.07	0.01						0.04	0.07	0.01					0.18
8.2	0.0852	0.0536	0.37	0.05							0.05	0.05	0.01			0.05	0.01	0.19
9.1	0.1165	0.0733	6.52	0.57				0.02		0.02	0.76	0.25		0.25			0.06	5.06
10.0	0.1546	0.0972																0.08
11.4	0.2290	0.1440	0.37															0.75
12.1	0.2739	0.1722	0.04															0.04
13.7	0.3975	0.2500	0.99								0.06	0.06		0.06				2.05
16.0	0.6332	0.3982																0.10
18.3	0.9474	0.5959																0.51

Tabla 4 transporte eólico volumétrico para el punto 2.

U _{10L} (m/s)	q (gr/cm-s)	q _v (cm ³ /cm-s)	Q _v (m ³ /m-año)															
			N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
4.8	0.0186	0.0117	5.01	2.51	0.11	0.39	0.18	0.36	0.03	0.21	0.63	0.35	0.10	1.26	0.25	0.26	0.06	1.29
5.7	0.0311	0.0196	2.08	0.51	0.03	0.08		0.02		0.02	0.14	0.25	0.07	0.10	0.02	0.03	0.03	0.52
6.6	0.0483	0.0304	3.04	0.45	0.05	0.03		0.03			0.34	0.24	0.08	0.05		0.03	0.03	1.44
7.5	0.0708	0.0445	0.65	0.08	0.01						0.04	0.08	0.01					0.19
8.2	0.0926	0.0582	0.40	0.05							0.05	0.05	0.02			0.05	0.02	0.20
9.1	0.1265	0.0796	7.08	0.62				0.02		0.02	0.83	0.28		0.28			0.07	5.50
10.0	0.1679	0.1056																0.09
11.4	0.2488	0.1564	0.41															0.81
12.1	0.2974	0.1871	0.05															0.05
13.7	0.4317	0.2715	1.08								0.07	0.07		0.07				2.23
16.0	0.6877	0.4325																0.11
18.3	1.0290	0.6472																0.56

Tabla 5 transporte eólico volumétrico para el punto 3.

U _{10L} (m/s)	q (gr/cm-s)	q _v (cm ³ /cm-s)	Q _v (m ³ /m-año)															
			N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
5.7	0.0284	0.0179	1.90	0.46	0.03	0.08		0.02		0.02	0.12	0.23	0.06	0.09	0.02	0.03	0.03	0.48
6.6	0.0441	0.0277	2.78	0.41	0.05	0.02		0.02			0.31	0.22	0.07	0.05		0.02	0.02	1.32
7.5	0.0647	0.0407	0.60	0.07	0.01						0.04	0.07	0.01					0.18
8.2	0.0846	0.0532	0.37	0.05							0.05	0.05	0.01			0.05	0.01	0.18
9.1	0.1156	0.0727	6.47	0.57				0.02		0.02	0.75	0.25		0.25			0.06	5.03
10.0	0.1534	0.0965																0.08
11.4	0.2273	0.1430	0.37															0.74
12.1	0.2718	0.1709	0.04															0.04
13.7	0.3945	0.2481	0.99								0.06	0.06		0.06				2.04
16.0	0.6284	0.3952																0.10
18.3	0.9402	0.5913																0.51

Finalmente, después de haber calculado el transporte eólico volumétrico anual por dirección y velocidad del viento para cada una de las zonas de estudio, se calcula el transporte eólico neto que se produce con respecto a la dirección perpendicular a la costa, mediante la ecuación (8).

Así mismo, fue necesario definir el ángulo que se tiene con respecto a la línea perpendicular a la playa hacia las diferentes direcciones. Los resultados del transporte eólico neto para las diferentes zonas de estudio se indican en la tabla 6.

Tabla 6 Resultados del transporte eólico neto

Punto	d(mm)	$Q_{vm}(m^3/m\text{-año})$
1	0.119	23.17
2	0.109	31.62
3	0.120	23.00

CONCLUSIONES

Como se puede observar el mayor transporte eólico neto anual en el punto 2 es de 31.62 m³/m-año, debido a que en esta zona el diámetro medio de la arena es menor con respecto a la arena que se encuentra en los otros puntos de análisis y, por lo tanto, en este punto es donde se acumula mayor volumen de arena.

Se debe identificar el problema del transporte eólico a lo largo de la zona costeras, así para poder definir en donde colocar las trampas arena, y con ello capturar la arena que se obtiene por saltación y/o suspensión. Los datos iniciales como son el diámetro medio, la densidad de la arena y las características del viento (velocidad y dirección), son esenciales para tener resultados confiables del transporte eólico, por lo que su análisis deberá ser detallado.

La metodología que se desarrolló se podrá aplicar en otras zonas costeras donde se ha detectado la importancia del transporte eólico, como es la zona de las costas de Veracruz., siendo ésta susceptible al transporte eólico, por lo que es necesario llevar a cabo estudios de transporte eólico que permita conocer con mayor claridad el movimiento de la arena en dicha zona.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Clayton, J. (2005) An Aeolian transport model for the selection of dune restoration alternatives, United States.

Craig, F. (1976) Mecánica de Suelos. México.

Chapapría, V. (1996) Modelación de los depósitos eólicos y marinos de la sierra Gelada. Universidad Politécnica de Valencia.

Coastal Engineering Manual (2003) Part III Coastal Sediment Processes, Chapter 4 Wind-Blow Sediment Transport, US Army Corps of Engineers.

Dezso, G. (2006) On assessment of wind comfort by sand erosion. Eindhoven.

Horikawa, K. (1982) Nearshore Dynamics and Coastal Processes theory, measurement, and predictive models. United States.

Jáuregui, E. (2003) Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera, Investigaciones geográficas. Instituto de Ingeniería.

Jia, Q. Huang, Y. (2008) Coarse dust around mining areas, A study of available dust collectors and theirs efficiency. Master´s thesis.

Lyles, L. (1988) Basic wind erosion processes, Agriculture Ecosystem and environment. United States.

Sleath, J. (2000) Sea bed mechanics, Wiley Ocean Engineering Series. United States.

Terzaghi, K. (1968) Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica. México.

Tavares, C. (2002) Eficiencia de la Ammophila Arenaria en Atrapar Sedimentos Transportados por el Viento. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.