

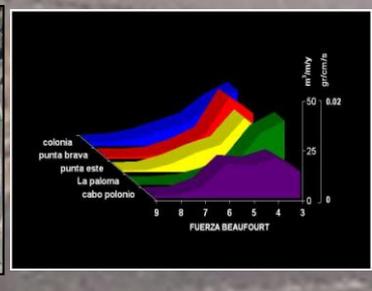
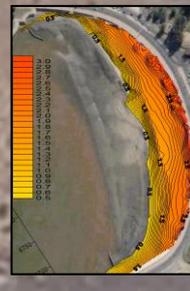
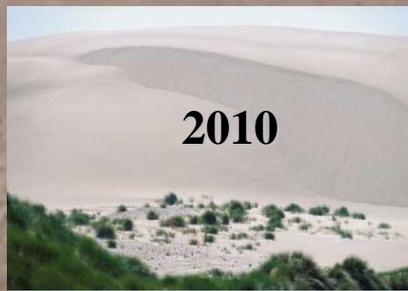
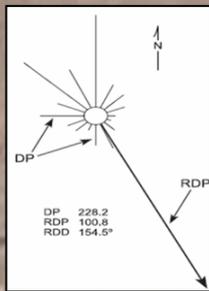
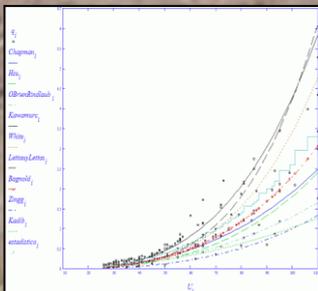
**TESIS**  
presentada por

**Gustavo Sergio PIÑEIRO BARCELÓ**

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES**  
**MONTEVIDEO, URUGUAY**

# Transporte eólico de arena en playas urbanizadas: modelos-realidad

**Orientadores:**  
**Daniel Panario**  
**Walter Norbis**



**TESIS**  
**Presentada por**

**Gustavo Sergio PIÑEIRO BARCELÓ**

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES**  
**MONTEVIDEO, URUGUAY**

***Transporte eólico de arena en playas  
urbanizadas: modelos- realidad***

**Orientadores:**  
**Daniel Panario**  
**Walter Norbis**

**2010**

# Índice

<a href="#">Índice</a>	Página 02
<a href="#">Agradecimientos</a>	Página 03
<a href="#">Resumen</a>	Página 04
<a href="#">Introducción</a>	Página 05
<a href="#">Antecedentes</a>	Página 10
<a href="#">Marco Teórico</a>	Página 25
<a href="#">Justificación</a>	Página 28
<a href="#">Preguntas a responder</a>	Página 31
<a href="#">Hipótesis</a>	Página 31
<a href="#">Objetivo general</a>	Página 31
<a href="#">Objetivos específicos</a>	Página 32
<a href="#">Metodología</a>	Página 33
• <a href="#">Área de estudio</a>	Página 33
• <a href="#">Métodos y técnicas</a>	Página 38
<a href="#">Resultados</a>	Página 43
• <a href="#">Datos del viento en estaciones meteorológicas próximas</a>	Página 43
• <a href="#">El viento en las playas durante el período de estudio</a>	Página 45
• <a href="#">Relación entre los datos de viento en las playas y en las estaciones meteorológicas</a>	Página 46
• <a href="#">Transporte potencial según Fryberger (1979)</a>	Página 48
• <a href="#">Transporte según Chapman (1990) y otros modelos</a>	Página 50
• <a href="#">Ajuste de los modelos a la realidad de las playas urbanizadas</a>	Página 51
<a href="#">Discusión</a>	Página 58
• <a href="#">Transporte según Chapman (1990) y otros modelos</a>	Página 51
<a href="#">Conclusiones</a>	Página 62
• <a href="#">Información para la gestión y manejo</a>	Página 63
<a href="#">Bibliografía</a>	Página 67
<a href="#">Anexo</a>	Página 81
<a href="#">Apéndice</a>	Página 95

## **Agradecimientos**

A la Universidad de la República del Uruguay por promover la realización de los estudios en un régimen de gratuidad ejemplar.

A mis compañeros y amigos de la Facultad de Ciencias, en particular al Dr. Carlos Céspedes-Payret, por su crítica, al Dr. Mario Caffera, que hacia el año 1992 orientó junto al Profesor Daniel Panario mis primeros pasos en la comprensión del funcionamiento de la naturaleza y la sociedad.

A los trabajadores de diversas dependencias públicas y privadas que han brindado un apoyo difícil de imaginar: en Nimbus Weather Services ©, en la Dirección General de Meteorología, la Administración Nacional de Puertos, la Armada Nacional, la Sociedad Prácticos del Puerto de Montevideo y el Departamento de Meteorología de Facultad de Ciencias.

Al profesor Ing. Héctor Goso por los comentarios y sugerencias realizadas al proyecto original.

A mi hijo Mateo por ser el fundamento de todo este esfuerzo.

## Resumen

Las playas de la ciudad de Montevideo han sufrido un gradual deterioro acompañado con el crecimiento urbano. La gestión costera precisa modelos simples y eficientes que describan los cambios en las playas para optimizar las tareas y costos de mantenimiento y conservación. En ese sentido ha sido comparado el transporte eólico previsto en 12 modelos teóricos con datos tomados con trampas y con datos compilados en la literatura especializada (velocidad del viento vs transporte). El transporte observado en la playa Ramírez osciló entre los 11 y 216 kg/m/hora en periodos en los que la velocidad del viento varió entre 8 y 15 m/s en la estación "Aeropuerto Carrasco". El transporte se ajustó significativamente al modelo de Kawamura (1951). El perfil del viento medido en la playa se asoció a un modelo de perfil del viento semilogarítmico con un punto focal teórico de 5m/s a 10mm de la superficie. Aplicados ambos modelos a datos anuales del viento de esa estación meteorológica, el transporte potencial de arena es de 15 m<sup>3</sup>/m/año y el transporte resultante de la suma vectorial de los componentes sectoriales tiene una magnitud de 6 m<sup>3</sup>/m/año y se dirige al NE (35°). Los resultados son coherentes con una concentración de la erosión en los sectores meridionales y de la sedimentación en los sectores septentrionales. La generación de dunas artificiales vegetadas y el retiro de las construcciones de la playa supramareal (a más de 100m de la línea de costa) podrían revertir la actual tendencia erosiva. Aplicado a otros sectores de la costa uruguaya, el modelo predice que las pérdidas de arena más importantes pueden suceder durante vientos fuertes poco frecuentes (Fuerza Beaufort 8, 9 o 10), lo que constituye un riesgo a considerar en el manejo costero y debiera ser estudiado.

## Introducción

La reciente tendencia mundial a la concentración de la población en la costa ha sido acompañada de un aumento del valor de las playas como sitios de recreación y esparcimiento, junto a una creciente preocupación por su estado de degradación ([Houston, 2008](#)). La conservación de las playas requiere de un manejo costero basado en datos confiables y repetibles sobre la dirección y magnitud de los cambios para armonizar los usos de la playa con los procesos naturales ([Muñoz-Pérez et al, 2001](#); [Nordstrom et al, 2000](#), [Nordstrom, 2005](#); [Houston, 2008](#)). La necesidad de relacionar el funcionamiento natural y el estado actual de las playas queda en evidencia cuando se observa en muchas costas urbanizadas el avance de la erosión por causas antrópicas evitables ([Muñoz-Pérez et al, 2001](#); [Nordstrom, 2005](#)).

La configuración y dinámica de las **playas naturales** está controlada entre otros factores por la existencia de un sistema de deriva litoral de sedimentos que, en última instancia, es sostenida por el clima de olas y las oscilaciones del nivel del mar ([Dean, 1991](#); [SCOR, 1991](#); [Davidson-Arnott y Law, 1996](#)). Estas acumulaciones de sedimentos en la costa son la fuente de arena para la creación de dunas costeras en la playa supramareal ([Davidson-Arnott y Law, 1995](#); [Namikas, 2003](#); [Davidson-Arnott et al, 2005](#)). Las relaciones entre el régimen de vientos y la orientación de la línea de costa determina si el transporte neto de arena será hacia el mar o hacia el continente ([Anthony et al, 2006](#); [Wahid, 2008](#)). En las playas enfrentadas a vientos marítimos, la vegetación retiene parte de la arena transportada por el viento, propiciando el desarrollo y evolución de una convexidad paralela a la línea de costa conocida

como cordón dunar litoral o *foreshore dune* en la terminología de [Hesp \(2002\)](#). El sedimento transportado de la playa a las dunas representa una salida en el balance sedimentario litoral y una entrada en el sistema sedimentario dunar ([Psuty, 1988a](#); [Namikas, 2003](#); [Davidson-Arnott et al, 2005](#)). Cuando los vientos fuertes provienen predominantemente del continente, o no hay arena disponible para ser transportada, el balance sedimentario puede ser negativo propiciando que las playas se erosionen, o sectores de playas carezcan de dunas y desarrollen morfologías cóncavas e inundables ([Anthony et al, 2006](#); [Wahid, 2008](#)).

En las **playas urbanizadas**, la construcción de espigones, muros, caminos de acceso, la nivelación de las dunas costeras, la realización de tareas de mantenimiento, la forestación, la canalización de ríos y arroyos, entre otras acciones, han constreñido la dinámica sedimentaria natural, propiciando un **deterioro** de sus funciones ecosistémicas, su biota y su capacidad de protección ante los temporales, favoreciendo la subsecuente erosión costera ([Carter, 1988](#), [Carter y Woodroffe, 1994](#), [David, 1994](#); [Nordstrom et al, 2002](#);; [Nordstrom et al, 2007](#), [Defeo et al, 2009](#)).

En el caso de la ciudad de **Montevideo** [Panario et al, 2008](#) estudian estos cambios causados por el avance de la urbanización (muro y rambla, rellenos, edificaciones) sobre sedimentos de la playa supramareal bajo la cota 2,5m. [Panario et al \(2008b\)](#) proponen un modelo de playa con pendientes de 2º y un sector septentrional convexo y favorable a la sedimentación. El gobierno local

ha instalado en 2007-2008 vallados en esos sectores con el objetivo de retener parte de la arena transportada por el viento a la playa supramareal y que se pierda a través de las escaleras y por encima del muro de la rambla.

Las cantidades reales de arena involucradas así como su distribución direccional son escasamente conocidas y difíciles de medir, aunque esa información sería útil para el mantenimiento y conservación de las playas y su arena. Una aproximación al problema es estimar estas cantidades con **modelos teóricos**. Según [Nordstrom \(2008\)](#) el uso de modelos del transporte de arena en playas afectadas por la urbanización es un insumo deseable para la gestión de playas y el diseño de estrategias de manejo costero. Estos modelos son importantes porque sus resultados pueden informar sobre las tasas de crecimiento de las dunas artificiales y puede explicar cuales son las zonas afectadas por la erosión, transporte y sedimentación, que derivan en la desigual topografía de la playa supramareal, vital para conocer la vulnerabilidad de la costa ante los temporales ([Anfuso et al, 2007](#)).

Los **modelos** matemáticos que describen el funcionamiento de la naturaleza están adquiriendo una relevancia creciente en las decisiones sociales involucrando a las ciencias de la tierra. El debate sobre los impactos del calentamiento climático y el aumento del nivel del mar, por ejemplo, está repleto de los resultados de modelos de circulación global y otros ([IPCC, 1996 a 2009](#)). La existencia de estas y otras preocupaciones sociales por el ambiente han resultado en un aumento del uso y mal **uso de los modelos** al intentar aproximarse a la predicción ambiental, ya que los esfuerzos de los

investigadores no están dirigidos a resolver el problema ambiental, sino a comprender las bases físicas de los procesos de cambio a través de una combinación de teoría, observación y modelado ([Thieler et al., 2000](#); [Cooper y Pilkey, 2004](#)).

Los modelos hidrodinámicos y métodos de cálculo de transporte de sedimento subacuático están ampliamente aceptados tanto en la investigación como en la gestión costera y en la evaluación de medidas de manejo (ej. [Wang et al, 1998](#)) sin embargo, la modelación matemática de los procesos por encima de la zona intermareal (en la definición de [McGlashan et al, 2005](#)) no ha sido acompañada de suficiente respaldo empírico, por lo que no existe actualmente un método de cálculo de aceptación general ([Kroon y Hoekstra, 1990](#)). Los estudios publicados en la literatura especializada, como es expuesto en antecedentes, están dedicados generalmente a evaluar la eficiencia de los modelos de transporte de arena en experimentos controlados en **túneles de viento** o en otros casos son realizados en paisajes próximos a las condiciones de laboratorio como lo son los extensos **ambientes desérticos**, donde la morfología superficial, intensidad del viento y textura del sedimento, propician que el transporte real se asemeje al transporte en túneles de viento.

Según [Sherman \(1995\)](#) los errores de las estimaciones de los modelos pueden aumentar cuando los modelos de laboratorio, basados en experimentos realizados a escala de minutos, son aplicados a periodos de semanas y años en grandes áreas de playas. Una explicación es que los modelos de transporte de

sedimento asocian variables con relaciones no lineales, por lo cual los coeficientes de ajuste varían según la escala temporal usada ([Nash, 1994](#)).

