

Arena y viento: un bosquejo para el estudio de la acción eólica sobre las infraestructuras, con referencia al ferrocarril de alta velocidad Haramain, La Meca-Medina

Sand and Wind: an outline of the study of aeolian action on infrastructure with reference to Haramain High Speed Railway, Makkah–Al-Madinah

Juan Sesma Plaza. Geólogo.

Departamento de Geología. INECO. Madrid (España). juan.sesma@ineco.es

Manuel Lombardero Barceló. Geólogo.

Departamento de Geología. INECO. Madrid (España). manuel.lombardero@ineco.es

Patricia Rodríguez de Lema Tapetado. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Departamento de Geotecnia y Túneles. INECO. Madrid (España). patricia.tapetado@ineco.es

Resumen: El incremento de la obra civil sobre territorios adversos, está necesitando cada vez más del estudio de aspectos poco habituales, algunos de ellos derivados de la construcción sobre terrenos anteriormente considerados no construibles y otros derivados de climas extremos, como es el caso del ferrocarril de alta velocidad en construcción Haramain, en Arabia Saudí. Proyectado gran parte de su trazado sobre desierto rocoso y arenoso, se presentan incógnitas tales como su hipotética afección por la erosión y el transporte eólico, aspectos que están aún por estudiar como paso previo al diseño de medidas correctoras. El presente artículo parte de una revisión bibliográfica de los aspectos teóricos, de los modelos numéricos (CFD son sus siglas en inglés) utilizados actualmente en este campo y de las medidas correctoras más utilizadas. Se destaca la necesidad de particularizar el estudio de la acción eólica al proyecto ferroviario Haramain.

Palabras Clave: Arabia Saudí; Arena eólica; Duna; Ferrocarril de Alta Velocidad; Geomorfología desértica; Modelo matemático de flujo

Abstract: The growth in the number of civil works on adverse terrain has led to an increasing need for the study of unusual aspects. These aspects include construction on ground formerly considered non-construable and also harsh climatic environments. The latter is the case of the Haramain High Speed Railway which is currently under construction. The track runs mainly over rocky and sandy desert lands and as such aeolian deflation and the transport of fine sediments must be studied, prior to designing suitable corrective measures. In this paper, we briefly revise theoretical aspects, relevant computational fluid dynamics models and the more usual corrective measures. We specifically highlight the need for "tailor made" aeolian studies for each site.

Keywords: Computational fluid dynamics; Desert geomorphology; Dune; High Speed Railway; Saudi Arabia; Windblown sand

1. Desarrollo histórico de los estudios sobre los sedimentos eólicos

Los sedimentos eólicos son un tema de interés en muchas ramas de la ciencia y tecnología como son la Física, Geología, Ingeniería Civil y del Petróleo, que son tal vez las más evidentes. También las Matemáticas juegan un papel clave en la modelización de los fenómenos eólicos, y la Arquitectura está involucrada en los nuevos desarrollos urbanos en zonas desérticas de todo el mundo, algunos de ellos amenazados por la dinámica eólica.

1. Historic development of windblown sediment studies

Aeolian sedimentation is of interest to many areas of Science and Technology, particularly Physics, Geology, and Civil and Oil Engineering. Mathematics also plays a key role in modelling aeolian phenomena, and it is of particular interest in the field of Architecture due to the many new urban developments in desert areas all over the world, some of which are threatened by the dynamics of wind-blown sediment.

Tal vez las referencias más antiguas sobre el transporte eólico proceden de la Geomorfología (Ehenberg, 1847; Blake, 1855; von Richtoffen, 1882, en (1)). Estos pioneros reconocieron los efectos del transporte eólico y de los sedimentos eólicos en África, y el origen eólico de los vastos depósitos de loess en Asia. Los primeros estudios sedimentológicos detallados fueron llevados a cabo por Udden (1896, 1898, 1914 en (1)). Durante los últimos años del XIX y el primer tercio del S. XX, se incrementó notablemente el interés sobre los procesos eólicos, publicándose varios libros y artículos eminentemente descriptivos como por ejemplo (2). Pero no fue hasta 1941 cuando apareció el primer tratado teórico, escrito por R. A. Bagnold, *The physics of blown sand and desert dunes* (3), en el que aplicó los fundamentos de la mecánica de fluidos de von Kármán, Prandtl and Shields. La obra es un referente clásico de los estudios de dinámica de arenas. Posteriormente, diferentes autores estadounidenses (Chepil, Milne, Zingg en (1)) crearon un vasto cuerpo de doctrina sobre el transporte y los sedimentos eólicos, cuyos trabajos fueron magistralmente resumidos por Chepil & Woodruff en (1).

Las aplicaciones posteriores de los estudios eólicos fueron recogidas por el cuerpo de ingenieros militares estadounidense en 1964 (4) y también con aplicación en ingeniería por Jones (5). Fryberger (6) y McKee (7) realizaron estudios descriptivos sobre la geomorfología eólica. Como obras modernas de referencia citaremos los libros de Shao (8), Pye y Tsoar (1), Zheng (9), Parsons (10) y Walker (11).

2. Impacto de los sedimentos eólicos sobre las infraestructuras

El entorno geológico en el que se produce el transporte eólico se caracteriza principalmente por un movimiento forzado por el viento de partículas de arena y polvo, tanto sobre el suelo y su entorno inmediato como transportado a mayor altitud. Este movimiento se produce principalmente en forma de reptación para el caso de las partículas de arena que se desplazan sobre la superficie del terreno, de saltación en el caso de la arena arrastrada por el viento cerca de la superficie y de suspensión para el polvo que alcanza grandes alturas. En este entorno, por tanto, los posibles riesgos geológicos y geotécnicos que se pueden producir son debidos al movimiento en masa de la arena, la migración de dunas y las tormentas de polvo.

*Perhaps the oldest reference to aeolian transport comes from Geomorphology (Ahenberg, 1847; Blake, 1855; von Richtoffen, 1882, (1)). These pioneers acknowledged the effects of aeolian transport in some landforms in Africa, and the aeolian origin of the thick deposits of loess in Asia. Udden in 1896, 1898, 1914 (1) carried out the first sedimentological studies. During late 19th and early 20th century, there was a significant increase in interest in aeolian processes and several authors published descriptive books and papers, e. g. (2). It was, however, in 1941 that the first theoretical book (3), *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, was published by R. A. Bagnold. This went on to become a classic reference in further studies of sand dynamics. Later studies by American authors such as Chepil, Milne and Zingg (1) were masterfully summarized by Chepil & Woodruff (1).*

The practical applications of theoretical studies were set out in a book published in 1964 by the U.S. Army Coastal Engineering Research Center (4). In the same year Jones (5) showed the application to engineering. We also highlight modern books by Shao (8), Pye & Tsoar (1), Zheng (9), Parsons (10) and Walker (11).

2. The effect of windblown sediment on infrastructure

The geological environment in which sediment transportation occurs is mainly characterized by the wind-blown movement of sand and dust particles on and above the ground surface. Movement is principally due to creep of sand particles on the ground surface; saltation of sand particles near the surface layer; and suspension of dust in higher altitudes. Potential geological and geotechnical hazards in the desert environment include sand drifts, dune migration and dust storms.

Windblown sediment is the major cause of mechanical damage to constructions in desert environments because of erosion, abrasion, wear and contamination. In the case of high-speed railway, such as Haramain in Saudi Arabia, wind-blown sand not only damages the infrastructure and superstructure, but may also affect the rolling stock and traffic safety. It could also produce a significant increase in maintenance work, due to wear on the rails and other materials, ballast contamination, and silting of culverts. Dust storms can obscure the view of

Los procesos de arrastre y movimiento de arena debidos al viento causan daños mecánicos en las obras de ingeniería debido a la erosión, abrasión, desgaste y contaminación que producen. En el caso del ferrocarril y sobre todo en las líneas de Alta Velocidad como el Haramain, que se está construyendo en Arabia Saudí, la arena arrastrada por el viento no sólo puede dañar la plataforma, sino que también afecta al material rodante y puede poner en peligro la seguridad de la circulación. También se producen problemas a largo plazo como el aumento significativo de los trabajos de mantenimiento, debido al desgaste del material y carriles, a la contaminación del balasto y al aterramiento del drenaje. Como consecuencia del movimiento de polvo en suspensión, las tormentas de polvo pueden dificultar la visión del maquinista y poner en peligro la seguridad y salud de los trabajadores (9). Debido a los campos eléctricos creados en las tormentas de polvo, las instalaciones eléctricas y de comunicaciones se pueden dañar.

3. El ferrocarril de alta velocidad Haramain en el entorno saudí

La necesidad de atender la demanda de transporte de pasajeros entre los núcleos urbanos situados al oeste de Arabia Saudita y además para proporcionar un medio de viaje rápido y cómodo para los millones de peregrinos que visitan anualmente las ciudades santas de Medina y La Meca, impulsó el desarrollo y construcción de un nuevo corredor ferroviario de alta velocidad que atraviesa las zonas desérticas y costeras, para conectar varias de las ciudades más importantes del país. La línea ferroviaria, que recibe el nombre de Haramain, que significa en arábigo "dos lugares santos", se encuentra actualmente en construcción. El ferrocarril Haramain tiene un trazado de 444 km (12) que discurren a través de la parte noroeste de la meseta de Arabia, situándose la ciudad de Medina en su extremo norte, concretamente en los altos de una meseta basáltica a más de 600 m. de altitud, mientras que en el extremo sur de la línea se encuentra la ciudad de La Meca más próxima al Mar Rojo.

Este nuevo trazado de alta velocidad atraviesa un desierto de tipo hiper-árido, con un clima muy cálido, escasas precipitaciones y pobre vegetación. Las condiciones climáticas son extremas, con temperaturas medias anuales de entre 27° C y 30° C, precipitaciones me-

the driver and endanger traffic and the health of workers (9). Dust storms also produce strong electric fields that can damage communications and electrical facilities.

3. The Haramain high speed railway within the Arabian context

The need to meet the demand for passenger transportation between several of the country's major cities located in Western Saudi Arabia, and also provide a means of fast and comfortable travel for the millions of pilgrims who annually visit the holy cities of Al-Madinah and Makkah, motivated the development and construction of a new high-speed rail corridor that crosses the desert and coastal areas. The railway line which is called Haramain, which in Arabic means "Two Holy Places", is currently under construction. The alignment is 444 km (12) long and runs from Al-Madinah in the North-East, which lies on the basaltic Arabian Plateau at a height of 600 m, to Makkah, near the Red Sea and at a lower elevation.

This new high-speed line will cross a hyper-arid desert, with a hot, dry climate, scarce precipitation, and sparse vegetation. Mean annual temperatures range from 27°C to 30°C and average annual rainfall is 5 mm - 9 mm. Relative humidity ranges from 24% to 61%. Wind speed ranges from 6 - 16 km/h, but gales reaching up to 100 km/h are frequent.

The geotechnical problems deriving from this harsh environment include those generated by the movement of sand and dust carried by the wind. Approximately one third of the country is covered by sand and dunes (13), (14), and as such this type of problem is significant in Saudi Arabia and must be taken into account during design, construction and maintenance. Obviously, the key element for the occurrence of wind-blown sediment is its presence and abundance, which also is closely related to the geography, geomorphology and climatology. In this arid region, there are two forms of relief that are the potential source of sand - dunes and deflation surfaces scattered along the coast of the Red Sea and sediment from the wadis or dry watercourses that are located between the mountains (14).

We performed preliminary geomorphological research using satellite images and concluded that

días anuales de 5 a 9 mm, humedades relativas del 24 al 61% y vientos con velocidades promedio de entre 6 a 16 km/h y rachas de hasta 100 km/h.

Entre los problemas geotécnicos que se derivan de las condiciones geográficas de ambiente desértico, destacan aquellos generados por los movimientos de arena y polvo transportados por el viento. Aproximadamente un tercio del Arabia Saudita está cubierto por arenas y dunas (13), (14), por lo que este tipo de problemática tiene una especial incidencia que debe ser tenida en cuenta durante el proyecto, la construcción y los trabajos de mantenimiento. Evidentemente, el elemento primordial para la que se produzcan fenómenos de arrastre de arena por el viento es la presencia, disponibilidad y abundancia de la misma, que, además, está estrechamente relacionada con la geografía, geomorfología y climatología. En este tipo de regiones áridas y para el caso que se describe, hay dos formas de relieve que son la fuente potencial de arenas: Las dunas y superficies de deflación diseminadas a lo largo de la costa del Mar Rojo y los sedimentos fluviales procedentes de los cursos fluviales secos o *wadis* que se sitúan entre las montañas (14).

Hemos realizado un estudio geomorfológico preliminar sobre fotografía satelital, del cual se deduce que, a grandes rasgos, unos 197 km de la línea podrían tener problemas derivados del arrastre de arena y polvo por el viento, de los cuales unos 20-25 km se encuentran además en riesgo de aterramiento por el avance de las dunas hacia el trazado. Hemos podido comprobar sobre el terreno que dicha interpretación geomorfológica preliminar se confirma e incluso que los intervalos en riesgo son más amplios. También hemos comprobado que a lo largo del trazado del ferrocarril Haramain, los procesos de arrastre y movimiento de arena son muy frecuentes en algunas áreas, en particular en varias zonas cercanas a la Ciudad Santa de La Meca y Jedda (o Yida) y en la región costera comprendida entre las ciudades de Jedda y Rabigh. En la siguiente figura, se indican los sectores con peligro real por afección de arenas al trazado.