La influencia de la humedad de la arena en las playas, la presencia de obstáculos, la variabilidad estacional del viento, la presencia de superficies inclinadas y con bermas son algunas de las complejidades conocidas. El uso de velocidades del viento tomadas a una única altura, sugerida por muchos autores ([O'Brien y Rindlaub, 1936](#); [Bagnold, 1941](#); [Lee, 1987](#); [Hsu, 1988](#),) podría ser aplicada en ambientes de rugosidad conocida y homogénea, pero generalmente éste no es el caso en las playas naturales y aun menos en las modificadas por la urbanización.

El presente trabajo describe cómo el uso de modelos no ajustados con datos de terreno, como el de [Fryberger \(1979\)](#), puede llevar a estimaciones incorrectas del transporte potencial de arena en ambientes transformados por la acción antrópica, por lo que a través de una metodología consciente de las limitaciones del conocimiento y rigurosa en su evaluación de terreno, se propone un modelo simple para el uso eficiente de la información disponible del viento local, granulometría y humedad de la arena, para estimar el balance sedimentario en playas en Montevideo y evaluar las condiciones generales que influyen en el transporte de arena por el viento.

## **Antecedentes**

La importancia del transporte de arena por el viento en Cabo Polonio (departamento de Rocha) fue destacada por [Arctowski \(1901\)](#).

En 1936, [O'Brien y Rindlaub](#) publican datos de observaciones sobre las relaciones entre el transporte de arena y la velocidad del viento.

Pocos años después, [Bagnold \(1941\)](#) desarrolló un modelo en base al análisis teórico combinado con experimentos en túneles de viento y observaciones de terreno realizadas en el desierto de Libia, tanto del perfil del viento como del transporte de arena. El modelo establece mediante algoritmos semiempíricos, la velocidad crítica a partir de la cual cada granulometría inicia el transporte, así como las relaciones entre la magnitud del transporte de arena, la fricción del viento (parámetro derivado de la velocidad del viento y proporcional a ésta) y otras variables como el tamaño de la arena, su textura, la densidad del aire, la aceleración de la gravedad e inclusive el efecto de la inclinación del terreno. El modelo supone la existencia de un equilibrio estacionario, a escala cuasi-instantánea, entre la velocidad de fricción del viento (cuando éste supera un valor crítico) y la cantidad de arena transportada, cuya magnitud estaría controlada sólo por las características de la arena.

El cálculo de la velocidad de fricción del viento lo realiza a través de un método basado en la existencia del denominado "**punto focal**" del perfil (semilogarítmico) del viento. Este punto focal lo define como aquella altura, próxima a la superficie, donde el viento es constante cuando se está transportando arena. La ventaja del uso del punto focal reside en que una vez conocidas su altura y su velocidad características para un lugar, es posible

obtener el valor de la fricción del viento a partir de la velocidad del viento a una altura dada y a partir de ello, aplicarlo al modelo del transporte de arena de [Bagnold \(1941\)](#) u otro.

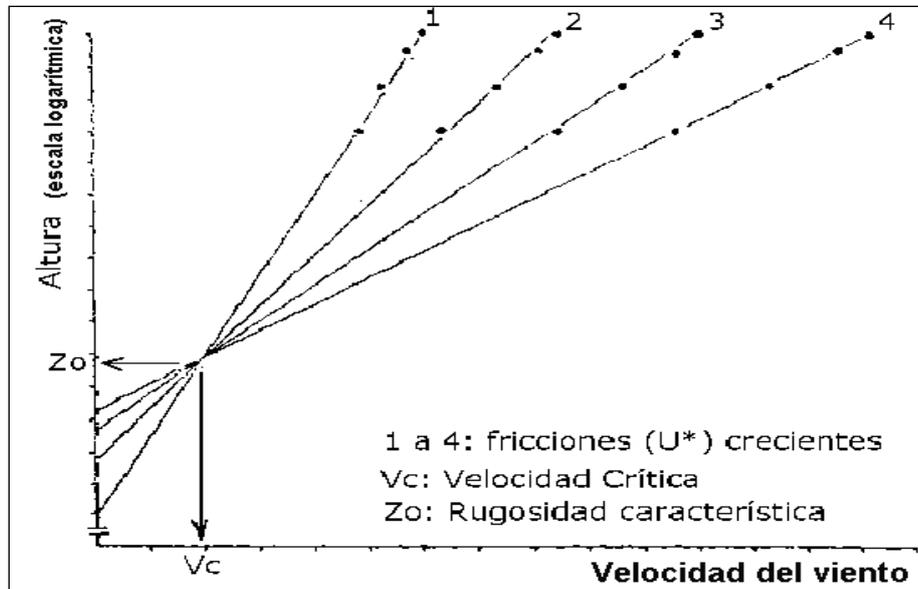


Figura 1. Perfiles del viento bajo una situación de transporte eólico de arena. La escala es semilogarítmica y se indican los parámetros calculados para poder estimar la fricción del viento a partir de una velocidad a una altura dada.

El modelo propuesto por [Bagnold \(1941\)](#) ha sido utilizado para el estudio de la erosión eólica del suelo en praderas de Estados Unidos por [Chepil y Milne, 1941](#) y [Zingg \(1953\)](#) los que analizaron las relaciones entre el transporte observado en trampas de arena verticales con las características del viento superficial medido con tubos pitot. Estudios complementarios en túneles de viento llevan a estos autores a proponer leves modificaciones al modelo original de [Bagnold \(1941\)](#).

[Kawamura \(1951\)](#) y [White \(1979\)](#) corrigen el modelo de [Bagnold \(1941\)](#), ya que la versión original supone la existencia de movimiento de arena a

velocidades inferiores a la velocidad crítica de inicio del transporte y esta aproximación ha sido utilizada generalmente en estudios posteriores por muchos autores. Sin embargo, como claramente describen [Namikas y Sherman \(1997\)](#) el modelo de [White \(1979\)](#), debido a un error tipográfico, ha sido incorrectamente usado y citado durante décadas; su correcta formulación (ver anexo) consiste en una leve modificación de las constantes usadas en el modelo de [Kawamura \(1951\)](#).

[Horikawa y Shen \(1960\)](#) realizan una revisión de los aspectos teóricos y metodológicos concernientes al conocimiento del transporte de arena en playas en base al análisis de perfiles del viento en túneles de viento y a la comparación de distintos diseños de trampas de arena conocidos hasta ese momento. Años después han sido propuestos otros diseños como las trampas horizontales (e.g. [Wang y Kraus, 1999](#)) aunque hoy puede considerarse que la trampa vertical de PVC de [Leatherman \(1978\)](#) es la más usada en estudios de mediano plazo en playas.

[Owen \(1964\)](#) desarrolla un modelo de transporte semiempírico que genera resultados similares a los del modelo de [Kawamura \(1951\)](#) en altas velocidades del viento aunque se basa en una aproximación teórica con supuestos distintos, referidos en particular, al método de la estimación de la velocidad de fricción. Este autor postula que cerca de la superficie la velocidad de fricción permanece constante, e igual a la velocidad de fricción crítica de inicio del transporte, aspecto controvertido hasta el presente ([Gillete y Ono, 2008](#)).

[Kadib \(1965\)](#) desarrolló una discusión metodológica con respecto a los distintos tópicos vinculados al cálculo del transporte eólico de arena, relativamente compleja, basada en ecuaciones de transporte fluvial. Una diferencia importante con otros algoritmos es que incluye explícitamente la incertidumbre ya que supone la existencia de una distribución de probabilidad asociada a la magnitud de arena transportada por un viento dado, denominada “función de intensidad del transporte”. Los autores subsiguientes han simplificado su modelo a la función potencial que mejor se ajusta al valor medio a sus datos ([eg. Sarre, 1987](#)).

[Inman et al \(1966\)](#) realizan un estudio sobre el transporte eólico de arena en las costas de Guerrero Negro (Baja California, México) usando datos anemométricos de una estación meteorológica y de perfiles del viento para evaluar el modelo de [Bagnold \(1941\)](#) a escala geológica dividiendo el volumen de relleno eólico en una laguna costera por su edad 14C. Sus resultados indican que el transporte esperado aproximadamente duplica al observado.

[Lettau y Lettau \(1969\)](#) y [Lettau y Lettau \(1978\)](#) se basan en observaciones del movimiento de dunas en Pampa de La Joya (Perú) para proponer un algoritmo de transporte semejante al de [Kawamura \(1941\)](#) para predecir el movimiento de dunas a partir de datos de frecuencia y magnitud del viento de estaciones meteorológicas. [Brookfield \(1970\)](#) realiza similares cálculos en los desiertos del

continente australiano para evaluar la posible existencia de un anticiclón semipermanente que explicaría la orientación de las dunas.

[Hsu \(1971\)](#) propone calcular la fricción del viento a partir de la velocidad a tan sólo una altura con un modelo de regresión del tipo  $y=ax+b$ , donde  $y$ =fricción,  $x$ =velocidad del viento, en tanto  $a$  y  $b$  son dos constantes empíricas ( $b \neq 0$ ). Sin embargo, en [Hsu \(1974\)](#) propone un modelo de transporte de arena, basado en los denominados “**coeficientes de arrastre**” (donde ahora el coeficiente  $b$  es igual a cero) cuyos valores estima para distintivos sectores de playas naturales de Ecuador y Perú (rompiente, berma, cresta, sotavento y barlovento de la duna). Estos coeficientes permiten convertir la velocidad del viento a una altura, a valores de velocidad de fricción y de transporte de arena, suponiendo que la velocidad de fricción es directamente proporcional a la velocidad del viento y que el ajuste de esta relación depende del ambiente considerado. [Hsu \(1988\)](#) valida el método con datos de viento obtenidos con tubos pitot en el estudio de [Svasek y Terwindt \(1974\)](#). [Dingler et al \(1992\)](#), entre otros, usan este método en playas del SE de Estados Unidos obteniendo un buen ajuste entre las observaciones y el modelo. El mismo autor ([en Hsu, 1988](#)) y otros ([Spies et al, 1995](#); [White y Tsoar, 1998](#)) controvierten la validez en playas naturales del modelo de “perfil semilogarítmico del viento” o “ley del muro” desarrollado por Prandtl en 1932 (*sensu* [Oke 1987](#)) y usada para la interpretación de perfiles del viento en túneles de viento. El perfil deja de ser “semi-logarítmico” en condiciones de inestabilidad atmosférica y/o con brisa marina y/o con cambios de rugosidad superficial.

[Tsoar \(1974\)](#) estima el transporte de arena a escala anual usando el concepto de “altura focal” para asociar la fricción del viento con la velocidad registrada en estaciones meteorológicas, obteniendo resultados satisfactorios, sin embargo [Tsoar \(1983\)](#) abandona esta aproximación a favor de un modelo basado únicamente en la velocidad del viento, suponiendo que el transporte es proporcional al cubo de la *velocidad* del viento (no a la *velocidad de fricción*). Basado también en tal consideración se realiza un estudio similar, semi-cuantitativo, del régimen del viento sobre en la costa uruguaya ([MTOPI, 1978](#)) donde se concluye que en Montevideo la procedencia de los vientos que transportan más arena es del SSW.

[Willets et al \(1982\)](#) introduce nuevas modificaciones en las “constantes” del modelo de [Bagnold \(1941\)](#) para considerar los efectos de la forma de los granos de arena, en base a estudios realizados en túneles de viento.

[Nickling \(1988\)](#) analiza por primera vez empíricamente los valores de la fricción crítica de inicio del transporte estudiando la magnitud del transporte de arenas de distinta textura a distintas velocidades en un túnel de viento, variando el exponente (2,85 a 3,1 en lugar de 3) del algoritmo de [Bagnold \(1941\)](#).

[Sherman \(1992\)](#) postula otro método para la estimación de la velocidad de fricción del viento a partir de la velocidad del viento a una altura, basado en la ley de Charnock usada en ambientes marinos según la cual la altura de la rugosidad superficial (olas) varía con la velocidad del viento, lo que puede

interpretarse como una variante dinámica del concepto de “punto focal” de [Bagnold \(1941\)](#) ya adelantada por [Owen \(1964\)](#) .

[Bauer et al \(1996\)](#) detectan el desarrollo de una “capa límite” (ver eg. [Oke, 1987](#)) a baja altura, de perfil no logarítmico aun sobre superficies planas extensas de playa. Señalan también la evidencia de una gran variabilidad espacial del transporte a velocidades del viento moderadas y bajas.

Algunos autores han realizado análisis cuantitativos basados en el uso de modelos y datos de terreno, realizados en latitudes medias (30 a 35°S) y climas (Cfa) semejantes a los de Montevideo, en particular, en el SE de Australia ([Hesp y Thom, 1990](#); [Chapman, 1990](#)) el SE de Sudáfrica ([Illenberger y Rust, 1988](#)) y el SE de Uruguay ([Panario y Piñeiro, 1997](#)). Estos estudios concluyen que la acción del viento puede generar transportes entre 10 y 50 m<sup>3</sup>/m/año de arena en playas y dunas costeras naturales. En estos casos, la dirección de los vientos que transportan más sedimento proviene en general del SW.