Se ha observado sobre el terreno que durante la construcción de la infraestructura, se excavaron en el lado de barlovento del trazado unas amplias zanjas que discurren en paralelo y que sirven como zonas de captación de arenas con el fin de evitar su llegada a la plataforma. Allí permanecerán acumuladas hasta que sean retiradas durante las labores de mantenimiento. También se ha dispuesto una mota o barrera de tierras



Fig 1. Señalización viaria frecuente en determinadas zonas de Arabia Saudita previniendo al conductor contra tormentas de arena. Fotografía de los autores/Traffic sign common in certain parts of Saudi Arabia warning drivers of sandstorms. Photograph taken by the authors.

along some 197 km the line there are likely to be problems due to wind-blown sediment; and that along 20 to 25 km there is the risk of dune encroachment. Our field work has verified that the geomorphological deductions are correct and, if anything, may be conservative. We also verified that along the Haramain Railway, aeolian processes are very frequent, particularly in some areas between the Holy City of Makkah and Jeddah; and between Jeddah and Rabigh. Figure 2 shows the areas potentially at risk.

Fig. 2. Mapa del trazado del ferrocarril Haramain en el que se han destacado las zonas susceptibles de ser afectadas por arenas eólicas/Map of the Haramain railway alignment. Areas likely to be affected by aeolian



recubierta con un enchachado que discurre en paralelo y a barlovento de la zanja. Su función principal es mejorar la eficiencia aerodinámica de las trincheras de captación de arena.

Estas medidas resultan ser efectivas en la mayoría de los casos. Así, en algunos sectores donde esta medida no se ha llevado a cabo, la arena se encuentra actualmente atravesando la plataforma, si bien los trabajos de construcción aun no se encuentran finalizados en su totalidad, por lo que se necesitarán verificaciones posteriores. Este flujo de arena se manifiesta mediante acumulaciones de espesor decimétrico en el lado de sotavento de los terraplenes.

4. El transporte de partículas por el viento

El movimiento de las partículas de arena y polvo se produce principalmente en función de la velocidad del viento y de la resistencia de la superficie del terreno a la erosión. Los factores más importantes que afectan el transporte de la arena se indican a continuación:

- Velocidad del viento
- Forma, tamaño y mineralogía de los granos de arena
- Terreno y tipo de superficie
- Cobertura vegetal
- Agua subterránea
- Precipitaciones y humedad
- Temperatura

La arena es transportada de tres maneras diferentes: Suspensión que representa aproximadamente el 5% del transporte, sobre todo de partículas muy pequeñas. Saltación, que representa el 75-95% del transporte de arena, el movimiento de partículas de tamaño mediano, cercanas a 0.5 mm de diámetro. Las partículas mayores se mueven por la superficie arrastrándose y representan del 5 al 20% de la arena transportada. Cuando la arena está siendo impulsada por el viento, los granos rara vez superan 1 metro de altura respecto al suelo con una altura promedio mucho menor, del orden de 10 cm, (3), (15). El polvo se compone principalmente de partículas de arena de grano muy fino, limo y arcilla inferior a 75 micras de tamaño que se transportan por suspensión y por lo tanto no solo están influidos por la velocidad del viento y la gravedad, sino por fuerzas electrostáticas y por la humedad ambiental, alcanzando



Fig. 3. Lado sotavento de la plataforma con acumulaciones de arenas en los taludes del terraplén. Fotografía de los autores/ Leeward side of the railway with accumulations of sand on the slope of the embankment. Photograph taken by the authors.

We also observed during fieldwork that in some places along the line trenches have been constructed parallel and windward to the alignment. Trenches capture and prevent the sand reaching the track. The sand accumulates in the trenches and is removed during maintenance works. Covered earth ridge, draa in Arabic, have been constructed windward in order to improve the aerodynamic efficiency of the sand-capturing trenches. These measures are effective in most cases. In some areas, where this has not been carried out, the sand currently crosses the line. However, construction works have not yet been completed, so that later checks will be needed. The sand flow results in accumulations tens-of-centimetres thick on the leeward side of the embankment. We have observed this phenomenon in situ.

4. Particle transport by wind

The movement of sand and dust particles is mainly a function of the strength of the wind, and the resistance of the surface to erosion. The most important factors that affect aeolian sand transport are summarized as follows:

- Wind speed
- Sand particle shape, grain size and mineralogy
- Terrain and surface type
- Vegetation cover

distancias de transporte de kilómetros a cientos de kilómetros.

La arena empujada por el viento se mueve de dos maneras, bien deriva de forma dispersa o bien se acumula formando dunas. Las dunas se mueven según la dirección media del viento dominante a una velocidad de metros a decenas de metros al año (11), mientras que la arena dispersa deriva erráticamente según el viento que haya en cada momento, y su velocidad es una fracción importante de la del viento.

4.1. Mecánica del movimiento eólico de sedimentos

Consideremos que el aire fluye sobre una superficie lisa de modo que cualquier porción de aire se mueve de manera paralela a la superficie. Ese movimiento del aire puede discretizarse como una serie de láminas delgadas, paralelas, con un espesor infinitesimal (1). Una lámina muy fina de aire en reposo se adhiere a la superficie del suelo por fuerzas inter-moleculares. La fuerza por unidad de área requerida para superar la viscosidad y para mantener el flujo por el deslizamiento de las láminas de aire una sobre la otra, se conoce como el esfuerzo cortante laminar (τ).

Si consideramos ahora sólo dos láminas adyacentes de aire, la más alejada de la superficie del suelo tiene una velocidad que es superior en relación dU a la inferior debido a la fricción molecular. El gradiente de velocidad dU/dz , provocado por el esfuerzo cortante es inherente a las dos láminas en cuestión. El esfuerzo cortante total es igual al producto del gradiente por la viscosidad dinámica μ , del aire: $\tau = \mu(dU/dz)$. De la integración de esta ecuación se obtiene:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

donde u es la velocidad a la altura z , k es la constante universal de von Kármán para un flujo turbulento ($\approx 0,40$), y z_0 es el coeficiente de rugosidad superficial el terreno sobre la que sopla el viento (por lo tanto, está influido por la topografía, la vegetación y el terreno). El coeficiente de rugosidad superficial del terreno arenoso llano resulta ser aproximadamente $d/30$, siendo d el diámetro de los granos de arena que forman la superficie, sobre una superficie, con ciertas condiciones.

El esfuerzo cortante a nivel del terreno es la tensión límite de corte, τ_0 . La magnitud que tiene la di-

- Groundwater
- Precipitation and humidity
- Temperature

Sand is transported by three different mechanisms. Suspension accounts for 5% of the transport, involving very small particle sizes. Almost 75-95% of the sand travels by Saltation, a trajectory movement for medium sized particles. Large particles move by surface Creep and represent 5-20% of the transported sands. When sand is being driven by the wind, the grains rarely rise higher than 1 metre above the ground and the average height is much less, of the order of 10 cm (3), (15). Dust is mainly composed of very fine-grained sand, silt and clay particles less than 75 μm in size. It is transported by suspension, which is not only influenced by wind velocity and gravity, but also by the flat shape of the particles and the electrostatic forces between them, which is in turn highly influenced by humidity. In this way dust can travel from a few kilometres to hundreds of kilometres.

Wind-blown sand moves in two ways, either in a disperse manner or accumulating to form dunes. Dunes move tens of metres a year (11), according to the direction of the prevailing wind. Dispersed sand drifts erratically according to the wind direction at the time, and its velocity is of the same order of magnitude as that of the wind.

4.1. The mechanics of wind-blown sediment

Consider air flowing over a smooth surface so that any air parcel moves parallel to the surface. Such air motion is assumed to take place in a series of thin, parallel layers, having an infinitesimal thickness, referred to as laminae (1). A very thin lamina of air at rest adheres to the ground surface by inter-molecular forces. The force per unit area required to overcome the viscosity, and to maintain the flow by sliding of the air laminae over each other, is known as the Laminar Shear Stress, τ .

If we now consider only two adjacent laminae of air, the one furthest from the ground surface has a velocity which is higher by dU relative to the lower one due to molecular friction. This Velocity Gradient, dU/dz , known as the rate of shearing strain, caused by shear stress is inherent to the two laminae. The total shear stress, the friction per laminae unit area, is equal to the product of

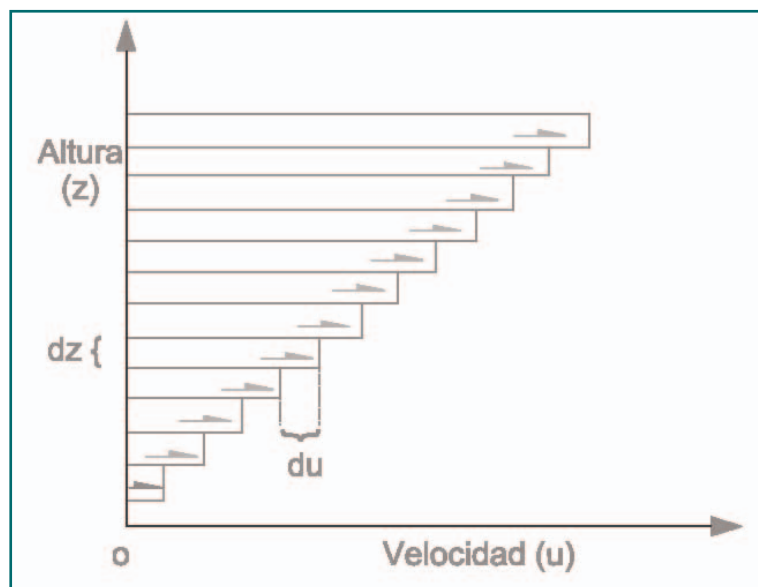


Fig. 4. Discretización de un flujo laminar viscoso. Modificado de (16)/
 Discretisation of a viscose laminar flow field. Adapted from (16).

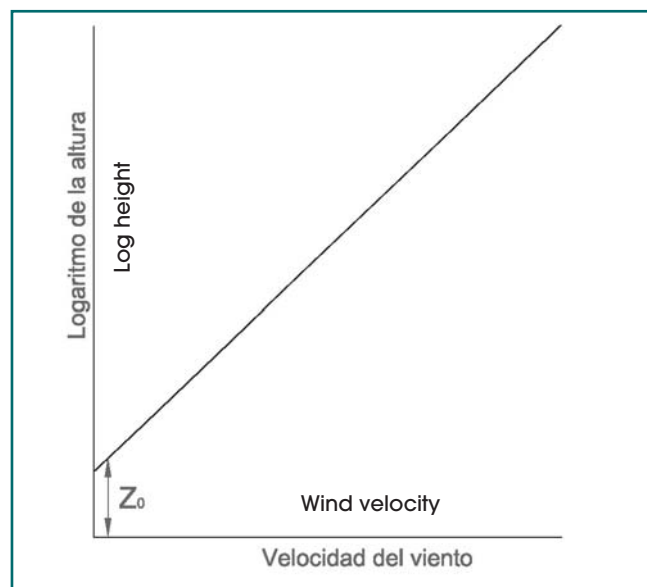


Fig. 5. Representación de un gradiente lineal y la rugosidad superficial z_0 obtenida. Modificado de (17)/Representation of a linear gradient and the surface roughness z_0 obtained. Adapted from (17).

mención de la velocidad se conoce como la velocidad de fricción u^* , aunque en realidad es una medida del esfuerzo cortante:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau z}{\rho}}$$

siendo ρ la densidad del aire. Bajo condiciones de viento constante u^* tiene un significado físico muy importante ya que es directamente proporcional al gradiente de la velocidad del viento con la altura. Y puesto que la velocidad y el logaritmo de la altura tienen una relación lineal, u^* es proporcional a la tangente de esta recta (3). Como hemos indicado la distribución de la velocidad del viento según la altura z a medida que nos alejamos de la superficie con una escala logarítmica, se representará en un comienzo de con un gradiente lineal para pasar a hacerlo a más altura de manera asintótica. El punto donde comienza el gradiente y que es donde corta al eje de ordenadas "y", representa el coeficiente de rugosidad superficial z_0 . Independientemente de la fuerza del viento, todos los perfiles de velocidad tienden a converger en el mismo valor de coeficiente de rugosidad superficial.

A fin de encontrar la tensión límite de corte τ_0 y rugosidad superficial z_0 teóricamente sólo es necesario medir la velocidad del viento (con anemómetros) por lo menos en las dos alturas convenientes conoci-

the rate of shearing strain and the dynamic viscosity, μ , of the air: $\tau = \mu(dU/dz)$. And integrating that equation we obtain the following form:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

u being the velocity at height z , k is the von Karman universal constant for turbulent flow (≈ 0.40), and z_0 is the Roughness Coefficient of the surface over which the wind is blowing. This coefficient is influenced by the local topography, vegetation and land use. The roughness coefficient of a flat sand surface was found to be approximately $d/30$, d being the diameter of the sand grains forming the surface, over a flat, homogeneous surface for conditions that prevail under a high Reynolds number in which there is no obvious loose sand movement.

The Shear Stress at the Ground surface is denoted by τ_0 . The quantity which has the dimension of velocity is known as the Friction Velocity u^* (also called shear velocity), although it is actually a measure of the shear stress:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau z}{\rho}}$$

where u^* is the shear or friction velocity, τ_0 the boundary shear stress, and ρ the density of the air. Under steady wind conditions u^* has however a

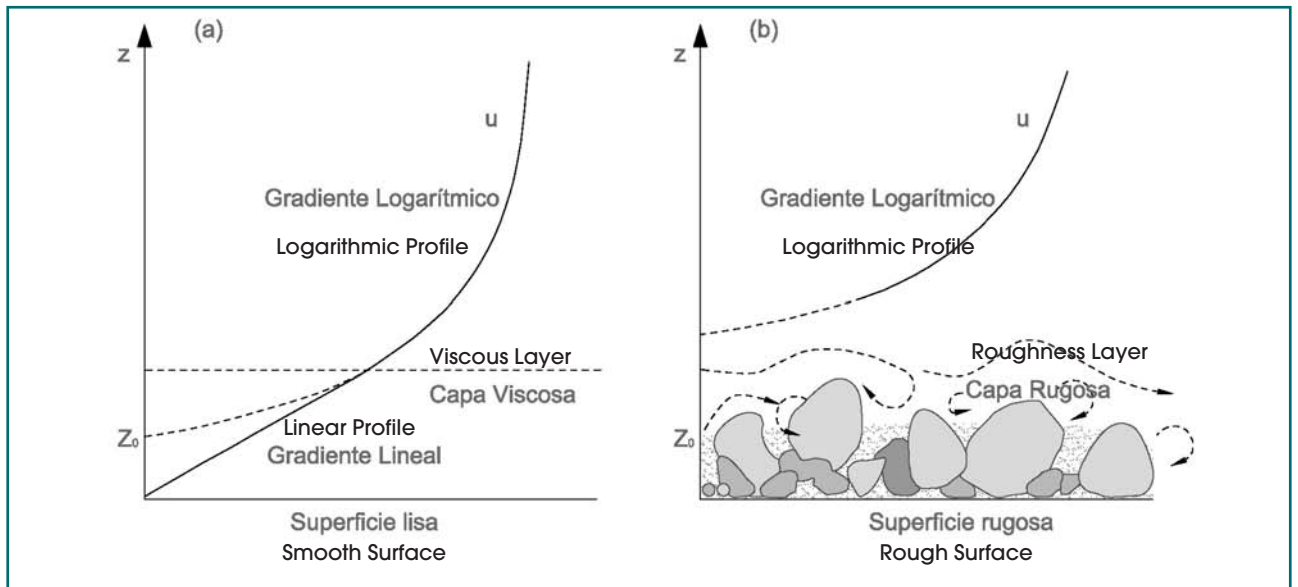


Fig. 6. Cambio en el régimen del viento como consecuencia del aumento de la rugosidad superficial z_0 . Modificado de (8)/Change in wind regime as a result of increased surface roughness z_0 . Adapted from (8).

das (de 0,5 a10 m) para representar estas velocidades en una gráfica junto con la altura y trazar una línea recta a través de los puntos resultantes (3).

Cuando el esfuerzo cortante producido en la superficie de la arena por el viento supera un cierto valor crítico, las partículas de arena comienzan a moverse. La velocidad del viento a la que se produce se denomina velocidad umbral u_t^* . Es una de las magnitudes físicas utilizadas para expresar la actividad del movimiento de las arena por el viento y su expresión matemática se indica a continuación:

$$u_t^* = A \sqrt{gD_s \frac{(p_s - p)}{p}}$$

donde D es el diámetro del grano, g es la aceleración de la gravedad, p_s y p son los pesos específicos de la arena y del aire respectivamente. El coeficiente A es casi constante para un diámetro de 0,25 mm de arena y para todas las arenas de mayor tamaño de grano (3). Las medidas de la velocidad de umbral muestran una gran dispersión, tanto en campo como en los experimentos realizados en laboratorio. Esta velocidad tiene dos componentes, el umbral de fluido, que se define como la velocidad del viento a la cual las partículas empiezan a moverse debido a la acción del viento exclusivamente y el umbral de impacto, que se define la velocidad el viento a la cual gracias a la combina-

very important physical significance, as it is directly proportional to the rate of increase of the wind velocity with the log-height. And since the velocity and the log-height have a straight-line relationship, u^* is proportional to the tangent of this straight line (3). The cut point of the straight line with the y-axis, Z_0 represents the ground surface roughness.

Therefore to find the surface drag, τ_0 , we only need to measure the wind velocity (with anemometers) at, at least, any two convenient known heights, from 0.5m to 10m, plot these velocities on a graph against the log-height and draw a straight line through the resulting points (3).

When the shear stress produced by the wind at the sand surface by wind exceeds a critical value, the sand particles start to move. The wind velocity that produces this movement is known as the Threshold Velocity, u_t^* , and is given by the expression:

$$u_t^* = A \sqrt{gD_s \frac{(p_s - p)}{p}}$$

D being the mean grain diameter, g gravity, p_s and p the specific weight of sand and air, and A a coefficient, that is almost constant for grain size ≥ 0.25 mm (3). Measurements of the threshold speed show a wide variation in both field and laboratory experiments. This rate has two aspects, the Fluid

ción de la fuerza del viento y de los impactos saltación, la arena se mantiene en movimiento.

Cabe destacar que investigaciones recientes indican que en el movimiento del polvo y arena fina, las fuerzas electrostáticas no son despreciables (18). Campos eléctricos de hasta 160 kV/m se pueden generar durante la saltación con vientos moderados. Este hecho podría explicar las discrepancias significativas entre teoría de la saltación clásica descrita anteriormente y las medidas de campo.

4.2. Tasa de arena transportada

La masa de arena transportada, como magnitud física para caracterizar el grado de afección que puede producir la arena en movimiento, es un parámetro clave para la formulación de los sistemas de control. El transporte de la arena se puede estimar matemáticamente por formulación semi-empírica para obtener la tasa de transporte y por medida directa en el campo mediante trampas de arena o dispositivos más sofisticados, como sensores de impacto de los granos.

El mejor método para definir la relación entre la tasa de arena transportada y la velocidad del viento es el análisis estadístico de los datos tomados a partir de las observaciones de campo. No hay hasta el momento una fórmula teórica que sirva para calcular con precisión la tasa de arena transportada en una región determinada debido a la multitud de parámetros que intervienen. Se indican algunos ejemplos de fórmulas que se pueden emplear como una primera aproximación (2), (19):

$$G = 0.036 U_{5ft}^3 \text{ (O'Brien and Rindlaub 1936)}$$

$$A = B_{Bagnold} \frac{\rho_a}{q} \sqrt{\frac{D}{d}} u_0^3 \text{ (Bagnold 1941)}$$

$$A = Z_{Zingg} \frac{\rho_a}{q} \left[\frac{D}{d} \right]^{\frac{3}{4}} u_0^3 \text{ (Zingg 1953 (18))}$$

Donde G es la masa de arena seca transportada en libras por pie por día y U_5 de la velocidad del viento a la altura 5 pies en pies por segundo, q es el mismo concepto en g/cm-s, B y Z son coeficientes dados por el autor correspondiente, ρ_a como la densidad de masa del aire, d el tamaño de grano estándar = 0,25 mm, D el tamaño de grano en mm, y finalmente U la velocidad del viento en cm/s.

En el caso de infraestructuras lineales, la tasa de transporte se expresa como la masa de arena

Threshold, defined as the wind speed at which the particles start to move due to wind action alone, and the Impact Threshold, which defines the wind speed at which, thanks to the combination of the wind force and saltation impacts, the sand remains in motion.

Recent research shows that in fine sand and dust movement, we cannot neglect electrostatic forces (18). Moderate wind can generate electric fields of up to 160 kV/m during saltation. This fact could explain the significant discrepancies between classical saltation theory and field measurements.

4.2. Sand transport rate

Sand Transport Rate, as a physical quantity to characterize the degree of sand drift, is a necessary basis for the rational design of wind-blown sand control schemes. We may estimate the transport of sand by using semi-empirical formulation; or by directly measuring it in the field by employing mechanical traps, or by measuring the impact of grains on a pressure sensor. Owing to the complexity of field conditions thus far there is still no theoretical formula to precisely calculate the sand transport rate in a specified region. Therefore, statistical analysis of field observation data is the principal and most reliable way to define the relation between sand transport rate and wind velocity. Some formulae that we can use as a first approach to predict the theoretical sand rate are (2), (19):

$$G = 0.036 U_{5ft}^3 \text{ (O'Brien and Rindlaub 1936)}$$

$$A = B_{Bagnold} \frac{\rho_a}{q} \sqrt{\frac{D}{d}} u_0^3 \text{ (Bagnold 1941)}$$

$$A = Z_{Zingg} \frac{\rho_a}{q} \left[\frac{D}{d} \right]^{\frac{3}{4}} u_0^3 \text{ (Zingg 1953 (18))}$$

in which G is the dry weight transport rate (pounds per foot per day) and U_5 the wind speed (feet per second) at an elevation of 5ft, q is the mass transport rate in g/cm-s, B and Z are coefficients, ρ_a is the mass density of the air, d the standard grain size = 0.25 mm, D the grain size in mm, and finally u the shear velocity in cm/s.

In the case of linear infrastructure the sand transport rate is expressed as the weight of sand passing over a unitary stretch easured

que atraviesa una anchura de trazado equivalente a una unidad, medida perpendicularmente a la dirección de transporte durante un período determinado, generalmente de 1 año.

Como ejemplo, se cita que en algunas áreas del desierto de Arabia Saudita la tasa de transporte de arena anual varía de 10 a 120 toneladas por metro lineal de trazado y puede alcanzar valores más altos en zonas muy activas (13). Al-Harhi (14) describe en la zona entre Jeddah y Al-Lith, tasas anuales que oscilan entre 29,2 m³/m en la zona de dunas, 12,8 m³/m en la zona interdunar, 2,3 m³/m en las zonas llanuras de deflación eólica y 6,5 m³/m en la zona de llanura salina o sebja.

5. Estudios geológicos y de campo

Existen básicamente cuatro grandes categorías de estudios a realizar en campo: teledetección, realización de mapas geomorfológicos, análisis de los datos meteorológicos tomados en lugares seleccionados a lo largo del área de estudio, y monitorización y seguimiento de los procesos. La viabilidad e importancia de estas técnicas en los programas de evaluación depende de la disponibilidad de los datos, de las características del terreno y del territorio, de las proporciones de arena y polvo en el material móvil, del tiempo disponible y del presupuesto.

Es importante remarcar que la extrapolación de datos meteorológicos o de cualquier otro tipo de estaciones de medida más o menos lejanas no es un método fiable en ningún caso (15). Es necesario medir en la zona que se pretende estudiar.

En grandes proyectos, el uso de teledetección y la realización de mapas de superficie junto con datos meteorológicos recopilados durante un largo período de tiempo, proporcionará una buena previsión, mientras que las técnicas de monitorización a corto plazo no proporcionan una imagen global del régimen del movimiento de la arena, pero son relativamente de bajo coste y proporcionar una base suficiente para la planificación de los programas de mantenimiento. Es frecuente, sin embargo, que los estudios predictivos no hayan tenido éxito o han proporcionado una mala evaluación del riesgo, lo cual suele ser debido a que no se han utilizado las técnicas adecuadas, ya sea por falta de inversión o por no contar con registros suficientemente exten-

perpendicular to the direction of the drift over a given period, generally 1 year.

In some areas of the Saudi desert the annual sand drift rate varies from 10 to 120 tonnes/metre and can reach higher values in very active areas (13), but for the Haramain railway line, the expected rate is lower. As described by Al-Harhi (14) for the Jeddah to Al-Lith area, the annual rates measured are 29.2 m³/m in the dune area, 12.8 m³/m in the inter-dune area, 2.3 m³/m in the deflation flat area and 6.5 m³/m in the sabkha area.

5. Geological and field studies

There are essentially four broad categories of field study: analysis of remote sensing images; geomorphologic surface mapping; analysis of meteorological data taken in selected sites throughout the study area; and monitoring of processes. The applicability and relative importance of these techniques in assessment programs depends on the availability of data, ground and land characteristics, the proportions of sand and dust in the mobile material, and the available time and funds.

It is important to note that the extrapolation of data from distant weather stations is not a reliable method (15).

For large projects, remote sensing, surface mapping techniques and long-term meteorological data can provide very good forecasts, while short-term site monitoring techniques cannot give a comprehensive general picture of sand movement. These are relatively inexpensive and provide a sufficient base for planning maintenance programmes. The main reason why past schemes have proved unsuccessful are the poor evaluation of the hazard due to sand movement, due to the failure to use suitable control techniques either because of the lack of investment or the lack of long-term data, as many authors have indicated. Ideally, analysis of meteorological data records should extend over at least four years and preferably more than ten years (5).

5.1. Remote sensing and study of aerial images

Because of the nature of aeolian transport, this type of technique is very useful for a broad scale

didos en el tiempo, tal y como muchos autores indican. Sirva de ejemplo el de los registros meteorológicos, que deben efectuarse a largo plazo y deberían extenderse por lo menos a cuatro años y, preferiblemente, más de diez (5).

5.1. Teledetección y estudio fotogeológico

Debido a la naturaleza de transporte eólico, este tipo de análisis es muy útil para obtener una idea a gran escala de los patrones de transporte eólico a fin de que las condiciones en un sitio particular, se puedan extrapolar a un escenario regional. Además, el estudio de imágenes secuenciales de satélite puede ayudar en el estudio de las dunas, su distribución y su deriva.

El estudio geomorfológico sobre fotografía aérea de las relaciones entre las formas de dunas y el viento, es una valiosa ayuda para la evaluación del movimiento de la arena, asumiendo que los patrones de dunas visibles en la superficie están determinados por el régimen actual de los vientos. Este es un método poderoso, rápido y barato, aunque sirve únicamente como valoración preliminar para la identificación de las zonas susceptibles de experimentar transporte eólico intenso por el viento y las áreas de deflación donde se originan los sedimentos transportados por el viento. Esta técnica no requiere el despliegue de grandes equipos y medios, aunque si del ojo experto del geomorfólogo.