El primer cálculo de un balance sedimentario costero a escala anual fue realizado en el campo de dunas de Alejandría, en Sudáfrica, por [Illeberger y Rust \(1988\)](#) mediante la comparación de fotos aéreas con datos surgidos del uso de un modelo de transporte ([Bagnold \(1941\)](#)) alimentado con datos meteorológicos de estaciones cercanas, donde la fricción del viento se calcula a partir de la velocidad del viento con un punto focal ([Bagnold, 1941](#)).

Estudios similares realizados por [Hesp et al \(2007\)](#) en la costa del SE de Brasil, señalan que los vectores del transporte proceden en unos casos del SSW (playa Joaquina, Isla Santa Catarina) y en otros del SSE (Pinheira Beach) según el sector costero considerado, lo cual generó cierto interés en la literatura especializada debido a una aparente incoherencia con las previsiones de los modelos teóricos alimentados con datos meteorológicos. Concluye que sólo la combinación de la orientación de la playa con el régimen de vientos local, explica la dirección de los vectores de transporte de arena eólica observados.

Algunos autores han cuestionado el uso de las denominadas “constantes” presentes en varios de los modelos utilizados en playas dado que éstas cambian en función del tiempo ([Bennett y Olyphant, 1998](#); [Namikas, 2002](#); [Namikas, 2003](#)) por lo que en lugar de ser constantes son variables o en el mejor de los casos, son parámetros válidos para una escala, lugar y momento dado ([Nash, 1994](#); [Sherman, 1995](#)).

Algunos de los factores que afectan al balance sedimentario eólico son la humedad ([Belly, 1964](#)), la salinidad del substrato ([Dingler et al, 1992](#)), la cobertura vegetal ([Buckley, 1987](#); [Gares, 1992](#); [Pluis, 1992](#)) la orientación de la playa ([Bauer y Davidson-Arnott, 2002](#)) y la topografía ([Hardisty y Whitehouse, 1988](#)). Una revisión de la exactitud en la determinación del efecto de la humedad de la arena por diversos modelos se puede encontrar en [Cornellis y Gabriels \(2003\)](#), donde se sugiere que el modelo de mejor ajuste es el de [Chepil \(1956\)](#).

[Fryberger \(1979\)](#) desarrolló un método simple para el estudio de las relaciones entre el régimen del viento y el movimiento de las dunas en una investigación de los desiertos del mundo. El método usa una versión simplificada del modelo de [Lettau y Lettau \(1978\)](#) calibrado en el desierto Jafurah (Arabia Saudita) en [Fryberger \(1984\)](#), tras lo cual se convierte en un método clásico toda vez que es necesario estudiar el transporte de arena por el viento a escala anual.

Ejemplos de estudios basados en el método de [Fryberger \(1979, 1984\)](#) son los realizados en el desierto Taklimakan de China ([Ruiping et al, 2008](#)) en Israel ([Levin et al, 2007](#); [Yizhaq et al, 2007](#)) en las praderas de Estados Unidos ([Li et al, 2007](#)) en playas del delta del Danubio ([Vespremenau-Stroe y Preoteasa, 2007](#)), en playas de la costa Este de Sudáfrica ([Olivier y Garland, 2003](#)) y en las dunas semi-congeladas del Ártico ([Käyhkö, 2007](#)).

El método fue desarrollado para relacionar datos de estaciones de la red meteorológica mundial (WMO por sus siglas en inglés) con la forma de las dunas en grandes desiertos del mundo. El método implica, en primer lugar, calcular el transporte potencial total de un conjunto definido de rangos de velocidades y rumbos de viento. En segundo lugar realiza la suma de vectores de transporte potencial, con lo que se obtiene el vector de arrastre resultante. Eventualmente se calcula también el “índice unidireccional” (transporte resultante/transporte potencial) a los efectos de su clasificación como uni o poli modal, agudo u obtuso, lo que se asocia a la forma de las dunas.

Aunque algunos autores (eg. [Bullard \(1979\)](#), [Peirce y Walker, 2005](#)) han encontrado un sesgo metodológico que produce desvíos de magnitud y rumbo de las predicciones, el método sigue aplicándose sin corrección e incluso ha sido desarrollado un programa informático para facilitar su aplicación ([Saqqa y Saqqa, 2007](#)).

[Havholm y Kokurek \(1988\)](#) sostienen que, en cualquier caso, las diferencias entre los distintos métodos de cálculo y modelos de transporte de arena no son significativas comparadas con la variabilidad de factores como la fricción del viento, por lo que su aplicación sería limitada en caso de no conocerse con precisión algunos de los parámetros fundamentales en el terreno.

[Sarre \(1988\)](#) obtiene un conjunto importante de datos de fricción y transporte eólico en playas de Inglaterra, los que son usados para evaluar varios modelos de transporte y en otro trabajo, los relaciona con datos de estaciones meteorológicas ([Sarre, 1989](#)). Para relacionar la velocidad del viento con la fricción en el terreno, supone aquí válido el concepto de punto focal.

[Mulligan \(1988\)](#) llama la atención sobre el uso de distintos métodos de estimación de la velocidad de fricción en la literatura, lo que genera notables diferencias en las predicciones de los modelos de transporte, en particular considerando la evidencia presentada por [Nordstrom et al \(1996\)](#) sobre la existencia de perfiles de viento no-logarítmicos en playas expuestas a vientos marítimos, como es el caso de las costas de Uruguay.

[Werner \(1990\)](#) desarrolla un modelo matemático teórico que describe el vínculo entre el transporte de arena y las modificaciones que la “nube saltante” ejerce sobre el perfil del viento. Los resultados del modelo predicen efectivamente la existencia del punto focal propuesto por [Bagnold \(1941\)](#), lo que es posteriormente confirmado con las cada vez más frecuentes simulaciones, con programas informáticos, de los subprocesos del transporte eólico de arena (saltación, arrastre y golpeteo –*splash*–) (eg. [McEwan, 1993](#); [Craig, 2000](#)).

[Kroon y Hoekstra \(1990\)](#) miden en ambientes naturales el transporte de arena desde la playa hacia las dunas costeras y consideran que la rugosidad y el ancho de playa son los factores más sensibles en la respuesta de los modelos a los cambios topográficos.

[Davidson-Arnott y Law \(1996\)](#) realizan medidas con trampas y anemometría de superficie y detectan transportes inferiores a los predichos en una versión simplificada del modelo de Hsu (1973) lo que atribuyen a que el ancho de playa es inferior a 50m y a otros parámetros locales.

[Sørensen \(1991\)](#) propone leves modificaciones en el valor de las constantes usadas en los modelos precedentes, las cuales son aplicadas por [Sauermann et al \(2003\)](#) en la costa nordeste de Brasil.

[Kokurek et al \(1992\)](#) discute el control que realiza la napa freática sobre el patrón de sedimentación y el aumento de la erosión potencial en las áreas adyacentes por aceleración local del viento.

Algunos experimentos de laboratorio muestran que las observaciones se sitúan entre un 65% y 300% del valor estimado por el modelo de [Bagnold \(1941\)](#) según [Dong et al \(2004\)](#). En experimentos de terreno y bajo condiciones ideales los modelos aportarían una estimación del orden de magnitud del transporte ([Sarre \(1989\)](#)). Autores como [Jackson y Nordstrom \(1997\)](#) y [Jackson y Nordstrom \(1998\)](#) sin embargo encuentran en playas de N.Jersey (USA) un aceptable ajuste entre los datos medidos en playas y los calculados a partir del modelo de [Bagnold \(1941\)](#) y detectan tenores superiores a lo esperado cuando la playa contiene tenores moderados de agua entre 3 a 9%.

Aunque autores como [Castel \(1988\)](#) usan directamente el modelo de [Bagnold \(1941\)](#) para simular la erosión eólica en playas urbanizadas de Holanda, [Psuty \(1988\)](#), [Gares \(1990\)](#) y [Pye \(1990\)](#) señalan que la acción antrópica (vallados, aplanamiento, mantenimiento) es una variable tan importante como el régimen de vientos a la hora de determinar el transporte de arena por el viento. Posteriormente y también en Holanda, la magnitud de esas modificaciones antrópicas es modelada parcialmente en playas de Holanda por [van der Wal \(2000\)](#) quien señala que aún considerando el efecto de los obstáculos y la granulometría, su modelo sobreestima el transporte real por lo que sugiere más investigaciones de terreno para evaluar el peso de factores no considerados.

Algunos autores llegan a afirmar que los modelos de transporte no pueden ser deterministas debido a la complejidad de factores involucrados, motivo por el cual deberían incluir explícitamente la incertidumbre o variabilidad en sus ecuaciones, en particular a bajas velocidades del viento ([Bauer et al, 1990](#); [Phillips, 1994](#); [Bauer et al, 1996](#); [Gares et al, 1996](#); [Namikas y Sherman, 1998](#); [Namikas, 2002](#); [Wiggs et al, 2004](#)).

Para resolver el problema de la incertidumbre y la variabilidad del transporte en la realidad, [Chapman \(1990\)](#) propone un método original, aplicado a playas de Australia, consistente en sintetizar estadísticamente los conjuntos de pares de datos de transporte eólico y viento en playas, realizados por investigadores independientes, cuyos promedios individuales, se presume, convergerían alrededor de los promedios de transporte y velocidad verdaderos. En el mismo sentido, [Stout y Zobeck \(1997\)](#) proponen usar la denominada "función de intermitencia" para lograr incorporar la variabilidad del viento en torno al valor medio y poder así ponderar el trabajo del viento en distintas escalas temporales si los datos de viento son adecuados. Sin embargo, debido a su compleja formulación, no ha sido aplicada en trabajos posteriores.

[Alcántara-Carrió y Alonso \(2002\)](#) estudian en la isla de Fuerteventura (España) el transporte de arena con trampas verticales del tipo [Leatherman \(1978\)](#) y datos anemométricos de los vientos alisios, comunes en el área. Los resultados son comparados con varios modelos de transporte y concluyen que el concepto de punto focal sería válido, si bien cuestionan el método usual de cálculo de la velocidad de fricción de autores como [Bagnold \(1941\)](#). Los transportes

observados se ajustarían a los modelos que predicen los menores transportes de arena, por lo cual calibran con nuevos coeficientes empíricos las ecuaciones en las que se basan esos modelos.

La teoría y las observaciones de transporte eólico en el terreno son también analizadas en playas de Pas-de-Calais (Francia) por [Meur-Férec y Ruz \(2002\)](#) aplicando sin embargo un método aún más simplificado de cálculo de la velocidad de fricción del viento basado en uno de los coeficientes de arrastre de [Hsu \(1973\)](#), obteniendo valores del transporte de arena que en la playa alta o supramareal son del orden de magnitud esperado por los modelos de [Bagnold \(1941\)](#), [Kawamura, \(1964\)](#) y [Lettau y Lettau \(1978\)](#). Es en cambio en la playa intermareal, donde la indeterminabilidad de la predicción del transporte de arena por el viento, postulada por [Bauer et al \(1996\)](#) se manifiesta aquí evidente debido a la mayor influencia de la humedad provocada entre otros factores, por la oscilación mareal sumada a la variación consecuente del ancho de la playa.

En los últimos años, los métodos analíticos que describen y predicen el intercambio de sedimento a lo largo y a través de las playas están basados en topografías de precisión combinadas con modelos de transporte y observaciones del viento y transporte de alta frecuencia durante cortos periodos de tiempo (e.g. [Eliot y Clarke, 1982](#); [Butterfield, 1999](#); [Wang y Kraus, 1999](#); [Jackson y Cooper, 1999](#); [Zobeck et al, 2003](#), [Saye et al., 2005](#)).

Una revisión de la Comisión Europea de antecedentes sobre erosión de playas ([NICMM, 2004](#)) sostiene que, entre otras técnicas, la regeneración de dunas es una técnica útil para la conservación de playas, a través de la implantación de vallados en la zona supramareal en áreas dominadas por vientos marítimos. Éstos reducen la velocidad del viento en la playa alta y favorecen la sedimentación y el balance sedimentario positivo.

Una reciente revisión de las investigaciones de la geomorfología eólica realizadas desde la década de 1980 ([Livingstone et al, 2007](#)) sugiere que las futuras investigaciones deben revisar la validez del paradigma del “transporte al equilibrio” aplicado en diferentes escalas temporales y basarse en estimaciones adecuadas de la velocidad de fricción a partir de perfiles del viento (como ha sido referido por [Mulligan, 1988](#)).

La variabilidad de la respuesta de los modelos que describen el cambio en las playas debiera expresarse en forma explícita a través de estadísticos como el desvío estándar ([Stive et al, 2002](#)).

Algunos estudios han analizado la efectividad de distintos diseños y configuraciones de vallados para retener la arena eólica ([Ruz y Meur-Ferec, 2004](#); [Matias et al, 2004](#)), sin embargo no son aplicados a escala anual ni comparados con modelos de transporte.