5.2. Cartografía geomorfológica

Una vez identificadas las zonas de origen de arena, el siguiente paso debe ser la realización tanto de un análisis preciso de la información disponible como de una primera aproximación de la geomorfología de la zona de estudio. Un mapa de campo simplificado, en el que únicamente se identifiquen evidencias erosivas y de sedimentación proporciona información valiosa sobre la dirección del movimiento de la arena aunque no mucha en lo que respecta al transporte de polvo. La base adecuada para la evaluación del riesgo es la realización de un mapa geomorfológico regional, que sitúa la actividad eólica en un contexto general de accidentes geográficos y la distribución de materiales de la superficie del terreno.

appreciation of movement patterns, so that the conditions at a particular site can be placed in a regional setting. The interpretation of sequences of satellite images may yield valuable information on the distribution of surface sand accumulation, dune distribution and major trends in aeolian transport.

Additionally classical geomorphological analysis, using aerial photography, of the relations between dune forms and wind regime is a helpful tool to identify the wind trend, even though it assumes that visible surface dune patterns are determined by contemporary winds. This is a quick and inexpensive method that permits a preliminary evaluation and identification of the areas likely to suffer from aeolian transport and the probable sources of the sediment. Finally this stage of study does not require the deployment of large teams and means, but it needs of the skilled eye of the geomorphologist.

5.2. Geomorphologic mapping

Once the areas where the sand and other sediment come from have been identified, it is necessary to carry out accurate analysis of the available information as a first approach in the geomorphological study of the area. The next step is field mapping. Here simple field maps are drawn up to identify erosional and depositional evidence for sediment movements. These can provide useful data on the direction of sand movement but are less useful as regards dust transport. To adequately assess the hazard a comprehensive geomorphologic map is of great use indicating, as it does, evidence of aeolian activity within the context of the total landform assemblage and the character and distribution of surface materials.

The occurrence of dunes within the study area must be noted to enable hazardous areas to be identified. The geometric parameters to be measured should include the dune height, windward length, slip-face length and dune width. All the measurements should be done using theodolite, topographic benchmarks, and measuring tape. Finally to measure dune movement a stadia rod should be fixed in the base of the windward slope of each dune and the distances between the stadia rod and the base of windward slope of the dunes measured at regular intervals (14), (21).

La identificación de las dunas y demás formas eólicas presentes a lo largo del área de estudio también debe realizarse con el fin de identificar las zonas peligrosas. Los parámetros geométricos que se deben medir incluyen la altura de las dunas, la longitud del lado de barlovento, la longitud de la cara de deslizamiento y ancho de las dunas. Las mediciones deben tomarse mediante puntos de referencia topográficos, cinta métrica y el uso de medios topográficos (14), (21).

La teledetección y el estudio de fotografías aéreas, junto con la cartografía geomorfológica de campo, proporcionan la base indispensable para la evaluación preliminar rápida de los riesgos inducidos por los sedimentos eólicos. Pero los estudios más detallados solo pueden hacerse si se cuenta con suficientes datos meteorológicos y de seguimiento preciso.

5.3. Control meteorológico

Con los datos obtenidos de las fases anteriores, la vigilancia y seguimiento de los procesos debe ser el siguiente paso y que incluye la adquisición de datos de campo (velocidad del viento, la tasa de transporte de la arena, temperatura, humedad y otros) y la toma de muestras de arena. Los valores climatológicos, en particular la velocidad y dirección del viento, temperatura del aire y la humedad del aire a varios niveles, así como la radiación y la precipitación, se pueden medir utilizando una micro-estación meteorológica.

El parámetro más importante a medir es el viento. Los perfiles de viento se miden con torres de 3 a 10 anemómetros, instalados con separación logarítmica, desde unos pocos decímetros por encima de la superficie del suelo de hasta 5 ó 10 m de altura. La dirección del viento se mide normalmente utilizando veletas de alta sensibilidad montadas a una o más alturas en el mismo lugar que los anemómetros. La salida de datos de las veletas y anemómetros es a menudo recogida en varios tipos de registradores de datos. A partir de las mediciones de viento, rugosidad superficial y fricción, se puede conocer el perfil de la velocidad del viento, suponiendo un perfil logarítmico medio.

La temperatura del aire, la humedad y la lluvia también pueden ser medidas mediante la instalación de los dispositivos adecuados en la estación meteorológica. Otros parámetros esenciales,

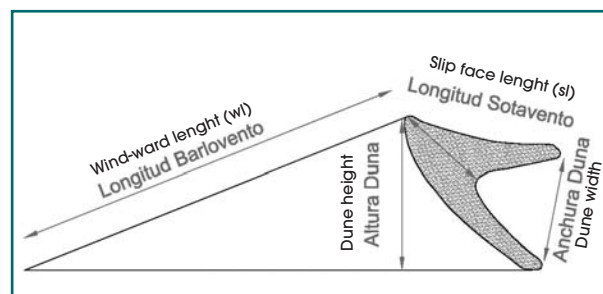


Fig. 7. Parámetros habitualmente medidos en los estudios de dunas. Modificado de (14) /Parameters typically measured in studies of dunes. Adapted from (14).

The analysis of remote sensing images and geomorphologic mapping provides a rapid preliminary assessment of the hazards due to aeolian sediment. More detail can only be supplied by the monitoring of processes and analysis of meteorological data.

5.3. Meteorological monitoring

With the data gathered from the previous phases, the next step is to monitor the processes which include acquiring field data (wind velocity, sand transport rate, temperature...) and sand samples. Atmospheric data, in particular, wind speed and direction, air temperature and air humidity at various levels, as well as radiation and precipitation, can be measured using a meteorological micro-station as shown in the photographs below.

They typically measure wind speed in aeolian transport studies using 3-cup anemometers mounted on towers. Wind profiles are typically measured with 3 to 10 anemometers, mounted with logarithmic spacing, on towers at heights ranging from a few centimetres above ground level to up to 5 or 10 m. Wind direction is normally measured using sensitive wind vanes mounted at one or more heights in the same location as the anemometers. Output from the anemometers and vanes is most often collected using various types of data logging devices. Air temperature, humidity and rainfall are measured using the same facilities, by installing the proper devices.

Wind measurement data over a sufficient period of time will provide the surface roughness coefficient and frictional velocity, assuming the mean wind has a logarithmic profile. Essential parameters such as the sand transport rate are measured using mechanical traps or remote sensing samplers as described in the following section.

como es tasa de transporte de arena, deben ser medidos empleando trampas mecánicas o muestreadores remotos como se describe en el apartado siguiente.

5.4. Medida de la tasa de transporte

La tasa de arena transportada juega un papel importante como un parámetro físico para caracterizar el potencial grado de afección producido por el movimiento de arenas. La validación y calibración de los modelos analíticos y numéricos del transporte eólico se hace mediante el uso de trampas de arena, tanto de tipo horizontal como vertical. Hay una gran variedad de dispositivos de muestreo de arena que difieren en dimensión, comportamiento aerodinámico y eficiencia.

Los muestreadores de tipo in-situ, pasivos o activos, se suelen utilizar para muestrear arena durante un cierto período de tiempo y la masa de arena recogida permite estimar precisamente el flujo medio de arena durante. Los muestreadores de tipo activo están equipados con dispositivos de bombeo para mantener un flujo a través de sus entradas, mientras que muestreadores pasivos dependen de viento para mantener el flujo. Hay varios tipos de muestreadores pasivos y algunos de ellos están muy extendidos, como la trampa de arena de Bagnold (15) y la trampa de arena de Fryrear (20). Las trampas de arena permiten estudiar el transporte de arena a diferentes alturas sobre la superficie, pero están sujetas a varias limitaciones, ya que la propia trampa produce distorsiones en el flujo, lo que causa que la eficiencia de la captura varíe en un rango de 80 a 120%. Un estudio comparativo de diferentes modelos de trampas de arena se puede encontrar en Goosens (22).

Las trampas y sensores se montan generalmente en una torre para medir el flujo de partículas de arena en varios niveles hasta una altura de aproximadamente 2 m. Desde el punto de vista del diseño, la disposición de trampas para recoger la arena arrastrada por el viento de manera regular es muy importante (9) (20).

5.5. Análisis de la deriva de las dunas

No hay una expresión matemática única para cuantificar de manera fiable el movimiento real de las dunas. Todas las fórmulas teóricas y empíricas tienen sus propias condiciones y límites específicos, muy condicionados por la experiencia de cada autor, por lo tanto la determinación de la tasa de movimiento de las dunas

5.4. Sand transport rate

Sand transport rate is an important parameter to enable the degree damage due to sand drift to be characterised. The validation and calibration of analytical and numerical models of aeolian transport may also be estimated using both horizontal and vertical mechanical sand traps or samplers.

In-situ passive and/or active samplers are usually used to collect sand over a certain time period. There is a wide variety of sand samplers which differ in dimension, aerodynamic behaviour and efficiency. They can be classified as in-situ samplers (active or passive) and remote-sensing samplers. Active samplers are equipped with pumping devices to maintain a flow through their intakes, while passive samplers rely on wind to maintain the flow. There are several types of passive sampler that are widely used, such as the Bagnold (15) and Fryrear sand traps (20). Sand traps allow a study of mass transport at varying heights above the surface, but are subject to several limitations because the trap itself induces flow distortions, which cause catch efficiency to range from about 80 to 120%. A comparative study of different sand traps can be found in Goosens (22).

The traps are usually mounted on a tower to measure the flow of sand particles at various levels up to a height of about 2 m. From a design point of view, the positioning of sand traps to collect wind-blown sand at regular intervals is very important (9) (20).

5.5. Analysis of dune drift

There is no unique and reliable mathematical expression to quantify the drift of dunes. Every theoretical or empirical formula has its own specific boundary conditions, closely related to the experience of the author. Thereby, the study ought to be based on fieldwork and monitoring.

An easy and cheap device to record dune movement is a network of stakes or rods, as mentioned above. The stakes installed should be observed for a long term period of time, up to several years, until they are covered by sand. The annual magnitude and direction of dune movement are determined by comparing the distances, measurements and dune mapping of different periods of time. As a preliminary approach, the higher the dune, the larger the amount of sand involved in its movement and, consequently, the slower its movement. The rate of dune movement

debe basarse en el trabajo de campo, esto es, la observación in situ y su seguimiento.

Un dispositivo de fácil y barato para estimar el movimiento de dunas es la instalación de una red topográfica de estacas o varillas. Las estacas deben ser observadas y controladas durante un largo período de varios años hasta que sean cubiertas por arena. La magnitud anual y la dirección del movimiento de dunas se puede determinar mediante la comparación de las distancias y mediciones para diferentes períodos de tiempo. Como una primera aproximación, cuanto mayor es la duna, mayor es la cantidad de arena involucrada en su movimiento y, en consecuencia, más lento su desplazamiento. La velocidad de movimiento de dunas es también dependiente del tipo duna, por ejemplo, las dunas de tipo *barhan* se mueven más rápido que las dunas con forma de domo y estas últimas se mueven más rápido que las dunas parabólicas (14).

Bagnold (3) estableció que la tasa de movimiento de las dunas de arena se puede expresar como:

$$D = \frac{Q}{\gamma H}$$

Donde, D es la distancia del movimiento de la duna, Q la masa transportada a través de una unidad de anchura dentro de una unidad de tiempo, γ la densidad aparente de la duna de arena y H es la altura de la duna.

A partir de las observaciones de campo realizadas se puede indicar de manera general, que el movimiento de las dunas en la zona de estudio del ferrocarril Haramain en la primera mitad de su recorrido, que es la zona donde las dunas son más abundantes, es del norte-noroeste hacia el este-sureste. Estas medidas de campo concuerdan con las observaciones realizadas por Al-Harthi (14). La velocidad de avance puede ser muy rápida, de decenas de metros al mes. Para dar una idea del rápido movimiento de las mismas, se adjunta la fotografía de la fig. 8, en la que se observa una duna tipo *barhan* atravesando un vallado perimetral instalado pocos meses antes de la realización de la fotografía.

6. Ensayos de laboratorio

El movimiento de partículas dispersas en cualquier fluido se rige en parte por el tamaño, forma

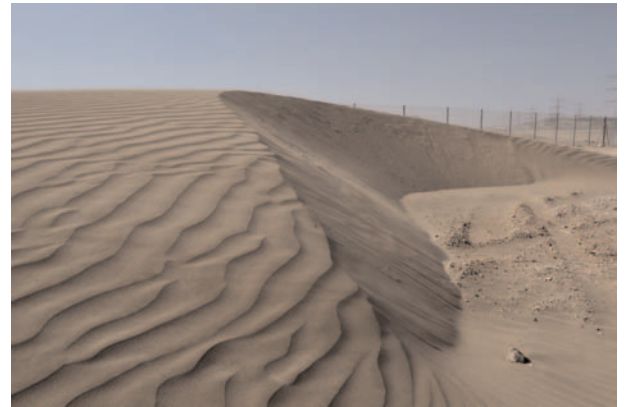


Fig. 8. Duna atravesando el vallado del lado de barlovento del trazado del ferrocarril Haramain en obras. Fotografía de los autores./Dune crossing a fence on the windward side of the Haramain railway line. Photograph taken by the authors.

is also dependent on the dune type. Barchan dunes move faster than dome dunes which in turn move faster than parabolic dunes (14).

Bagnold (3) deduced that the movement rate of sand dunes could be expressed as:

$$D = \frac{Q}{\gamma H}$$

Where, D is the movement distance of the dune; Q the mass transported through a unit of width within a unit of time; γ the bulk density of the sand dune and H the height of the dune.

Along the Haramain railway, our observations show that the general trend of dune drift is from north-northwest to east-southeast. This is in agreement with Al-Harthi's observations (14). We estimate that the speed can be quite fast, ranging from a few metres to tens of metres per month. The enclosed picture (Fig. 8) shows a barchan dune encroaching on a fence which was installed only a few months before.