Algunos autores usan aproximaciones cualitativas con matrices de interacción causa-efecto para evaluar con índices la intensidad y predominancia de distintos factores en la estabilidad costera ([Simeoni et al, 1999](#)).

El uso de cámaras de video en posiciones fijas permiten obtener un registro continuo de los cambios en parámetros como la humedad o la línea de costa ([Archetti, 2009](#)) sin embargo, deben considerarse métodos complementarios, ya que no explican por sí solos el origen y dirección de los cambios registrados.

Otros métodos complementarios son recomendados en la literatura (eg. [NICMM, 2004](#)) como el uso de trazadores ([Boon, 1969](#)). Sin embargo, a diferencia de su aplicación generalizada en procesos de cambio en la playa subacuática o intermareal, no se conocen antecedentes en la playa supramareal, motivo por el cual la elección de un método para la estimación del cambio en las playas urbanizadas sigue siendo una cuestión abierta.

## **Marco Teórico**

La gestión de las pérdidas de arena de las playas necesita disponer de modelos simples y verificables, capaces de predecir la respuesta del sistema en una escala temporal y espacial apropiada (días a años y metros a kms). La complejidad de la naturaleza, pone en cuestión el uso de valores o parámetros “estándar”, por lo que deben ajustarse los modelos con medidas de terreno realizadas en escalas de trabajo adecuadas ([Sherman et al, 1998](#); [Chapman, 1990](#)).

Existen estudios que aplican modelos como la “regla de Bruum” en la predicción de la dinámica costera tanto en Uruguay ([Volonté y Nicholls, 1995](#); [Saizar, 1997](#)) como en muchas playas urbanizadas del mundo, los que han sido cuestionados por numerosos autores por estar basados en parámetros “estándar” estimados en laboratorio o en ambientes relativamente simples (lagos) y que son inexactos en muchos ambientes naturales.

Los procesos de transporte en la realidad y en los modelos matemáticos actúan a diversas escalas temporales y espaciales por lo que es riesgoso **deslizar conceptos** y métodos entre escalas de distinta magnitud, en particular cuando las relaciones entre los procesos y las respuestas no son lineales ([Sherman, 1995](#)). Las variables conductoras de los sistemas de transporte producen en muchos casos respuestas rítmicas o cíclicas ([Anfuso, 2004](#)).

Para lograr compatibilizar las investigaciones recientes realizadas a escalas temporales cada vez más pequeñas, con datos meteorológicos, lo importante es ajustar los modelos de transporte con los datos de viento en una escala temporal y espacial adecuada.

El problema es que el transporte se correlaciona con la velocidad del viento a escala de segundos o decenas de segundos (ej. [Lee, 1987](#)) y las estimaciones de velocidad (o fricción) basadas en estaciones meteorológicas estándar usan registros promediados por períodos de minutos o decenas de minutos ([Jackson,](#)

[1996](#); [Spies et al, 2000](#); [Namikas et al, 2003](#)), lo cual lleva a incoherencias, como la de que un viento horario promedio de 4m/s no transportaría arena por estar bajo la velocidad crítica en que se inicia el transporte, lo cual no es correcto ya que ese promedio incluye episodios con velocidades inferiores, pero también superiores a la velocidad crítica, que sí transportarían sedimento.

Sin embargo, con datos obtenidos en terreno y datos simultáneos de estaciones meteorológicas tomados en una única ventana temporal, se podría minimizar el nivel de incertidumbre existente en torno a los volúmenes de arena reales involucrados y las predicciones del transporte anual de arena de una playa concreta. Un modelo ajustado a una escala horaria, por ejemplo, permitiría construir los diagramas polares o rosas del transporte de arena con el método de [Fryberger \(1979\)](#). Con los vectores de arrastre es posible cuantificar el efecto neto o resultante anual del régimen de viento para las distintas orientaciones de las playas. El método propuesto por Chapman (1990) supone una validación complementaria ya que se basa en datos reales, aunque de diversas playas, lo que permitiría comparar los resultados entre distintos ambientes.

El ajuste y uso del modelo para playas de Montevideo sería aplicable en otras playas del país, en caso de disponer de datos de viento locales, a partir de la inserción de los parámetros locales referidos a la granulometría y a las velocidades críticas de inicio del transporte.

El objeto del presente trabajo es desarrollar un modelo útil para una gestión costera y para predecir el movimiento potencial de arena generado por el viento, usando los datos anemométricos disponibles.

## **Justificación**

El transporte de arena por el viento en ambientes costeros es parte integral y frecuentemente importante del balance sedimentario costero ([Bennett y Olyphant, 1998](#); [Jackson y Cooper, 1999](#)). Su conocimiento es también importante para algunas aplicaciones prácticas como la determinación de la cantidad de arena que se pierde de la playa hacia el continente o el rango de crecimiento de las dunas artificiales, constituyendo un componente deseable de manejo, particularmente en aquellas playas que han sufrido un gradual proceso de urbanización que pone en riesgo su conservación.

En tal sentido la información de base que permita determinar los procesos que subyacen en el comportamiento físico del sistema costero aún no es bien conocido, no sólo en Uruguay sino a nivel mundial, por ejemplo, son escasas las cuantificaciones de los componentes del balance sedimentario, en particular la relación entre la erosión y la sedimentación eólica con el régimen de vientos.

El sistema de playas de la ciudad de Montevideo, en particular, ha sufrido un gradual deterioro acompasado con el crecimiento urbano ([Panario et al, 2008](#)). Sólo recientemente han sido iniciadas acciones de gestión tendientes a

comprender su dinámica y establecer medidas ambientales tendientes a su recuperación, en consonancia con el incremento en las últimas décadas del valor de las playas como sitios de recreación y esparcimiento.

En Montevideo, cuando el ancho de playa (o la proximidad del muro de la rambla) lo permite, uno de los aspectos que más preocupa es la reconstrucción de dunas artificiales para evitar las pérdidas de arena, fenómeno habitualmente observado a lo largo de la rambla costanera. En el marco de la certificación ambiental (UNIT 14001) el gobierno municipal propende a conocer las causas de tales problemas en el marco del “programa de mejora continua del estado de las playas”, lo cual necesita de datos reales de terreno, verificables, repetibles y representativos, que permitan por ejemplo, estimar las pérdidas de arena y los sectores de la playa más vulnerables a esas pérdidas, estimar la velocidad de crecimiento potencial y la configuración deseable de las dunas artificiales en playas de distinta orientación, así como evaluar tanto retroactiva como anticipadamente el impacto de obras y estructuras en la configuración costera.

La gestión de las pérdidas de arena de las playas necesita disponer de modelos simples capaces de predecir la respuesta del sistema a escala humana de tiempo (meses y años). Sin embargo, la complejidad de la naturaleza según muchos autores pone en cuestión los modelos clásicos, en particular en playas urbanizadas ([Shermann, 1996](#); [Bauer et al, 1996](#); [Nordstrom, 2008](#)) por lo que en este trabajo se usará un modelo de transporte calibrado con datos

empíricos locales. El procedimiento de calibración permite seleccionar, a partir de datos reales, el modelo más efectivo, con el cual se construyen los diagramas polares o rosas del transporte de arena según el método de Fryberger (1979). Con tales vectores de transporte es posible cuantificar el efecto neto anual del régimen de viento para las distintas orientaciones de las playas.

Un modelo simple, aplicable rápidamente por los tomadores de decisiones puede ayudar a resolver ese problema en playas que perdieron su condición natural. Ello permitirá dotar a la gestión de los sistemas costeros de datos ajustados a la realidad del litoral urbanizado de la capital, lo que permitirá minimizar el nivel de incertidumbre existente en torno a los volúmenes de arena reales involucrados y su dirección de transporte dominante, pudiendo ser usado para estimar el balance anual de arena en éstas y otras playas del litoral uruguayo y simular las consecuencias de cambios en el régimen de vientos o los efectos de intervenciones pasadas o proyectadas.

En consecuencia, el conocimiento de la ganancia y pérdida de sedimento tiene un interés además de económico, técnico y aun científico, ya que aporta información relevante para una gestión eficiente de las tareas de mantenimiento de playas, pasible de minimizar su vulnerabilidad actual ante eventos ordinarios y extraordinarios, así como para comprender las diferencias naturales entre distintos arcos de playa y dentro de ellos, entre los distintos sectores de playa.

## **Preguntas a responder**

- 1.- ¿Las predicciones de los modelos de transporte eólico de arena se ajustan a la realidad de las playas urbanizadas?
- 2.- En condiciones no naturales ¿es posible optimizar las predicciones de tales modelos?
- 3.- ¿Un modelo optimizado provee la información apropiada para la gestión y manejo de estas playas?

## **Hipótesis**

- H.1 – Los modelos clásicos sobre estiman el volumen de arena transportado al no incluir importantes variables que condicionan negativamente el transporte en una playa urbanizada.
- H.2 – La inclusión de parámetros físicos significativos permitirá seleccionar un modelo que describa mejor la realidad de una playa concreta.
- H.3 – Un modelo optimizado permite discretizar vectorialmente el transporte en los distintos sectores de playa, lo cual aporta insumos básicos para su gestión y manejo.

## **Objetivo general**

El objetivo general es cuantificar los efectos del transporte eólico de arena en playas urbanizadas como aporte para su gestión y manejo.

## **Objetivos específicos**

1.- Probar la competencia de los modelos de transporte eólico de arena, para determinar los efectos de la acción del viento en playas bajo condiciones de urbanización.

2.- En caso de no ajustarse los modelos clásicos proponer un modelo de transporte alternativo que incluya los parámetros físicos relevantes de las playas urbanizadas.

3.- A partir del modelo seleccionado y de sus resultados, proponer una clasificación de playa por sectores según la magnitud y dirección del transporte de arena, como criterio de manejo.

## **Metodología**

### **Área de estudio**

Con el objeto de investigar el transporte potencial de arena por el viento en playas urbanizadas de Uruguay, han sido seleccionadas varias playas de la ciudad de Montevideo: Ramírez, Pocitos, Buceo y Malvín. La selección de estas playas ha sido determinada por la proximidad de varias estaciones meteorológicas de la red nacional (Punta Brava y Aeropuerto de Carrasco) por la disponibilidad de datos de los parámetros físicos relevantes, su fácil accesibilidad así como por su importante valor social.

La ciudad de Montevideo y las playas de estudio están situadas en la costa norte del estuario del Río de la Plata entorno al cabo Punta Brava (situación:

Latitud 34 56' S Longitud 056 09' W) donde los vientos y oleaje del sector sur favorecen el arrastre de arena hacia el continente, propiciando el desarrollo de bahías en zig-zag denominadas *log-espíral bay* en la terminología de [Krumbein \(1944\)](#), *Z-bay* según [Yasso \(1965\)](#) y [Bird \(2000\)](#) o *parabolic bay* según [Hsu y Evans \(1989\)](#).

La arena contenida en las playas de estas bahías rellena paleo-valles, paleo-planicies de marea o de abrasión marina generadas durante las oscilaciones marinas del Holoceno y Pleistoceno Superior ([Antón y Goso, 1974](#)). La deriva litoral que originó las playas está actualmente minimizada por los cabos rocosos y espigones que limitan varios arcos de playa, por lo que el ingreso de arena procede de los bancos limo-arenosos y arenosos subacuáticos, la acumulación de fragmentos de conchillas, la erosión de afloramientos rocosos de la Formación Montevideo ([Preciozzi et al, 1985](#)) materiales quinarios emplazados en sus adyacencias y en algunos casos deriva del E. El análisis del patrón de olas muestra una dirección dominante del ESE con un periodo medio de 5,7 segundos (CV=70%) y alturas significativas de 54 centímetros (CV=60%) con fuertes temporales asociados a olas del SE al SW con olas de mayor altura y de corto periodo. El oleaje de tormentas se asocia en general a episodios destructivos de la playa. Estos episodios son de mayor duración en los meses de invierno.

La sucesión de las playas de estudio está limitada hacia el continente por un muro costanero continuo denominado Rambla de Montevideo. El paisaje está

también lateralmente segmentado por numerosos espigones y escolleras semipermeables o impermeables al tránsito subacuático de sedimentos.

La circulación general atmosférica en el estuario está controlada por el paso de masas de aire anticiclónicas que proceden del Pacífico Sur y se dirigen hacia el Atlántico Sur ([Prohaska, 1976](#)) lo que se expresa en una distintiva y semicíclica rotación de los vientos. El régimen de vientos más frecuentes acusa un marcado predominio en el país del sector NE si bien en áreas costeras la brisa marina aporta un componente del SE que se suma al viento sinóptico durante el periodo de verano. Las velocidades medias anuales en la costa pueden superar los 5 m/s y llegar hasta los 7 m/s ([Cambilargiu, 1963](#))

[Simionato et al \(2004\)](#) analizan las frecuencias tri-horarias e intensidad medias del viento (1997-2001) en Faro Pontón de la Recalada, único registro localizado en el interior del estuario, a unos 50km al SE de Montevideo (35°10´S y 56°15´W). Ahí, se postula que **exceptuando las variaciones de baja frecuencia** todos los meses del año exceptuando el período de Diciembre a Marzo, la intensidad del viento es **menor de 1,5m/s**. La proveniencia es predominantemente del ENE al ESE todo el año, excepto en Junio y Julio, donde dominaría el SW y WNW con velocidades medias inferiores a 1m/s. Sin embargo, consideradas a escala estacional, las velocidades medias del viento presentan un mínimo de unos 23km/h (6,4m/s) para el viento N en invierno, hasta un máximo de unos 35kmh (10m/s) para el SW en verano. A escala anual la intensidad promedio de los vientos se sitúa en un rango que oscila desde un

mínimo de 7,5 a 7,8m/s para los vientos del N y NW y un máximo de 9,6m/s para el SW.

Aunque la marea astronómica es de unos 90cm, el viento genera oscilaciones del nivel del mar con amplitudes que llegan a superar los 2,5 metros sobre el nivel medio ([Panario et al, 2007](#)).

Las playas Ramírez, Pocitos, Buceo y Malvín son playas gestionadas en el marco del proceso de certificación (ISO 14000) de la Intendencia Municipal de Montevideo y si bien son algunas de las más concurridas del país, hoy día su dinámica sedimentaria dista mucho de la natural; de hecho, sólo una conserva dunas que fueron artificialmente recuperadas. Esta situación de deterioro de su normal funcionamiento determina que durante eventos de tormenta llegan a ser recubiertas por las olas, las que incluso llegan al límite con la rambla. Su orientación y topografía son ilustradas en la figura 2:

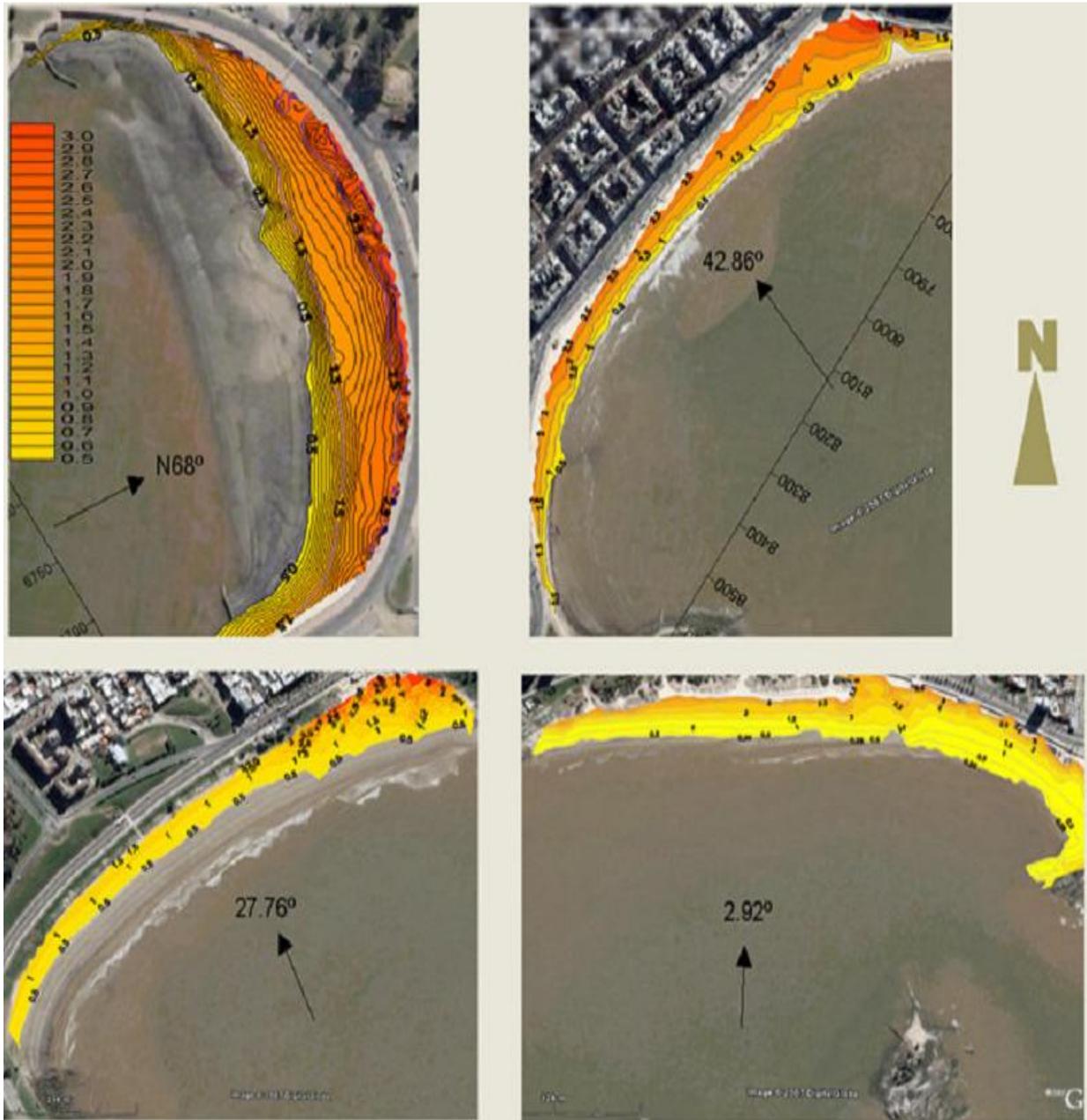


Figura 2. Topografía de las playas Ramírez, Pocitos, Buceo y Malvín. Nótese la existencia de una zona supramareal elevada por encima de la cota 2,5m, en tonos anaranjados a rojos. La orientación está expresada en grados respecto al norte.

Los parámetros físicos relevantes de estas cuatro playas son sintetizados en la tabla I. Los valores entre paréntesis indican el desvío estándar.

Tabla I. Síntesis de los parámetros relevantes compilados sobre las playas de estudio

Playas	Pendiente (°)	Porosidad (%)	Humedad (%peso)	Transmisividad hidráulica (m <sup>3</sup> /s x10 <sup>-4</sup> ) <sup>1</sup>	Ancho playa Supramareal (m)	Mineralogía (%)	Diámetro medio grano (mm)	Volumen (m <sup>3</sup> x10 <sup>-5</sup> )	Acimut (°)
--------	---------------	---------------	-----------------	---	-----------------------------	-----------------	---------------------------	---	------------

<sup>1</sup> Calculada según la norma [ASTM D2434](#).

Malvín	Buceo	Pocitos	Ramírez	
1,9-2,4	1,9	2,6	2,7	Playa baja
2,2-2,4	2,2	1,3	1,5	Playa alta
2-2,4	2,0	1,8	1,9	Media
19,6 (1,6)	19,7 (3,3)	17,4 (1,7)	18,2 (2,2)	
4,4 (1,3)	11,9 (2,7)	4,1 (0,5)	4,3 (0,7)	
20	9 (2)	40	60	
56	30	22	21	Entre cotas 0,5 y 1,5m
26	26	44	38	Entre cotas 1,5 y 2,5m
46	46	9	14	+ 2,5m
70 (9)	75 (4)	66 (11)	58 (3)	Cuarzo
25 (6)	20 (2)	23 (10)	26 (7)	Feldespatos
0,24 (0,7)	0,15 (0,9)	0,26 (0,8)	0,27 (0,7)	
2,1	1,6	0,7	0,6	
N03E	N28W	N43W	N68E	

## Métodos y técnicas

- El **transporte eólico de arena** ha sido medido en el terreno durante numerosos episodios horarios de vientos fuertes (considerados como tales a las Fuerzas Beaufort superiores a 4, expuestas en el pronóstico oficial de la Dirección Nacional de Meteorología) con episodios de fuerza 5 a 10. Una muestra de cinco de los episodios horarios registrados fue seleccionada por la calidad de sus datos, correspondiente al inicio de la primavera de 2009 (9 y 18 de Setiembre, 10-11 y 23-24 de Octubre) durante episodios de vientos moderados a fuertes y muy fuertes correspondientes al paso de depresiones, frentes fríos y vientos moderados procedentes tanto del continente como del mar. El viento ha sido medido sobre la zona supramareal (2 metros sobre la altura de la marea baja) lejos de obstáculos, dentro del intervalo de velocidades que osciló entre los 8 y los 15 m/s.
- Las observaciones se realizaron dentro de un episodio de anomalías positivas de la Temperatura de la Superficie del Mar en la zona de El Niño 3 del Pacífico (TSM=+1°C) y valores negativos del Índice de Oscilación Sur (IOS=-1,7)<sup>2</sup> coherentes con el desenvolvimiento del fenómeno de El Niño, lo que propició que durante los días y horas previas y posteriores a las observaciones del transporte eólico hubiera episodios de lluvias frecuentes e intensas.
- La velocidad del viento sobre la superficie de la playa ha sido medida en cuatro alturas diferentes (2, 20, 100, 200 cm) con tubos pitot. El procedimiento constructivo de la torre anemométrica siguió esencialmente la

---

<sup>2</sup> Observado en la página <http://enos.cptec.inpe.br/>

propuesta de [Bagnold \(1941\)](#) y [Svasek y Terwindt \(1974\)](#). Los datos de viento (en rigor, datos de presión del viento) han sido registrados en una cámara de video digital Polaroid Izone con una resolución de pantalla de 640x480px y almacenados en una tarjeta de memoria de 1GB. El análisis del registro de los manómetros fue realizado mediante extracciones automáticas de 81 fotogramas por período y procesados mediante una versión libre del programa Plot Digitizer, versión 1.9 (Marzo, 2008) del *Department of Physics, University of South Alabama*<sup>3</sup>.



Figura 3. Fotografía de la zona de playa muestreada, con tres trampas verticales, 6 trampas horizontales y tubos pitot a 2, 20, 100 y 200cm de la superficie. La cinta indica 5 metros. Fecha: 10 de octubre 16hs. Viento moderado del NNE (derecha a izquierda de la imagen).

<sup>3</sup> <http://www.southalabama.edu/physics/software/software/plotdigitizer.htm>

- Las relaciones entre las velocidades del viento y la velocidad de fricción fueron estimadas a partir del modelo de perfil logarítmico del viento (eg. [Hsu, 1988](#); [Oke, 1987](#)):

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

- donde  $U_z$  es la velocidad del viento a la altura  $z$ ,  $k$  es la constante de von Kármán,  $u_*$  es la velocidad de fricción del viento y  $z_0$  es la longitud de rugosidad. Ha sido realizada la regresión por mínimos cuadrados de las velocidades medidas del viento contra el logaritmo de la altura para determinar la pendiente ( $m$ ) y el punto de intercepción ( $c$ ) de la recta de mejor ajuste. Los parámetros de interés han sido obtenidos de las derivaciones de la ecuación previa:

$$u_* = km \quad z_0 = e^{\left(-\frac{c}{m}\right)}$$

- Las muestras de transporte de arena eólica se tomaron con el auxilio de hasta tres **trampas verticales** descritas en [Leattherman \(1978\)](#) complementadas, en dos períodos, con seis trampas horizontales alineadas con las trampas verticales y la torre anemométrica, en segmentos de cinco metros de longitud perpendiculares a la proveniencia del viento. Como **proveniencia** del viento se consideró la dirección normal a la cresta de las ondulitas (*ripples*) eólicas, siguiendo el criterio empleado en investigaciones similares.
- Para el cálculo de las relaciones entre el transporte medido y los parámetros del viento fueron considerados únicamente los **transportes medios**

registrados en las trampas verticales, las **fricciones medias** registradas en el terreno y la **velocidad media** registrada en las estaciones meteorológicas.

- **La fricción del viento** en la superficie de la playa se calculó a partir de la pendiente media de los datos del perfil del viento, dibujada en papel semi-logarítmico, de acuerdo al método y ecuaciones usados en [Svasek y Terwindt \(1974\)](#) y [Jackson \(1996b\)](#). Posteriormente se evaluó la validez del punto focal de [Bagnold \(1941\)](#).
- La ubicación de los **puntos muestreo** se realizó con el auxilio de un GPS Garmin Venture HC Etrex.
- Los datos de transporte y fricción del viento fueron asociados a datos simultáneos de las estaciones meteorológicas Puerto de Montevideo, Aeropuerto de Carrasco y Punta Brava. El cálculo de la asociación entre las velocidad en la playa y las estaciones meteorológicas siguió el método de mínimos cuadrados usado en playas por [Lee \(1987\)](#) y [Pluis \(1992\)](#) entre otros.
- El procesamiento de los conjuntos de datos de transporte de arena por el viento y de fricción del viento, procedentes de investigaciones obtenidas en estudios previos, emuló el **método de Chapman** (1990) consistente en calcular el transporte más probable (la media o en su defecto, la mediana en los casos de no haber normalidad en los datos) para cada rango de velocidad seleccionando con los resultados obtenidos al modelo de transporte de mejor ajuste, para usarlo posteriormente en los cálculos de transporte con los parámetros locales obtenidos.
- La **topografía de detalle** se realizó en las cuatro playas referidas, junto con personal de la Intendencia Municipal de Montevideo (Ingeniero Agrimensor

Leonardo Puei) usando una estación total con una precisión instrumental de  $\pm 2\text{mm}$ . Complementariamente, varias series de perfiles topográficos con nivel óptico fueron realizadas durante el año 2008 con el apoyo del cuerpo docente de la Unidad de Ciencias de la Epigénesis, los que colaboraron también en el muestreo de sedimentos.