6. Laboratory tests

The movement of grains in any fluid is governed partly by the size, shape, and density of the grains and partly by the physical properties of the fluid (16). Statistical grain size parameters must be calculated, including density, mean size, standard deviation (sorting), skewness, kurtosis and median size in addition to grain size distribution (1). These parameters are used to obtain the sand transport rate and the

y densidad de los granos y en parte por las propiedades físicas del fluido (16). La distribución del tamaño de las partículas es un parámetro clave del proceso de transporte de partículas por el viento. Además de la distribución de tamaño de grano, los parámetros tales como, densidad, tamaño medio, desviación estándar (clasificación), asimetría, curtosis y mediana deben ser calculados (1). Estos parámetros se utilizan para obtener la tasa de transporte de la arena y la velocidad umbral. Es de destacar que hay variaciones en el tamaño de grano tanto en una misma duna, entre diferentes tipos de dunas y a escala regional, en cada campo de dunas, por lo que los valores de tamaño de granos utilizados para el análisis deben ser manejados con cautela lo cual implica que el muestreo deben diseñarse y efectuarse a medida para el área a investigar.

La densidad de los granos juega un papel clave en el arrastre por el viento y la erosión. Se puede obtener mediante la realización de análisis mineralógico, ensayos con picnómetro y otros. Las densidades de las partículas varían considerablemente dependiendo de su composición y de la presencia o ausencia de huecos internos, que pueden estar llenos de aire u otro fluido. El mineral dominante que se puede encontrar en las dunas y arenas es el cuarzo es debido a su dureza. Sin embargo, en algunas arenas se pueden encontrar, fragmentos volcánicos o carbonato cálcico, fragmentos de conchas, cristales de yeso, o granos de feldespato. Por lo tanto como se ha mencionado para el análisis del tamaño, los datos disponibles deben ser manejados con precaución y el diseño de muestreo debe ser a medida.

7. Modelos matemáticos

El propósito de este tipo de modelos es el de reproducir de la manera más fidedigna posible el movimiento del fluido (viento), su influencia sobre las partículas de suelo (deflación) y el movimiento del fluido con las partículas transportadas, y, en segunda instancia, simular el efecto que produce sobre ese régimen natural la introducción de un elemento extraño, como puede ser una infraestructura lineal. Estos modelos reciben el nombre en inglés de Computational Fluid Dynamics o CFD. Casi todos los modelos se basan en la resolución numérica de las ecuacio-

threshold velocity. It is remarkable that variations in grain size exist on an individual dune; between different dune types and regionally across the dune field, so grain size values used for the analysis must be properly handled and this implies that the sand sampling must be customised for each area.

Grain plays a key role in wind transport and erosion. It can be obtained by performing mineralogical analysis, using a pycnometer or other device. The densities of particles differ considerably depending on their elemental composition and the presence or absence of internal voids, which may be filled with air or another fluid. The dominant mineral that can be found in dune sand and sand sheets is quartz due to its hardness. However, in some sands, volcanic fragments or calcium carbonate, shell fragments, gypsum crystals, or feldspar grains may be encountered. Therefore, as in the case of size analysis, the available data must be properly handled and the sampling design must be customised.

7. Mathematical models

The aim of this analysis is to model, in the most reliable way possible, the movement of the fluid (wind) and its influence on particles. This will enable us define the size of the atmospheric layer (scale) and the effect produced on the natural surroundings by the introduction of external elements, such as a linear structure.

Almost all models are based on the numerical solution of the Navier-Stokes equations used to describe the movement of a fluid. As with any fluid model, when it comes to discretisation there are three problems: the discretisation of equations solved using the finite volume method, discretisation using a mesh and finally time, conceived as the division of continuous time in discrete time steps.

When dealing with the flow and transport of aeolian sediment models for turbulent regimes must be used. The so called RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) numerically solve the Navier-Stokes equations, on a length scale, based on Lagrangian calculation. Non Lagrangian models (23), (24) do not typically give useful results in detailed studies, but do so in general ones (15).

These equations are designed to calculate viscosity μ in relation to one or more variables which

nes de Navier-Stokes aplicadas a un fluido con el fin de describir su movimiento. Como en todo modelo de fluidos, a la hora de discretizarlo se presentan tres problemas, la discretización de las ecuaciones, que se resuelve habitualmente según el método de los volúmenes finitos, la discretización espacial definida según una red mallada y por último, la temporal, planteada como la división del tiempo continuo en pasos temporales discretos.

Para el tratamiento del flujo y el transporte de sedimentos eólicos, las referencias se limitan a los modelos en régimen turbulento. Los denominados RANS o *Reynolds Averaged Navier-Stokes* resuelven numéricamente, sobre una escala longitudinal, las ecuaciones de Navier-Stokes con una base de cálculo lagrangiana. Los modelos no lagrangianos (23,24) no suelen proporcionar resultados útiles en estudios de detalle, pero sí en estudios generales (15).

Las ecuaciones de Navier-Stokes relacionan la viscosidad μ con una o más variables las cuales fijan el número de ecuaciones resultantes. Se puede dotar al modelo de gran complejidad en función tal número. No se han encontrado referencias a modelos de más de siete ecuaciones (según referencias actuales).

- Modelos de cero ecuaciones, que establecen la interacción entre μ y el gradiente vertical de velocidad.
- Modelos de una ecuación, que resuelven la ecuación que relaciona la energía cinética turbulenta y la viscosidad. A este tipo de modelos pertenece el de Spalart-Allmaras (25).
- Modelos de dos ecuaciones, dentro de los que se destacarán el modelo k- ϵ y el modelo k-w:
 - k- ϵ : Incorpora dos ecuaciones que interrelacionan los parámetros k (energía cinética del flujo turbulento) y ϵ (su velocidad de disipación de K) para el posterior cálculo de la viscosidad.
 - k-w: Para el cálculo de la viscosidad, que se apoya en dos ecuaciones relacionadas por las variables k y w (disipación de la energía cinética por unidad de volumen que determina la escala de la turbulencia).
- Modelos de cuatro ecuaciones, como el denominado RNG o *Renormalisation Group Technique* y que están basados en los modelos de dos ecuaciones, incorporando la anisotropía provocada por la turbulencia en las zonas cercanas a obstá-

then sets the number of equations. The model can therefore become quite complex having up to seven equations (according to available references).

- *Zero equation model: Establishing the interaction between viscosity and shear rate.*
- *One equation model: Solve the equation relating turbulent kinetic energy and viscosity. The Spalart-Allmaras (25) is of this type.*
- *Two equation model: here both the k- ϵ model and the k-w model deserve to be highlighted.*
 - k- ϵ : comprises two equations relating k (turbulent kinetic energy of the fluid) and ϵ (dissipation rate) to subsequently calculate the viscosity.*
 - k-w: In this case the calculation of the viscosity, the model is supported by the pair of equations relating to the variables k (turbulent kinetic energy of the fluid) and w (specific energy dissipation), these variables fixing the turbulent scale.*
- *Four equation models: (based on the two equations models).*
- *RNG: Renormalisation Group Technique. It incorporates the turbulent anisotropy in areas close to the walls as well as non-local effects of pressure-torsion. This is similar to the k- ϵ model but also distinguishes between the separation (free movement) flow zone and the circulation flow zone (eddies created by obstacles).*
- *Seven equation model: These are the most complex and require high computational power.*
- *RSM: Reynolds Stress Model, aimed at the resolving the issue of transport for the Reynolds stresses caused by the interaction between particles.*

As regards large-scale models, one which deserves mention is the Large Eddy Simulation (LES) Model which analyses the turbulent motion of large eddies. Mathematically, the model is based on the spatial or frequency dependence filtering of fluid conservation equations. Spatial models with two functions types, rectangular and Gaussian, are the most widely used. The number of variables is greater than the number of equations and therefore to mathematically close the model certain expressions, which model the turbulence variables on a detailed level, are required.

One so called mixed model is the DES or Detached Eddy Simulation. It corrects the shortcomings of the

culos fijos, además de efectos no locales de presión-torsión. Modelo similar al $k-\epsilon$ pero que, además distingue entre separación de la zona de flujo (movimiento libre) y circulación (remolinos provocados por la presencia de obstáculos) a barlovento del obstáculo y circulación al chocar con el mismo.

- Modelos de siete ecuaciones, los más complejos y que requieren una gran potencia de cálculo. El RSM o *Reynolds Stress Model* está encaminado a la resolución del transporte para las tensiones de Reynolds generadas por la interacción entre partículas.

Respecto de los modelos a gran escala, puede citarse el LES o *Large Eddy Simulation*. Modelo de análisis del movimiento turbulento de grandes remolinos. Matemáticamente, el modelo se basa en el filtrado de la dependencia espacial o frecuencial de las ecuaciones de conservación de un fluido. Los más utilizados son los de tipo espacial con dos funciones tipo, una rectangular y otra gaussiana. El número de variables es mayor que el de ecuaciones, por lo cual para el cierre matemático del modelo es necesaria la adición de expresiones que supongan la modelización de las variables de turbulencia a escala detallada.

Un modelo mixto es el DES o *Detached Eddy Simulation*, que corrige las deficiencias de los modelos RANS, muy eficientes cerca de los bordes del modelo pero menos precisos en las regiones alejadas, y las de los modelos LES, cuyo comportamiento en las regiones alejadas es aceptable pero discutible en las zonas próximas a la superficie del terreno. La base está en una escala longitudinal variable para poder moverse a grandes y pequeñas escalas sin modificar el modelo.

Como resumen, se incluye la tabla 1, en la cual se comparan los modelos más relevantes.

Dicho esto, parece razonable utilizar un análisis del tipo RANS para el estudio del transporte eólico por saltación o reptación, es decir, a escala detallada en las capas cercanas al suelo. Concretamente el modelo que parece adecuarse con mayor precisión es el RNG por su mayor atención a la interacción entre partículas. Por otro lado, habría que plantearse un modelo escala amplia, como es el LES, para el análisis del transporte por suspensión, ya que en su mayoría se produce en las capas altas.

Por ello, en opinión de los autores, un análisis predictivo completo debería utilizar ambos tipos.

RANS models which are very efficient near the edges of the contour but are less accurate in remote regions. It also corrects LES models, whose behaviour in remote areas is acceptable but questionable in areas close to the edges (the surface of the terrain). The basis is in the use of the length scale to be able to move to large and small scales without changing the model.

Within this context and bearing in mind that we are all the while focused on the treatment of sand flow, the following table 1 gives a comparative summary of the most relevant models:

It would appear reasonable to use a large-scale model, such as RANS, for the study of aeolian transport by suspension and saltation, i.e., on a detailed scale in layers near the ground. Specifically, the model that seems to give the closest fit is the RNG model, due to the greater care given to interaction between particles. On the other hand, a wide scale model, such as LES, should be considered as it enables analysis of suspension transport which for the most part occurs in the upper layers.

It is the opinion of the authors that a comprehensive predictive analysis should use both types of model: RNG and LES.

8. Corrective measures to control sand

When designing infrastructure for desert regions, especially large linear infrastructure that may constitute a significant barrier to natural wind flow, it is important to appreciate that each specific issue of sand movement must be dealt with individually and corrective measures tailored to the requirements of each specific location. The many failures in this field to date confirm that there are no valid generalisations. Drawing mainly from Pye and Soar (1), the primary goals to be achieved by the corrective measures implemented are:

- *Reduction of sand supply and elimination of sand sources, acting on areas under deflation, far from infrastructure to be protected.*
- *Enhancement of wind velocity and sand movement in those areas where the supply cannot be controlled, avoiding deposition in the work area.*

Tabla 1. Comparación entre los diferentes tipos de modelos matemáticos.