- El área y volumen de las playas se basó en el análisis de las topografías de detalle con auxilio de las versiones demo<sup>4</sup> de los programas Surfer8 y Didger3 de Golden Software.
- La **granulometría**, contenido de **humedad** y **mineralogía** se analizó mediante métodos estándar en 48 muestras superficiales en diferentes unidades morfológicas la playa subaérea, replicada en dos campañas estacionales. Las muestras se tomaron en forma aproximadamente equidistantes entre sí, incluyendo 5 en la rompiente, 5 en la berma y 2 de la playa alta, en cada una de las cuatro playas analizadas (Ramírez, Pocitos, Buceo y Malvín). El análisis granulométrico de las muestras se realizó con el método de tamizado (con intervalos de  $1 \Phi$ ). El análisis del contenido de humedad se realizó calculando la diferencia de peso de las muestras tras secado en estufa. El análisis mineralógico se realizó sobre 5 muestras de cada playa mencionada, mediante el estudio de frotis realizados con fracciones obtenidas con tamices que permitían teóricamente obtener granos en el rango de entre 0.150 hasta 0.125mm. Fueron analizados en forma sistemática 100 granos por muestra con microscopio polarizante de transmisión.
- La pendiente de la playa ha sido derivada de las topografías de detalle.

---

<sup>4</sup> <http://www.goldensoftware.com/demo.shtml> (Requiere registro de correo electrónico. No graba resultados)

## Resultados

En lo que sigue se presenta en primer lugar la información del viento en la estación Aeropuerto de Carrasco y su relación con otras estaciones durante las observaciones del viento realizadas en la playa. Luego se presentan los resultados del transporte eólico de arena potencial a escala anual previsto por el método de Fryberger (1979) y por varios modelos teóricos a escala horaria, los que son comparados con el conjunto de datos compilados en la literatura y con los valores medios del transporte de arena obtenidos en la playa Ramírez. El modelo de transporte con el mejor ajuste es extrapolado finalmente a otras estaciones meteorológicas donde no existe información de campo.

### Datos del viento en las estaciones meteorológicas próximas

Los datos de velocidades medias tri-horarias en la estación Aeropuerto de Carrasco han sido agrupados en clases de velocidad y divididos en direcciones acimutales para los 11 años de registro disponibles (1 de Diciembre de 1997 al 21 de Agosto de 2008). La rosa de los vientos y el histograma de frecuencias resultante se expresan gráficamente la figura 3.

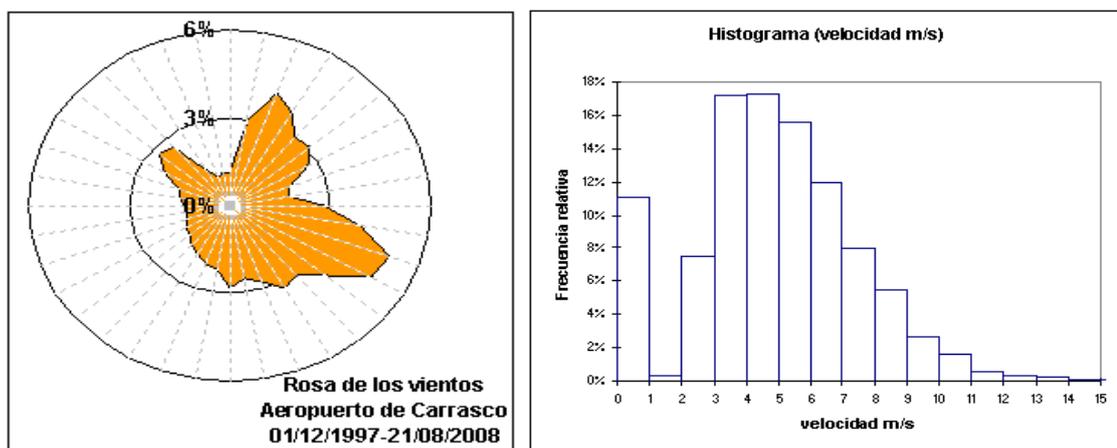


Figura 3. Rosa de los vientos correspondientes a la estación Carrasco (izquierda) e histograma de frecuencias de las velocidades (derecha).

Excluyendo las calmas, los datos de velocidad del viento en la estación Carrasco se ajustan a la distribución Weibull, con una distintiva cola hacia los eventos de mayor energía. La asimetría positiva que origina tal dispersión está asociada con que el valor de la media supera al de la moda, indicando que el estado medio del viento es disturbado por eventos menos frecuentes fuertes vinculados a perturbaciones como el paso de sistemas ciclónicos y frentes fríos.

### **El viento en las playas durante el período de estudio**

Los valores medios de los parámetros del viento más relevantes obtenidos durante el promedio de los cinco episodios de observación son expresados en la tabla II. La relación entre la fricción del viento medida en el terreno y la estimada con el uso del concepto de punto focal es expresada en forma gráfica en la figura 4.

Tabla II. Parámetros del viento durante los episodios de observación
--

		Velocidad del viento en estaciones meteorológicas (ms)			Datos del viento en la playa Ramírez en distintas alturas velocidad (ms)				Estructura del perfil del viento	
Fecha	Hora local	Carrasco	Puerto	Punta Brava	200cm	100cm	20cm	2cm	Fricción (cms)	Zo (cm)
18/09/09	19-20	14,4	13,2	20,1	7,0	4,5	5,2	3,0	53	1,11
23/09/09	18-19	9,8	8,1	15,9	3,5	2,6	2,4	1,7	22	0,40
10/10/09	15-16	8,1	9,9	14,5	3,9	3,0	2,5	2,3	18	0,02
10/10/09	20-21	10,5	11,3	16,0	5,5	3,3	4,1	2,4	35	0,29
24/10/09	00-01	14,8	9,6	17,6	4,2	2,7	3,1	0,7	43	0,84

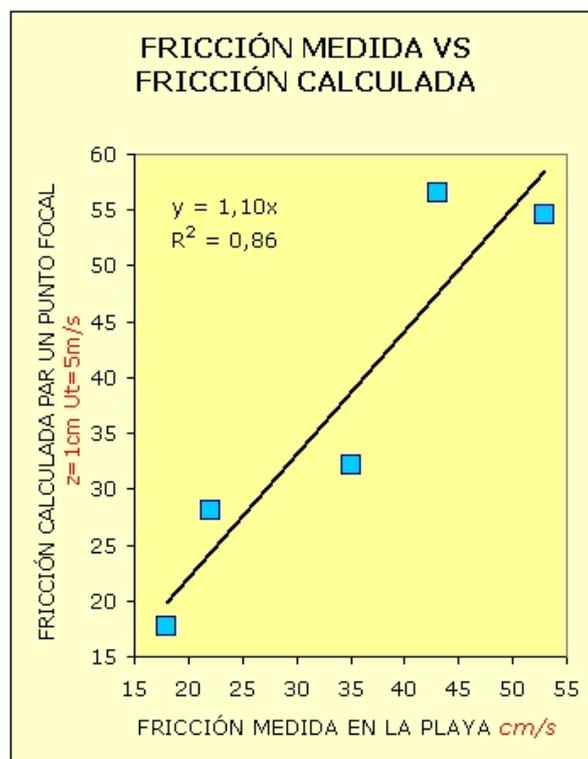


Figura 4. Relación entre la fricción medida en la playa y la fricción calculada en base al concepto del punto focal. Los parámetros son indicados.

## Relación entre los datos de viento en la playa y en las estaciones meteorológicas

Ante los errores que pudieran surgir del uso de una u otra estación meteorológica, los datos de la estación de Carrasco son comparados con los de otras estaciones próximas a la costa (Puerto de Montevideo y Punta Brava<sup>5</sup>) durante el período de estudio de terreno. El análisis se realiza mediante el método de mínimos cuadrados, del cual resulta que en particular, las velocidades del viento entre las estaciones muestra una correlación buena a moderada entre sí y con respecto a la velocidad de fricción del viento medida en la playa. Se observa una mayor dispersión en los valores del Puerto de Montevideo con respecto al resto de las variables.

Tabla III. Matriz de correlaciones entre las velocidades del viento entre estaciones y con respecto a la fricción del viento registrada durante los episodios de observación

	Carrasco (viento)	Puerto (viento)	P. Brava (viento)
Carrasco (viento)	1		
Puerto (viento)	0,633	1	
P.Brava (viento)	0,724	0,779	1
Playa Ramírez (Fricción del viento)	0,864	0,542	0,882

<sup>5</sup> <http://weather.noaa.gov/weather/current/SUMU.html> (Estación Aeropuerto de Carrasco)  
[http://www.anp.com.uy/montevideo/meteorologia/meteorologia\\_mvd15.asp](http://www.anp.com.uy/montevideo/meteorologia/meteorologia_mvd15.asp) (Puerto de Montevideo)  
<http://nimbus.com.uy/index1.php> y [http://www.armada.mil.uy:81/cgi-bin/sohma/sohma\\_relojes.pl](http://www.armada.mil.uy:81/cgi-bin/sohma/sohma_relojes.pl)  
(Punta Brava-Punta Carretas de Montevideo)

Un análisis exploratorio de los valores del viento sobre las tres estaciones es expresado gráficamente en diagramas "box plots" (Figura 5) donde se indican los valores de la media y la mediana (en rojo) así como los valores extremos.

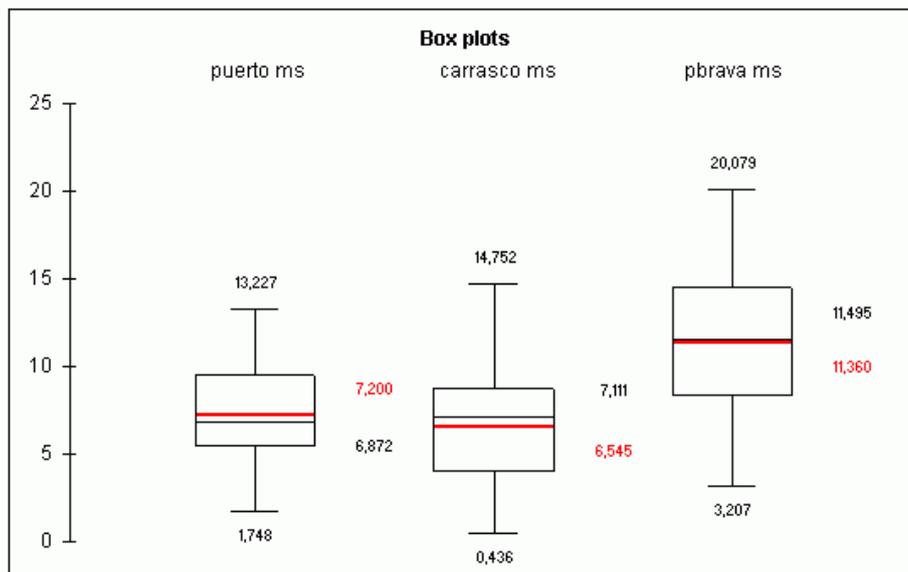


Figura 5. Diagramas *Box-Plot* correspondientes a la velocidad del viento en las estaciones Puerto, Carrasco y Punta Brava durante los episodios de observación.

### Transporte potencial según Fryberger (1979)

El transporte eólico potencial que surge de aplicar el método de Fryberger (1979) sobre los datos de la estación Aeropuerto de Carrasco (1 de Diciembre de 1997 al 21 de Agosto de 2008) se expresa en la Tabla IV.

Los resultados son expresados directamente en metros cúbicos por metro por año. Se indican los valores obtenidos para cada rango de velocidad y dirección (proveniencia) del viento.

Los distintos vectores así como el vector resultante son expresados gráficamente en la figura 6 bajo la forma de la "rosa de arena" propuesta por el método.

Tabla IV. Transporte eólico potencial según el método Fryberger (1979) en base a datos de la Estación Carrasco (expresados en m<sup>3</sup>/m/año)

Acimut (°)	velocidad (m/s)					
	5.5 a 8	8 a 10.5	10.5 a 13.5	13.5 a 16.5	16.5 a 20	20 a 55
0	0,5	0,7	0,2	0,0	0,0	0,0
45	0,6	1,3	0,4	0,3	0,0	0,0
90	0,7	1,0	0,4	0,1	0,0	0,0
135	0,8	1,4	0,4	0,2	0,0	0,0
180	0,8	2,3	1,3	0,8	0,2	0,2
225	0,4	2,4	1,5	0,9	0,2	0,2
270	0,3	1,7	1,6	0,4	0,3	0,2
315	0,3	0,8	0,3	0,3	0,0	0,0

Los valores de la tabla IV son expresados gráficamente en la figura 6 bajo la forma de la “rosa de arena” definida en Fryberger (1979).