MODELO	CARACTERÍSTICAS	APLICACIÓN	CASO PARTICULAR
k-ε	<p>Ventajas:</p> <p>Relativamente fácil de usar. Buena convergencia de datos. Predicciones de flujos razonables.</p> <p>Desventajas:</p> <p>Predicciones pobres para: -Flujos de remolinos -Flujos con fuerte separación -Flujos de simetría axial Ciertos flujos no confinados y flujos completamente desarrollados en conductos no circulares.</p>	<p>Adecuado para el régimen libre y sólo válido para flujos completamente turbulentos.</p> <p>Aceptable en capas de cortadura y recirculaciones.</p> <p>Limitado a cálculos 2D por excesiva complejidad en 3D.</p> <p>Se trata del modelo computacional más validado.</p>	<p>Sólo contempla el movimiento del fluido (viento).</p> <p>No hay interacción entre partículas (rugosidad).</p> <p>No se introducen parámetros de transporte o disipación.</p>
k-w	<p>Similar al modelo k-ε pero además del turbulento, contempla el efecto Coriolis e introduce el cambio de las rugosidades debidas a la altura.</p>	<p>Respecto al modelo anterior además, proporciona un buen estudio en flujos con fuerte separación entre capas.</p> <p>Enfocado a la industria aeroespacial.</p>	<p>Se introduce el parámetro de rugosidad.</p>
RNG	<p>Modelo k-ε modificado. Renormalización de las ecuaciones de Navier-Stokes más dos ecuaciones que definen la generación y la disipación del transporte.</p> <p>Incluye una mayor interacción entre partículas</p>	<p>Distingue entre la zona de flujo y la recirculación.</p> <p>Trata la viscosidad de los remolinos a través de la velocidad, la temperatura y la cantidad de turbulencias.</p>	<p>Modelo más completo, relaciona el movimiento del fluido, (incluida la rugosidad) con su potencial transporte.</p> <p>Adecuado para el estudio de la saltación y la reptación.</p>
RSM	<p>Modelo genérico que contempla un mayor ámbito de aplicación.</p> <p>Requiere un mayor coste computacional debido al aumento del número de interacciones y no está tan validado como modelos anteriores.</p>	<p>Se puede aplicar en la mayoría de los flujos industriales, incluyendo chorros, conductos no circulares y flujos con mucha curvatura pero da problemas en chorros axisimétricos y flujos no confinados con recirculación.</p>	<p>El más complejo, modeliza parámetros de producción, difusión, transporte y rotación.</p> <p>Aporta demasiada complejidad computacional.</p>
LES	<p>Trata el comportamiento de las grandes escalas a través de las ecuaciones del flujo dependientes del tiempo además de modelar los efectos de las pequeñas escalas.</p> <p>Basado en ecuaciones de filtrado espacial.</p>	<p>Simulaciones de remolinos a gran escala.</p> <p>Apto para flujos complejos.</p>	<p>Válido para el análisis del transporte por suspensión</p>
DES	<p>Detached Eddy Simulation.</p> <p>Se modifica la escala de estudio, proponiéndose así, un estudio mixto que abarca tanto grandes como pequeñas escalas de remolinos.</p>	<p>Su principal aplicación es la resolución de flujos complejos en los que no es posible o es muy difícil la separación de las regiones (alejadas o en la frontera) de las capas atmosféricas.</p>	

Table N. 1. Comparison of different computational fluid dynamics models

MODEL	FEATURES	APPLICATION	SPECIAL CASES
k-ε	<p>Advantages: Relatively easy to use. Good convergence of data. Reasonable flow predictions.</p> <p>Disadvantages: Poor predictions for: -Swirling flows -Flows with strong separation -Axisymmetric flows Certain unconfined flows and fully developed flows in noncircular ducts.</p>	<p>Suitable for free regime and only valid for fully turbulent flows.</p> <p>Acceptable for shear layers and recirculation. Limited to 2D calculations as too complex in 3D.</p> <p>This is the most validated computer model.</p>	<p>Only provides fluid movement (wind).</p> <p>No interaction between particles (roughness).</p> <p>Transportation or dissipation parameters are not included.</p>
k-w	<p>Similar to k-ε turbulent but, in addition, includes the Coriolis effect and introduces changes in roughness due to altitude.</p>	<p>Compared with the previous model, this also provides a good study of flows with strong separation between layers. Focused on the aerospace industry.</p>	<p>Introduces the parameter roughness.</p>
RNG	<p>Modified k-ε model modified. Renormalisation of the Navier-Stokes equations and two others that define the generation and dissipation of transport.</p> <p>Includes more interaction between particles.</p>	<p>Distinguishes between the zone and the recirculation flow. Handles the viscosity of eddies using velocity, temperature and amount of turbulence.</p>	<p>Most complete model, relates the movement of the fluid (including roughness) with its potential transport. Suitable for the study of saltation and creep.</p>
RSM	<p>Generic model that contemplates a wider scope.</p> <p>Entails higher computational cost due to increased number of interactions. Not as valid as previous models.</p>	<p>Can be applied to most industrial flows, including jets, non-circular ducts and flows with great curvature.</p> <p>Problematic in axisymmetric jets and unconfined recirculating flows.</p>	<p>The most complex model.</p> <p>Models production, dissemination, transport and rotation parameters.</p> <p>Excessive computational complexity.</p>
LES	<p>Discusses the behaviour of large scales through the flow equations as well as time-dependent model the effects of small scales. Equations based on spatial filtering.</p>	<p>Simulation of large-scale eddies. Suitable for complex flows.</p>	<p>Valid in analysis of suspension transport.</p>
DES	<p>Detached Eddy Simulation.</p> <p>Modifies the scale of study, enabling a mixed study covering both large and small scales eddies.</p>	<p>Principal application is the resolution of complex flows in which it is either impossible or very difficult to separate regions (remote or edge) of the atmospheric layers.</p>	

8. Ingeniería de control de los sedimentos eólicos

Cuando se realizan proyectos en regiones desérticas, especialmente grandes infraestructuras lineales que pueden suponer un importante barrera para el flujo eólico natural, es importante tener en cuenta que el problema particular que se presenta debido al movimiento de la arenas debe ser evaluado de manera individual para el lugar concreto en el que se produce mediante un proyecto de medidas correctoras "a la medida". No son en absoluto válidas las generalizaciones, y muchos fracasos lo corroboran. Basándonos principalmente en Pye y Tsoar (1), los principales objetivos que se deben alcanzar mediante las medidas correctoras aplicadas, son los siguientes:

- Reducción del suministro de arena y, si es posible, eliminación de la fuente de suministro de arena, lo cual puede implicar actuar sobre las áreas sometidas a deflación, alejadas de la infraestructura que se desea proteger.
- Aumentar la velocidad del viento y de circulación de arena en aquellas zonas donde el aporte no se pueda controlar, evitando que se deposite en la obra.
- Desviar el flujo de arena en movimiento de la zona a proteger si no se puede controlar el aporte y favorecer su circulación.
- Disminuir la velocidad del viento y de circulación de arena y provocar el depósito en las zonas que se considere oportuno, para evitar su llegada a la obra.
- Estabilización, disipación o eliminación de las dunas móviles.

Las principales medidas empleadas para minimizar los efectos y poder alcanzar los objetivos anteriormente descritos, se basan en estos procedimientos principales o estrategias:

- Prevención, con un diseño adecuado del trazado, evitando zonas potenciales de afección y con terraplenes y estructuras optimizados.
- Reducción de la velocidad del viento sobre la superficie mediante la construcción de vallas u otros obstáculos de protección.
- Estabilización mediante tratamientos de la superficie para aumentar su rugosidad y, por tanto, la velocidad umbral.

- *Deflection of moving sand from the protected area if sand supply or movement enhancement cannot be controlled.*
- *Reduction of wind velocity and sand movement, causing deposition in appropriate areas and avoiding the arrival of sand in the working area.*
- *Stabilisation, dissipation or removal of moving dunes.*

The main measures used to minimise the effects and achieve the goals previous described are:

- *Prevention: proper design of the alignment and cross-sections of the embankment and structures.*
- *Reduction of the wind velocity: over the surface area by the construction of fences or other protective barriers.*
- *Stabilisation: treatment of the surface to increase the surface roughness and consequently the threshold velocity.*
- *Land management: to minimise disturbance to the surface and encourage formation of a wind stable surface layer.*

In the specific case of the protection of railway infrastructure, the most frequently adopted systems consist of one or more protection areas alongside and parallel to the railway line varying (in magnitude and distribution) in line with the degree of impact. According to the available literature (16), (26), the most effective protective measures are, fixing or stabilising and capturing the sand (or a combination of both). Each of these strategies has its own peculiarities and applications, e.g., sands should be fixed away from the railway line whereas protective measures should be applied much closer to it.

It is impossible to completely eliminate the impact on infrastructure, especially when dealing with very fine sediment. It is however possible to reach acceptable values. Some tender documents of railway construction set the following values:

- *Sand rate over the line < 3 ton/y*
- *Sand removal period between fence lines one month or more*
- *Total maintenance time due to sand removal <15% of the total year*
- *Sand mitigations shall be designed to last 30 years without maintenance except sand removal*

- Gestión del territorio, con el fin de minimizar la perturbación a la superficie y fomentar la formación de una capa de viento estable en la superficie.

En el caso particular de protección de infraestructuras ferroviarias, los sistemas generalmente adoptados constan de una o varias zonas de protección a lo largo y paralelo a la vía férrea que varían (tanto en distribución como en magnitud) en función del grado de afección. Según las experiencias consultadas en la bibliografía (16), (26), las dos medidas más eficaces para protección son la fijación o estabilización y la captura de la arena (o una combinación de ambos). Cada una de estas estrategias tiene sus condiciones y campos de aplicación, ya que mientras la fijación de las arenas puede llevarse a cabo lejos de la línea ferroviaria, las medidas de protección y fijación deben ser aplicadas mucho más cerca de la misma.

La eliminación completa de la afección a una infraestructura es imposible, especialmente cuando se trata de sedimento muy fino. Pero sí es posible llegar a valores aceptables. En el caso de ferrocarriles, algunos Pliegos de Condiciones para su construcción fijan los siguientes valores (37):

- Tasa de transporte sobre la línea <3 t/año
- Capacidad de los dispositivos de retención que no exija más de una limpieza mensual
- El mantenimiento debido a las medidas de mitigación de la arena no supondrá más del 15% del tiempo anual
- Vida útil de los dispositivos y medidas de defensa sin mantenimiento, excepto la retirada de la arena, 30 años.
- <10% en volumen de contenido de arena en el balasto a la entrega de la obra
- <30% en volumen de contenido de arena en el balasto a los 10 años de la puesta en servicio

8.1. Prevención

Durante la fase de diseño del proyecto, deben tomarse las primeras decisiones en lo que respecta a la prevención de los daños causados por las arenas eólicas. El trazado debe evitar las zonas de potencial afección por arenas en movimiento. Aquí son de aplicación las técnicas de sensores remotos y geomorfológicas mencionadas anteriormente: Ningún trazado

- 10% maximum of sand by volume in ballast at taking over
- 30% maximum of sand by volume in ballast after 10 years.

8.1. Prevention of wind-blown sand

During the project design, the first decisions regarding the prevention of wind-blown sand damage should be taken in order to adjust the route to avoid the areas of moving sands. The remote sensing and geomorphological techniques previously described have a practical application here - No track or alignment should be designed without a prior geological and geomorphologic study.

Unfortunately, the experience of the authors in some of the recently designed railway lines in Spain is that geological (and hydrogeological) features are taken into account neither by the relevant Government Agency nor by the designer, until later phases.

If certain areas cannot be avoided, the design of the embankment should be designed with appropriate schematic cross-sections, to prevent or reduce damage. In general, the smaller and softer the slope of the embankment (especially on the leeward side) the lower the probability of sand encroachment.

For high-embanked railways over which airflow is accelerated, efforts must be made to control sand transport at a distance from the track and thereby achieve reduced sand transport over the railway. For small to medium embankments, in desert regions, flat slopes in the range of 1:5 to 1:6 with round- or chamfer-shaped top shoulders (16) are necessary. These flat slopes help to streamline wind flow.

Cuttings require flatter slopes (perhaps 1:10) to avoid leeward eddies and are usually supplemented by devices, for example fence or earth ridge, installed just outside the cut and on its windward side to collect sand transported.

In the same vein, structures along the railway alignment should be designed to be as open as possible with minimum sized columns to allow maximum free flow of the wind. It should be noted that the special design elements required for desert regions are responsible in most cases for the significant additional costs. A vertical structure incorrectly positioned, such as a masonry wall, will produce the opposite effect - the sand will accumulate on the

debe proyectarse sin un estudio geológico y geomorfológico previo.

Desgraciadamente, la experiencia de los autores en algunas de las líneas ferroviarias que se han proyectado en los últimos años en España, es que los aspectos geológicos (e hidrogeológicos) a veces no son tenidos en cuenta ni por el proyectista ni por la Administración hasta una fase mucho más avanzada.

En el caso de que no se pueda evitar pasar determinadas zonas, se puede ajustar el diseño del terraplén con un esquema apropiado de las secciones transversales que evite o disminuyan la afección. En general, cuanto menor altura y más suaves sean las pendientes del terraplén (especialmente a sotavento), menor probabilidad tiene de ser aterrado por la arena.

Para terraplenes de gran altura, sobre los cuales se acelera el flujo de aire y la capacidad para transportar arena a barlovento y de depositarse en su coronación y a sotavento, los esfuerzos deben centrarse en controlar el transporte de arena y alejarla del trazado del ferrocarril. Con rellenos de menor altura, son necesarios taludes con pendientes inusualmente tendidas, 1V:5H a 1V:6H, con hombros altos y redondeados (26). Estas pendientes suaves ayudan a optimizar el flujo eólico.

Para el caso de los desmontes requerirán pendientes todavía más suaves, del orden del 1V:10H para evitar los remolinos a sotavento, que además se suelen complementar con dispositivos para recoger la arena transportada por el viento en coronación.

En el mismo sentido, las estructuras a lo largo del trazado deben ser lo más abiertas posibles, con pilas o apoyos de reducidas dimensiones para permitir el máximo flujo libre de viento. Una estructura vertical dispuesta de manera inadecuada, como por ejemplo un muro de fábrica a barlovento, producirá el efecto contrario al deseado, se acumulará arena a sotavento del mismo, es decir, sobre la línea ferroviaria o su zona de influencia.

Aunque a primera vista estos diseños inusuales puedan parecer muy caros por el gran aumento que supone la partida de movimiento de tierras en la obra, solamente un análisis técnico-económico detallado, apoyado en un modelo matemático de simulación hecho "a medida" para cada una de las obras individuales, puede decirnos si realmente son baratos comparados con los gastos de mantenimiento de la infraestructura a lo largo de su vida útil.



Fig. 9. Flujo de arena cruzando la autopista Jeddah-Riyadh, facilitado por un diseño apropiado del trazado. Fotografía de los autores/Wind-blown sand crossing the Jeddah-Riyadh Expressway, enhanced by appropriated design. Photograph taken by the authors.

leeward side of the railway line and its area of influence.

At first sight the unusual designs may appear very expensive due to the large amount of the budget dedicated to earthworks. However only a detailed technical and economic analysis, supported by a mathematical simulation model "customised" for each of the individual works, can compare the true cost versus the cost of maintaining the infrastructure throughout its life.

Desert sand and dust is a growing hazard due to the increase in construction in remote regions. In the case of Haramain railway, the removal of vegetation (which controls the movement of the sand), altering the natural desert pavement (which protects the loose sand below) and the removal of basalt blocks dotted throughout the desert to produce crushed aggregate can all generate new sources of sand. This could lead to increased maintenance costs of the line.

8.2. Ditches

A wide ditch at the foot of the slope was suggested and used by Redding & Lord in the Riyadh-Dammam highway project in Saudi Arabia (27). The excavation of ditches and trenches windward of a railway line can provide a high degree of protection from wind-blown sand. While a ditch will trap all the sand grains moving through

La arena y el polvo del desierto constituyen un riesgo creciente debido al incremento de la construcción de grandes infraestructuras en regiones remotas. En el caso del ferrocarril Haramain, la eliminación de la vegetación que controla el movimiento de la arena por los desbroces, la alteración del pavimento natural del desierto (que protege la arena suelta debajo) por los movimientos de tierras y la práctica habitual de recogida de los bloques basalto que tapizan el desierto para la producción de árido de machaqueo pueden llegar a generar nuevas fuentes de arena. Esto podría llevar a un aumento en los costes de mantenimiento de la línea.

8.2. Trincheras

La utilización de zanjas al pie del talud de los terraplenes fue propuesta por Redding y Lord en el proyecto de la autopista Riyadh-Dammam, en Arabia Saudita (27). La excavación de dichas trincheras a barlovento de la infraestructura proporciona un alto grado de resguardo contra la arena arrastrada por el viento. La trinchera atrapará todos los granos de arena que se desplacen por la superficie mediante arrastre y saltación siempre y cuando cuente con una anchura mayor que el máximo salto horizontal de un grano de arena y con un volumen suficiente para recibir una gran cantidad de arena, con un promedio anual de varias decenas de metros cúbicos por metro lineal de trazado. Esto obliga a excavar trincheras de decenas de metros de anchura, y a efectuar anualmente un movimiento de tierras importante exclusivamente en labores de mantenimiento. La efectividad de la obra es mayor si se deposita el material extraído en una mota (denominada *draa* en árabe) junto a la excavación y a barlovento (24)

La trinchera es barata de construir y fácil de diseñar (28), pero sólo es útil para una protección a corto plazo (29). Éste método ha probado ser costoso a la larga ya que requiere un mantenimiento continuo (26), (13). El material retirado debe ser vertido a un lugar donde no suponga una amenaza para el trazado, para lo cual hay que conocer perfectamente el régimen interanual de vientos.

En Arabia Saudí, Abdulmalik (13) calculó un coste de retirada de arena para el año 2005 de 0,5 dólares a 2 dólares EE.UU./m³, dependiendo del método. Sin embargo, este precio se verá incrementado si la eliminación de la arena se realiza de una manera inadecuada.



Fig. 10. Flujo de arena que discurre a través del lado sotavento de un marco de drenaje, aterrándolo parcialmente, en la zona de Rabigh del ferrocarril Haramain. Fotografía de los autores/Leeward side of a culvert near Rabigh, with sand crossing and encroaching on the boxes. Photograph taken by the authors.

surface creep and saltation, it must be wider than the maximum horizontal jump of saltating grains and sufficiently big to hold a great volume of sand, an annual average of a several tens of cubic metres per metre. This requires the digging of trenches several tens of metres wide, and carry out significant earthmoving on an annual basis just for maintenance. The effectiveness of the work will be greater if the extracted material is deposited on a ridge, draa in Arabic, alongside the excavation and on the windward side (24).

Ditches are low-cost and easy to engineer (28), but are only useful for short-term protection (28). This method proves to be expensive as it requires continuous and expensive maintenance (26), (13). The excavated material must be removed to a location where it will not present a hazard for the railway line and for this reason, it is necessary to have an intimate knowledge of the inter-annual wind regime.

Abdulmalik (19) estimated that the cost of removing sand from ditches in Saudi Arabia in 2005 to be 0.5 - 2 US\$/m³, depending on the method of removal used. However, incorrect sand removal to the wrong location will result in a type of sand recycling process.

Watson (29) calculated the annual cost of removing dunes to be very high. A dune 6 m high may contain 20,000-25,000 m³ of sand, weighing between 30,000 - 45,000 t. The alignment of the Haramain

cuada, eligiendo un vertedero equivocado que puede dar como resultando el reciclaje eólico de la arena.

Para la retirada de dunas que amenacen el trazado, Watson (29) calcula un coste anual alto, ya que una duna de solo 6 m de altura tiene entre 20.000 y 25.000 m³, con un peso de 30.000 a 45.000 t. Los 120 *barhanes* por km² que amenazan el trazado del ferrocarril Haramain en algunas zonas entre Jeddah y Rabigh supondrían con estas cifras un volumen cercano a 2,5 hm³.

8.3. Barreras de arena y grava

La construcción de motas de arena-grava en las zonas de barlovento y relativamente alejadas (decenas de metros) de la infraestructura a proteger es un método que se ha probado con éxito (29). Estas barreras tienen dos funciones principales: La más importante es aumentar la rugosidad de la superficie a fin de reducir la velocidad del viento a nivel del suelo, controlar la erosión eólica y el arrastre de arena, disminuyendo así la capacidad de transportar arena por el viento y favorecer la deposición de la arena detrás de la barrera. La otra posible función es la protección de plantas sembradas entre las barreras. Es común instalar en el área de trabajo varias filas paralelas de barreras de manera perpendicular a la dirección dominante del viento, para aumentar la rugosidad del terreno y controlar mejor la arena.

Estos tipos de barreras son una buena elección si hay disponible una cantidad importante de materiales, como es el caso del ferrocarril Haramain. Pero también hay que destacar que este tipo de barreras, cuentan con una vida corta si no se protegen y mantienen, por lo general 8-10 años (30), además de que se deben instalar junto con otras medidas de control.

8.4. Vallados

El movimiento de arena por el viento puede ser interrumpido o desviado por las barreras verticales o vallas, lo que lleva a la arena a depositarse alrededor de los obstáculos en vez de enterrar la vía férrea. El depósito de la arena tiene lugar debido a la caída repentina de la velocidad del viento en las cercanías del obstáculo. Las vallas se utilizan para provocar la deposición de la arena en sus proximidades, se instalan perpendicularmente a la dirección del viento y suelen ser parcialmente permeables.

railway line has, in some areas between Jeddah and Rabigh, more than 120 barchans per km², which would give an approximated volume of 2.5 hm³.

8.3. Sand-Gravel Barriers

The construction of sand-gravel ridges in windward areas and tens of metres from the infrastructure to be protected has proven to be highly successful (29). These barriers have two main functions. One is to increase the surface roughness to reduce wind speeds at the ground level, thereby controlling wind erosion and sand entrainment, lowering the wind's sand-carrying capacity, and promoting deposition of the sand flow behind the barrier. The second function is to protect seedlings of planted grasses between the barriers. In this area, it is also common to deploy multiple parallel rows of sand-gravel barriers to increase the roughness of the ground and in so doing control the sand more effectively.

These kinds of barriers are a good choice if large amounts of construction materials are available, as in the case of the Haramain railway. It should be noted that this type of barrier has a short lifespan, typically 8-10 years (30), and should be installed alongside another control measures.

8.4. Sand Drift Fences

Wind-blown sand can be intercepted by upright sand-resistant fences or barriers, which cause the sand to be deposited along the fences rather than burying the railway. Sand deposition takes place due to the sudden drop in the airstream speed near the fence. Sand drift fences are used to deposit sands in their vicinity. They are installed perpendicular to the wind direction and are partially permeable to the wind.

Wind tunnel experiments (31) and (32) show that fence porosity (ratio of the area of fence pore to the total area) plays a key role in the efficiency of the protection provided. Other authors have found that the shelter efficiency of fences is determined by factors that include fence height, overall porosity, porosity distribution, and orientation. As Abdoulmalik (13) points out, the optimum porosity for the Arabian Desert is in the range 40-60% with a potential accumulation of 10 (H)² m³ per metre length (H



Fig. 11. Trinchera para captación de arenas situada a barlovento del ferrocarril Haramain. Fotografía de los autores/ Ditches for trapping sand on the windward side of the Haramain railway embankment. Photograph taken by the authors.

Los experimentos llevados a cabo en túnel de viento (31) y (32) muestran que la permeabilidad al viento de la valla juega un papel clave en la eficiencia de la protección que proporciona. Otros autores concluyen que la eficiencia se determina por factores que incluyen tipo de valla, altura, permeabilidad total, distribución de la permeabilidad y orientación. Como Abdoulmalik señala (13), la permeabilidad óptima para el desierto arábigo es del 40% al 60%, para una capacidad de retención expresada en m^3 por metro de longitud de $10H^2$, siendo H la altura de la valla. El coste de las vallas aumenta con la disminución de la porosidad.

Las vallas dispuestas a modo de cordones paralelos, tienen que ser renovadas cada pocos años ya que la arena se acumula inmediatamente en los alrededores una vez que se instalan en perpendicular a la dirección dominante del viento, por lo tanto su coste unitario ha de ser bajo. Pero como se suelen instalar a cierta distancia de la infraestructura, la sustitución no interfiere con la explotación de la línea.

8.5. Estabilización con piedra

Por estabilización se entiende aquel proceso tendente a inmovilizar tanto las dunas como el flujo dis-

being the fence height). The cost of fences increases with decreasing fence porosity. Fences are installed in parallel rows and have to be renewed every few years because sand will accumulate immediately nearby once they are set perpendicular to the wind direction. For this method to be viable the unit cost must be low. However as the fences are usually installed at a distance from the infrastructure, their substitution will not interfere with the operation of the line.

8.5. Gravel covering

The purpose of sand stabilisation or fixing dunes is to solidify or cover the sand surface to avoid wind erosion. This is achieved by cutting off the contact between wind and the sand surface, and increasing the surface roughness to raise the threshold velocity.

Gravel surfaces can control soil loss brought about by wind erosion by trapping windblown sand/dust (33). An example from nature is reg surfaces, natural pebble pavements that can be found in many desert areas. It may have been formed by upper layers of sand being wind-blown or by fluvial streams. This is a natural example of gravel

perso de arena eólica, bien evitando el contacto entre el viento y el sedimento, bien incrementando la rugosidad del terreno para aumentar la velocidad umbral.

Las superficies cubiertas con grava pueden controlar la pérdida de suelo provocada por la erosión eólica, al impedir la deflación de la arena y polvo (33). Existen ejemplos naturales de este tipo de superficies como son el *Reg*, que es un pavimento natural de piedra que se puede encontrar en muchas zonas desérticas. Pueden haberse generado por deflación de la arena superior o por las corrientes fluviales. En este tipo de pavimento desértico, las dunas no se forman fácilmente, según lo observado por nosotros en el Sáhara Occidental, donde extensas áreas libres de dunas están pavimentadas por cantos fluviales aplanados y redondeados, pulidos por el viento.

Este tipo de superficies se utilizan ampliamente con fines ingenieriles y poseen un efecto de prevención notable si se instalan al pie de los terraplenes de las obras lineales. La grava que se emplea para cubrir la superficie de la arena debe ser de 5-8 cm de tamaño (33) y si no hay material natural disponible, se puede utilizar con la misma eficacia una cubierta de escoria, escombros de mina u otros residuos.

La medida ha demostrado ser resistente, duradera, y capaz de aguantar el viento y el calor además de retener el agua. Tras años de utilización, el efecto de barrera contra el viento y de fijación de la arena puede seguir siendo bueno, pero si no se cubre suficientemente la superficie con piedra, la delgada capa de guijarros puede ser arrastrada por el viento, exponiéndose de nuevo la superficie de arena original y convirtiéndose en una nueva fuente de arena (33).

8.6. Estabilización con vegetación viva

La vegetación aumenta la rugosidad de la superficie con arena dispersa o de la superficie de las dunas, dificultando el proceso de saltación y también evitando que los materiales erosionables que se encuentran en la superficie estén directamente expuestos a la acción del viento. Es una solución ambientalmente recomendable, es muy eficiente especialmente si se combina con otros métodos, es poco costosa una vez implantada, y se auto-repara. Hay que indicar que las especies seleccionadas deben tener una velocidad de crecimiento mayor que la tasa de acumulación de arena. Pero resulta ser poco práctica y



Fig 12. Mota cubierta con encachado para protección en lado barlovento del ferrocarril Haramain. Fotografía de los autores/Stone covered sand barrier on windward side of the embankment. Photograph taken by the authors.

surface in which dunes are hardly present, as observed by us in the Western Sahara where large areas free of dunes are paved by flattened and round edged gravel which has been polished by the wind.

Gravel surfaces are widely used in engineering where if installed at the foot of embankments they have a notable preventative effect. The gravel covering on the surface of the sand should be 5-8 cm thick. If stone is not available, slag covering can be used just as effectively, with a reduced material and labour cost.

This design has been shown to be rugged, durable, and able to resist wind and heat, and retain water. After many years in place, the windbreak and sand-fixation effect can still be good. However, if not enough stone is used, the thin cover layer of pebbles and macadam could be blown away by strong wind-blown sand re-exposing the original sandy surface, which will then become a new source of sand (33).

8.6. Vegetation

Vegetation increases the surface roughness of the sand sheet or sand dune surface thereby halting the migration of sand. Planting grasses between protection barriers can avoid erodible surface materials being directly exposed to the

costosa cuando se utiliza en pleno desierto con tasas de precipitación muy bajas, donde solamente especies endémicas de crecimiento lento sobreviven. Por ello, la utilización de vegetación puede ser considerada como una solución viable solamente donde sea posible irrigar los plantones, de manera que arraiguen y crezcan rápidamente. Por ejemplo, en las proximidades de áreas habitadas, donde se pueden utilizar aguas residuales tratadas para el riego especies herbáceas y arbustivas. La vegetación también está recomendada donde el agua subterránea sea de una calidad razonablemente buena (aguas salobres) y se cuente con un fácil acceso a la misma (34).