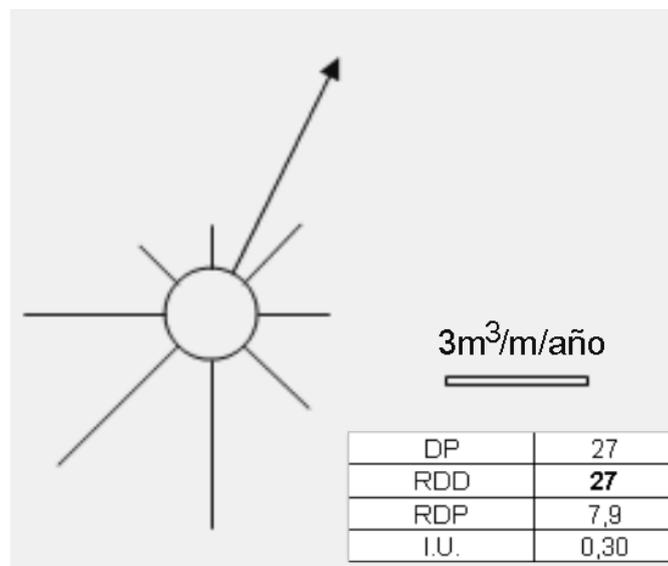


Figura 6. Rosa de arena calculada en base a datos de la Estación del Aeropuerto de Carrasco (1997-2008). Nótese que el transporte resultante es de unos 8m<sup>3</sup>/m/año en dirección NNE (27°). Ver referencias en el texto.

Donde DP indica el volumen total del transporte anual, RDD indica el sentido del vector de transporte resultante de la suma vectorial de los distintos componentes, expresado en grados con respecto al norte. RDP indica la magnitud del transporte potencial resultante, e IU indica el valor del índice unidireccional, el cual expresa la relación DP/RDP.

### Transporte eólico de arena según Chapman (1990) y otros modelos

Los datos de transporte de arena y fricción del viento, recopilados de la bibliografía son expresados gráficamente en la figura 7 junto a los resultados de varios modelos de transporte usados en la literatura, los que alimentados con datos "por defecto" (diámetro de arena=0,25mm, densidad de los granos=2,65, superficie plana y sin vegetación, humedad=0). El transporte se expresa en gr/cm/seg.

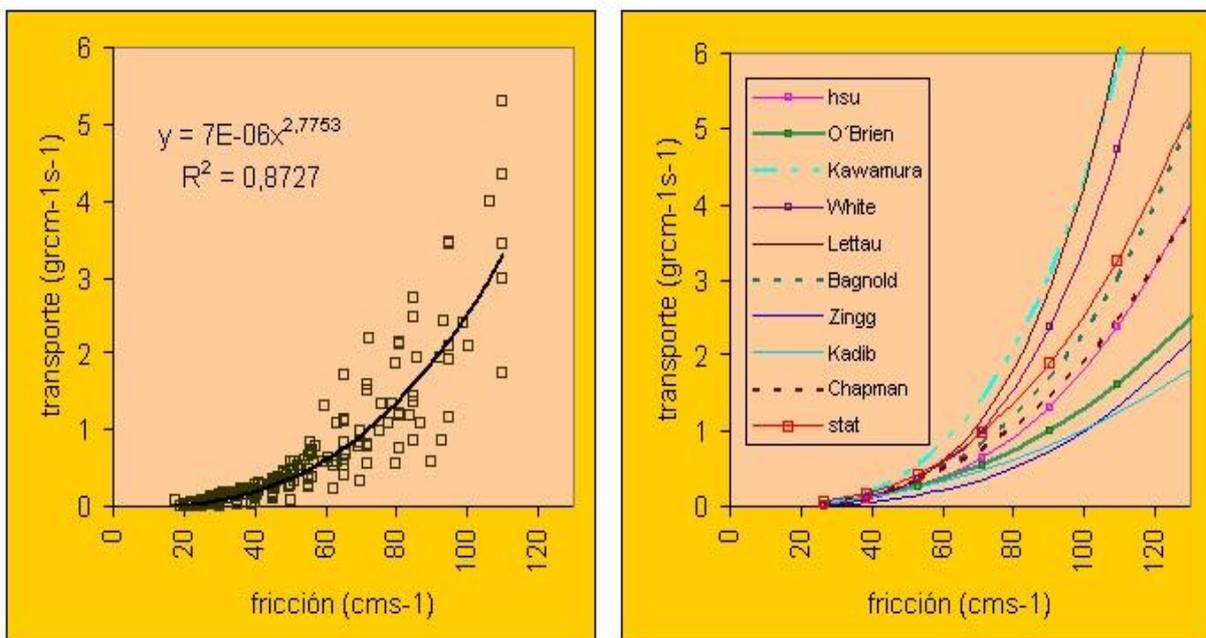


Figura 7. Transporte de arena por el viento en relación a la fricción del viento  
Izquierda: según el método de Chapman (1990) denominado **stat** en la figura de la derecha -modelo de regresión de los 210 pares de datos-.  
Derecha: según 9 modelos (denominados según autor) mas el modelo **stat**.

La función que describe los resultados del método de Chapman (1990) se denomina "stat" en la figura 7. Las salidas numéricas para otras granulometrías son adjuntadas en el anexo.

### Ajuste de los modelos a la realidad de las playas urbanizadas

Los valores de transporte observados en la playa Ramírez y la velocidad de fricción del viento en la playa se relacionan significativamente (n=5, r2=0,99) con el modelo empírico:

$$Q = 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot U_*^{2,95}$$

Donde Q es la magnitud del transporte (expresado en kg/m/h) y U\* es la velocidad de fricción del viento (cm/s) en la superficie de la playa. En la figura 9 se expresa en forma gráfica junto a la velocidad del viento en la Estación Carrasco.

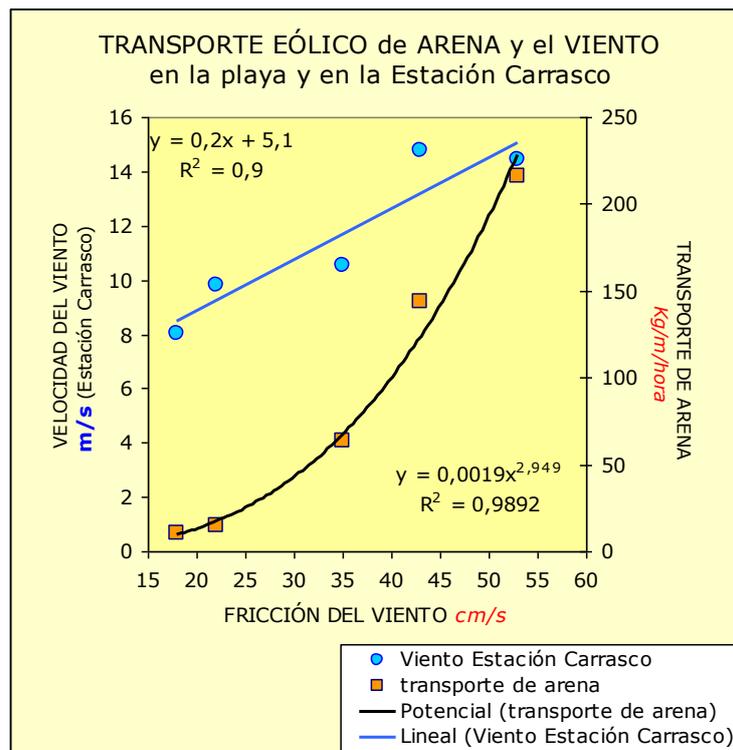


Figura 8. Transporte de arena por el viento y velocidad del viento en Estación Carrasco en relación a la fricción del viento en la playa.

El transporte observado en la playa Ramírez es comparado con las predicciones de varios modelos ajustados a la granulometría de la playa Ramírez cuando el modelo lo permite. Se ha incluido el modelo generado en base a datos bibliográficos (denominado stat). Ha sido excluido el modelo de Sorensen (1991) debido a que sus predicciones se sitúan un orden de magnitud por encima de los demás. Los resultados se presentan en la tabla V y en forma gráfica en la figura 9.

Tabla V. Transporte eólico potencial según varios modelos (expresado en unidades CGS)

U*	Hsu (1984)	O'Brien y Rindlaub (1936)	Kawamura (1954)	White (1979)	Lettau y Lettau (1978)	Bagnold (1941)	Zingg (1943)	Kadib (1964)	Chapman (1990)	stat	Ramirez
18	0,011	0,019	0,016	0,008	0,006	0,013	0,006	0,024	0,018	0,022	0,023
22	0,019	0,031	0,031	0,016	0,013	0,024	0,011	0,037	0,031	0,038	0,042
35	0,077	0,097	0,140	0,084	0,077	0,099	0,043	0,103	0,110	0,137	0,168
43	0,143	0,162	0,274	0,174	0,170	0,183	0,080	0,161	0,193	0,242	0,310
53	0,269	0,271	0,541	0,363	0,377	0,342	0,149	0,255	0,341	0,433	0,580

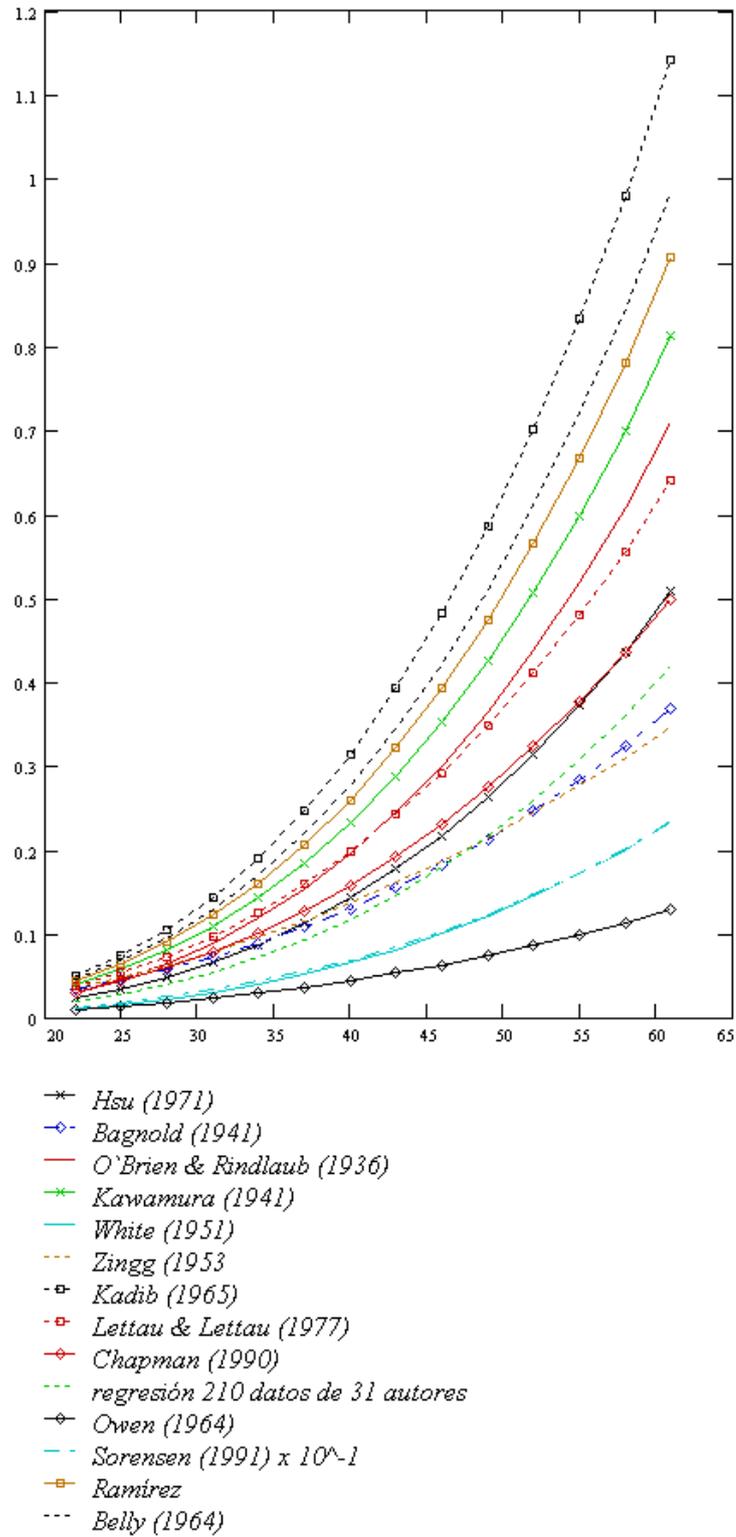


Figura 9. Transporte eólico potencial según varios modelos (expresado en gr/cm/seg) y regresión de los valores observados en la playa -línea denominada "Ramirez" -).

Los resultados del modelo empírico (línea denominada "Ramírez", figura 9) se sitúa en el margen superior del rango de las predicciones, próximo al modelo de Kawamura (1941).