Como se ha dicho, la vegetación recién plantada necesita ser regada en clima muy árido. A lo largo del trazado del ferrocarril Haramain, este riego podría ser realizado mediante agua residual tratada proveniente de Jeddah, Meca o Medina, y se puede transportar por el propio ferrocarril en vagones cisterna durante el horario de baja circulación de trenes.

8.7. Estabilización con residuos vegetales

Otro tipo de solución al problema, la estabilización con residuos vegetales, se aplicó por primera vez con éxito en la línea de ferrocarril Baotou-Lanzhou que cruza el desierto de Tengger en China (35) y ha sido ampliamente utilizado desde entonces para la fijación de arenas y dunas en diversos proyectos.

Este tipo de cubiertas cambia la estructura del flujo de aire y la rugosidad de la superficie del suelo, pasando de una situación de erosión a sedimentación. Debido a dicha sedimentación de partículas finas, se forma una costra que da lugar al comienzo de la formación de un suelo (36).

Se utilizan materiales flexibles y de muy bajo precio, tales como paja de arroz y de trigo, cañas y ramaje de la poda de especies arbustivas o arbóreas, que se clavan en la capas de arena de las dunas de forma vertical, formando retículas a modo de tablero de damas. La altura de los tallos y las dimensiones de las retículas son los factores clave en el diseño de estas medidas e influyen directamente en el efecto de la fijación de la arena.

En China para con este fin se utilizan tallos de unos 50-60 cm de longitud, colocándose los materiales de manera vertical para conformar lados del tablero. Las dimensiones óptimas del enrejado varían de 1 x 1 m de lado hasta 2 x 2 m, dependiendo del viento y las condi-

wind and can thus reduce sand entrainment. This measure is an environmentally recommendable solution, as well as being the most efficient mitigation measure especially in combination with others. It is also the least expensive, and is self-repairing. It should be noted that the species selected should have a higher growth rate than the sand accumulation rate, but this turns out to be impractical and costly when used in the desert with very low precipitation rates, where only slow growing endemic species survive. Vegetation may only be considered to be viable in the vicinity of inhabited areas, where treated sewage water can be used for irrigation and to enable grass and bushes to take root and grow quickly. Artificial vegetative measures are recommended where the ground-water is of reasonably good quality and easily available (34).

As said before, in a very arid climate newly planted vegetation needs irrigation. Along the Haramain track, artificial irrigation can be provided using treated waste water coming from Jeddah, Makkah or Al-Madinah, and transported in tank wagons during periods of low train traffic.

8.7. Straw checkerboard barrier

Another proposed solution, that of using straw barriers, was first successfully applied to the experimental subgrade of Baotou-Lanzhou railway across the Tengger Desert, China (35) and has been widely used in sand and dune fixation projects since then.

Using a straw checkerboard changes the structure of the airflow and modifies the ground surface status from erosion to deposition. Owing to the deposition of fine particles, a soil crust is formed and soil formation begins (36).

Soft materials, such as rice straw, wheat straw, and reed are inserted vertically into the sand layer of dunes and form semi-covert straw checkerboard sand barriers. The height of the straw and the side length of the checkerboard are the key design factors that directly influence its effect of sand fixation.

In China wheat, rice straw or reeds 50-60 cm in length are used for this purpose. The materials are placed vertically to form the sides of the checkerboard. The optimum dimensions range from

ciones locales de transporte de arena. Los tamaños menores se emplean en aquellas zonas con vientos más fuertes. En algunas áreas de China, en el diseño de la red se sustituyen los tallos por rocas dispuestas de la misma manera con el mismo propósito. Estas medidas son baratas y eficaces (34).

8.8. Estabilización con productos artificiales

Recientemente, estos materiales están siendo reemplazados por petróleo, asfalto, cal, resinas, látex y otros productos químicos comerciales. La función de estos fijadores es cementar superficie de la arena a fin de aumentar la resistencia a la erosión por viento de la capa superficial. La durabilidad de cualquier tratamiento químico aumenta con su resistencia y grosor del material. Estos tratamientos químicos suelen ser eficaces a la hora de estabilizar arenas y dunas, pero varían en coste, efectividad a largo plazo e impacto ambiental.

Los materiales deben contar con un bajo coste, resistencia a la erosión del viento y al agua, permeables, no tóxicos y fáciles de aplicar. La mayoría de los productos descritos demuestran ser eficaces, pero su coste es prohibitivo, por lo que solo se utilizan puntualmente para la consolidación de los taludes de terraplenes de obras lineales, disminuyendo la rugosidad de los mismos para favorecer el transporte de arena (34). La completa cubrición de una duna con estos productos químicos (o una cubrición parcial) logrará la estabilización de la misma en un plazo de tiempo relativamente corto.

El riego con agua salada puede utilizarse también de manera satisfactoria para este fin ya que la cristalización de sales actúa como un agente ligante. Sin embargo, tiene las desventajas de ser un proceso laborioso y relativamente costoso. Las costras salinas que se forman son efímeras, se destruye con facilidad por la lluvia y los vientos fuertes, el paso de animales, peatones y vehículos.

9. Conclusiones

La finalidad de este trabajo es de proporcionar una breve introducción teórica al transporte eólico de sedimentos, exponiendo los modelos numéricos actuales del CFD (Computational Fluid Dynamics), además de describir las medidas de contención y

1 x 1 m to 2 x 2 m, depending on local wind and sand transport conditions and as a preliminary approach, smaller grids are installed in areas of stronger winds. In some areas of China, the straw checkerboard has been replaced by rocky checkerboard with the same design and purpose. The use of reed or straw checkerboards is a cheap, convenient and effective measure (34).

8.8. Other coverings

More recently oil, bitumen, lime, resin, latex, and other commercially formulated chemicals have been used to provide stabilisation. The function of sand fixers is to cement the surface of the sand to increase the resistance of the upper sand surface to wind erosion. The durability of any chemical treatment increases with the resilience and thickness of the material. Oil, bitumen, latex, and other chemical treatments are usually effective in stabilizing sand and dune surfaces but vary in their long-term cost effectiveness and environmental impact.

The materials used should be low cost, resistant to wind and water erosion, permeable to surface water, non-toxic and easy to apply. Most chemical fixers are effective but their cost is prohibitive, so they are primarily used to consolidate the side slopes of high road embankments by forming round and smooth cross-sections favourable for sand transport (34). The complete mantling of a dune with these chemicals or gravel (or partial mantling) achieves stabilisation of the same in a relatively short period of time.

Saline water can be used for this purpose since on crystallisation the salt acts as an additional binding agent. However, spraying has the disadvantages of being labour intensive and relatively costly. Also, the salt crusts that form are ephemeral, being easily destroyed by rain, strong winds, pedestrians and vehicles.

9. Conclusion

The aim of this paper, is to provide a brief introduction to the theory of aeolian sediment transport, explaining the CFD or Computational Fluid Dynamic models currently available, as well as

prevención de la acción eólica que se llevan a cabo en escenarios similares.

Aproximadamente 197 km de la línea de ferrocarril Haramain potencialmente pueden sufrir problemas derivados del transporte eólico de arena y polvo, de los cuales alrededor de 20-25 km se encuentran en riesgo de aterramiento por dunas, según nuestro estudio geomorfológico preliminar.

Se requiere por tanto, la realización de un estudio para valorar la acción eólica sobre el ferrocarril de alta velocidad Haramain actualmente en construcción, y establecer así un escenario base para proyectar las medidas correctoras pertinentes que optimicen las labores de mantenimiento. Como se ha expuesto, dicho estudio ha de ser específico para cada una de las zonas donde exista riesgo, no siendo extrapolables los resultados de estudios realizados en otros lugares. ♦

describing the prevention and control measures against wind action that are being carried out in similar scenarios.

According to our preliminary geomorphological studies, about 197 km of the Haramain railway line currently under construction, could potentially be threatened by problems associated with wind-blown sand and dust. Of these, about 20-25 km are at risk of encroachment by dunes.

It is therefore clear that a study on wind-blown action is required for the Haramain high-speed railway. This can be used as a baseline scenario on which appropriate control measures may be projected to optimise maintenance. As we have explained, this study must be specific to each of the areas at risk, as the results from one area may not be extrapolated to another. ♦

Referencias:

- (1) PYE, K. ;TSOAR, H., "Aeolian sand and sand dunes". Berlin 2009: Springer-Verlag, 2009, 451 p. ISBN 978-3-540-85909-3.
- (2) O'BRIEN, M. P. RINDLAHUB, B. D. "The transportation of sand by wind". Civil. Eng. 6, 325-327, 1936.
- (3) BAGNOLD, R. A., "The Physics of Blown Sand and Desert Dunes", London, Methuen & Co., 1941.
- (4) BELLY P.Y. "Sand Movement by Wind". U S Army Coastal Engineering Research Center, 1964.
- (5) JONES D. K. C. et al. "Geomorphological investigation, for engineering purposes, of blowing sand and dust hazard". Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1986.
- (6) FRYBERGER S. G. "Dune Forms and Wind Regime". Geological Survey Professional Paper 1052, 1979.
- (7) MCKEE E. D. "A Study of Global Sand Seas". Geological Survey Professional Paper 1052, 1979.
- (8) SHAO Y. "Physics and Modelling of Wind Erosion" Springer Science, 2008.
- (9) ZHENG X. "Mechanics of Wind-blown Sand Movements". Springer, 2009.
- (10) PARSONS A. J. and ABRAHAMS A. D. "Geomorphology of deserts environments". Springer, 2009.
- (11) WALKER M.J. (ed.). "Hot Deserts: Engineering, Geology and Geomorphology". Geological Society, London. Engineering Geology Special Publication, 25, 2012.
- (12) ANONIMO. "HARAMAIN: el AVE del desierto". Itransporte, noviembre-diciembre, 2011
- (13) ABDULMALIK A et al. "Sand Control Measures and Sand Drift Fences". Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005.
- (14) AL-HARTHI A. A. "Geohazard assessment of sand dunes between Jeddah and Al-Lith, western Saudi Arabia". Environmental Geology, 42, 360-369, 2002.
- (15) BURNETT, W. "Comments on Railway Embankment Wind-Sand-Driven Analysis". Unpublished report. August 26, 2009.
- (16) ZHANG C.-L. et al. "Engineering measures to control windblown sand in Shiquanhe Town, Tibet". J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 95, 2007.
- (17) LAITY J. "Deserts and Desert Environments". Wiley-Blackwell, 2008.
- (18) KOK, J. F. and RENNO, N. O. "Electrostatics in Wind-Blown sand". Physical Review Letters, 100, 04501, 2008.
- (19) HSU S.A. "Wind-blown Sediment Transport". U.S. Army Corps of Engineers, 1998.
- (20) FRYREAR, D. W. "A field dust sampler". J. Soil Water Cons. 41(2), 117-120, 1986.
- (21) DONG Z. et al. "Monitoring sand dune advance in the Taklimakan Desert". Geomorphology. Elsevier, 2000.
- (22) GOOSSENS D. et al. "Wind tunnel and field calibration of five aeolian sand traps". Geomorphology 35, 2000.
- (23) GREEN, J. "Haramain High Speed Rail. Railway Embankment Wind-Driven sand Analysis". Unpublished report. August, 17, 2009.
- (24) GREEN, J. "Haramain High Speed Rail. Railway Embankment Wind-Driven sand Analysis. Adendum Report". Unpublished report. June 23, 2010.
- (25) P.R. SPALART y S.R. ALLMARAS, "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows", AIAA Paper, 92-0439, 1992.
- (26) STIPHO. A. S. "Aeolian sand hazards and engineering design for desert regions". Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 25 (2), 83-92, 1992.
- (27) REDDING, J. & LORD, J. "Designing for the effects of windblown sand along the new Jeddah-Riyadh-Dammam expressway". Unpublished Proceedings of the Symposium on Geotechnical Problems in Saudi Arabia, King Saud University Riyadh, 363-395, 1981.
- (28) YANG Y. et al. "Prevention and management of wind-blown sand damage along Qinghai-Tibet Railway in Cuonahu Lake area" Sciences in Cold and Arid Regions, 2011.
- (29) WATSON A. "The control of windblown sand and moving dunes: a review of the methods of sand control in deserts, with observations from Saudi Arabia". Q. J. Eng. Geol. London, 18, 237-252, 1985.
- (30) ZHANG K.-c. et al. "Damage by wind-blown sand and its control along Qinghai-Tibet Railway in China". Aeolian Research 1, 2010.
- (31) ZHIWEN H. et al. "Sand harm in Taklimakan Desert highway and sand control". Journal of Geographical Sciences, 143-146, 2007.
- (32) DONG Z. et al. "Evaluating the optimal porosity of fences for reducing wind erosion". Sciences in Cold and Arid Regions, 2011.
- (33) LIU B. et al. "Controlling windblown sand problems by an artificial gravel surface: A case study over the Gobi surface of the Mogao Grottoes". Geomorphology, 134, 461-469, 2011.
- (34) DONG Z. et al. "Controlling blown sand along the highway crossing the Taklimakan Desert". Journal of Arid Environments, 57, 2004.
- (35) QIU G. Yu et al. "Principles of sand dune fixation with straw checkerboard technology and its effects on the environment". Journal of Arid Environments, 56, 2004.
- (36) LI X.R. "Sand barriers of straw checkerboards for habitat restoration in extremely arid desert regions". Ecological Engineering, 28 (2), 149-157, 2006.
- (37) ANONIMO. Form K - Technical Data. Tender documents of the Ethiad Rail Project. Stage 2. Ethiad Rail. Abu Dhabi, 2012.