La velocidad de fricción de la playa y la velocidad del viento en las estaciones meteorológicas se relacionan según las siguientes funciones:

$$\mathbf{U^* = 4,58U_{ca} - 18,56; U^* = 6,41U_{pb} - 73,45 \text{ y } U^* = 5,56U_{pm} - 23,81}$$

donde  $U^*$  es la velocidad de fricción en la playa Ramírez en cm/s,  $U_{ca}$  es la velocidad del viento (m/s) registrada en la estación Carrasco,  $U_{pb}$  en la estación Punta Brava y  $U_{pm}$  en la estación Puerto de Montevideo. En la figura 10 se expresan en forma gráfica los valores obtenidos y las funciones de regresión.

La función empírica que relaciona el viento en la Estación Carrasco con la fricción del viento en la playa Ramírez podría combinarse con la función empírica que relaciona la fricción del viento en la playa con el transporte en la playa, resultando en un modelo que denominamos "Carrasco" usando la siguiente función:

$$Q = 1.9 \cdot 10^{-3} \cdot [ \mathbf{4,58U_{ca} - 18,56} ]^{2,9}$$

Para el caso del modelo "Punta Brava" se procede análogamente obteniendo:

$$Q = 1.9 \cdot 10^{-3} \cdot [ \mathbf{6,41U_{pb} - 73,45} ]^{2,9}$$

La estación Puerto de Montevideo no se toma en consideración en lo sucesivo debido a la gran dispersión de valores observada.

Un análisis posible de las salidas de estas funciones es comparar las observaciones con las estimaciones del transporte, expresado en forma gráfica en la figura 11.

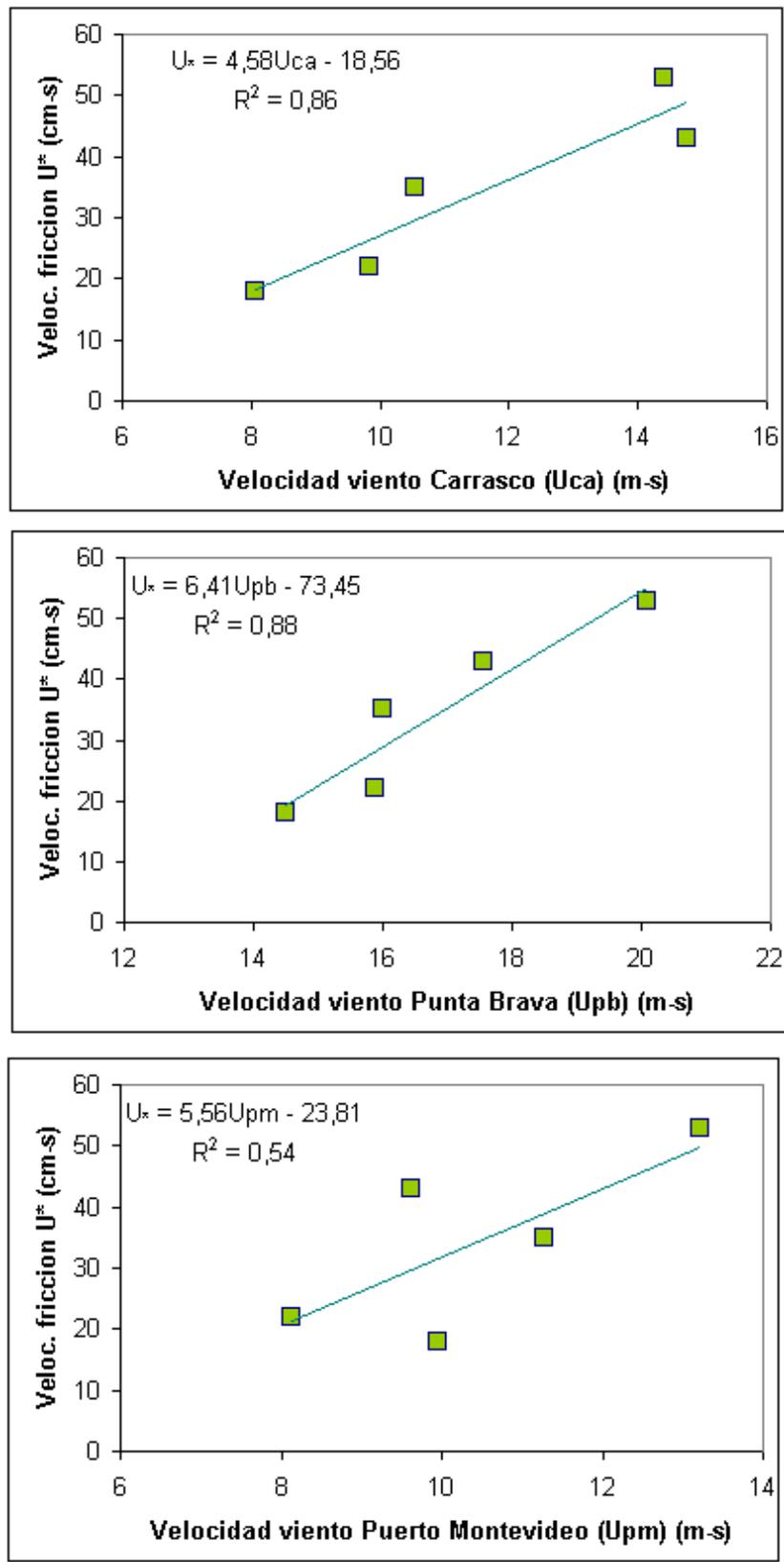


Figura 10. Relaciones entre la fricción del viento y la velocidad del viento en estaciones meteorológicas próximas, durante períodos de transporte de arena por el viento sobre la playa supramareal

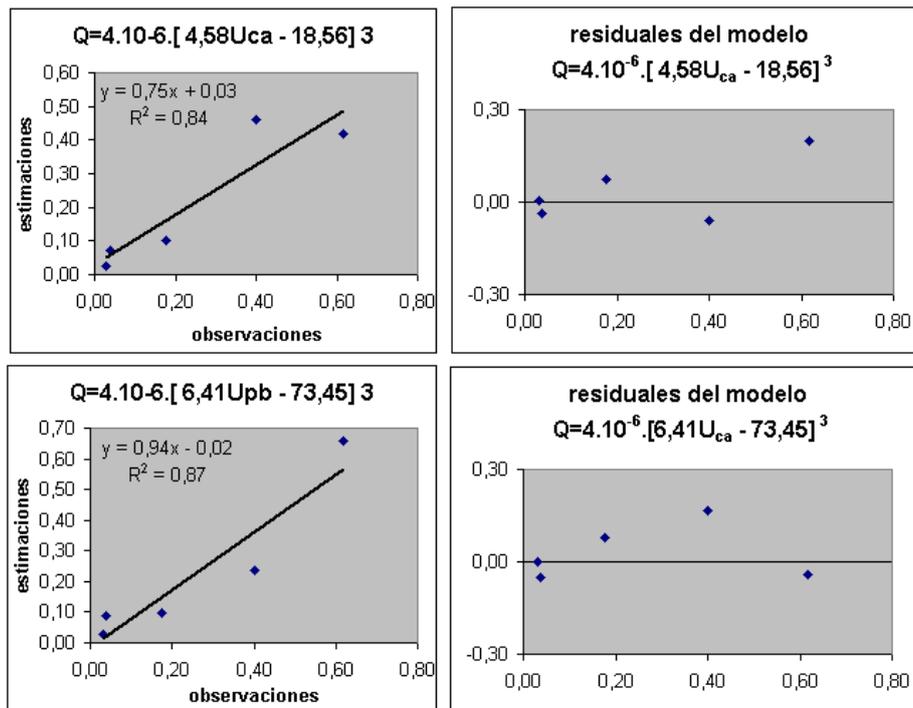


Figura 11. Modelo de regresión y análisis de los residuales

Sin embargo, el modelo Carrasco puede considerarse un caso particular del modelo de [Kawamura \(1941\)](#) con el coeficiente empírico de 3.1 (el coeficiente empírico,  $K$ , tiene un rango de 2,78 a 3,2). Debido a que los modelos teóricos permiten además evaluar el comportamiento de otras variables como la granulometría, se opta por usar éste último para el cálculo del transporte, así como usar el “punto focal” de mejor ajuste para calcular la fricción del viento a partir de los datos de velocidad del viento (ver figura 4). Aplicados estos modelos a la matriz de velocidades y frecuencias anuales del viento de la estación Aeropuerto de Carrasco, se puede construir la “rosa de arena” y calcular la magnitud del transporte potencial anual, la magnitud y dirección del transporte resultante y el índice unidireccional, produciendo así una variante *calibrada* del método de Fryberger (1979).

La “rosa de arena” calculada con esta variante calibrada además de predecir transportes anuales inferiores al procedimiento clásico de Fryberger (1979) resulta en una dirección y magnitud resultante levemente diferente, expresadas en la tabla VI y gráficamente en la figura 12.

Tabla VI. Salidas del método de Fryberger (1979) estándar y de su variante calibrada con el modelo Kawamura (1951).

Modelo	Fryberger (1979)	Kawamura (1951)
DP	27	15
RDD	<b>22°</b>	<b>35°</b>
RDP	7,9	5,6
I.U.	0,30	0,37

DP= Transporte potencial ( $m^3/m/año$ ).  
 RDD= Rumbo del vector en grados respecto al N  
 RDP= Transporte potencial resultante.  
 I.U.= Índice de unidireccionalidad (DP/RDP).

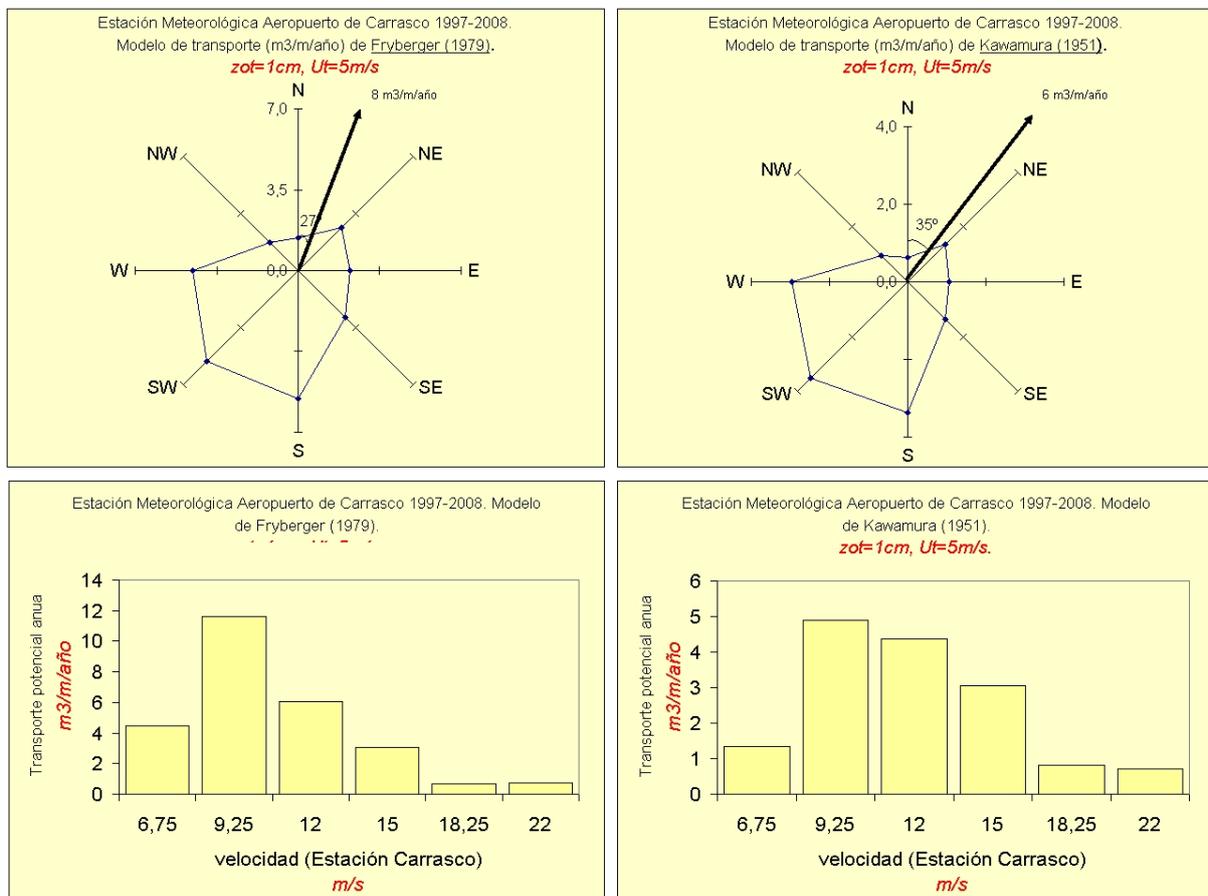


Figura 12. Transporte eólico de arena según el método de Fryberger (1979) a la izquierda y a la derecha según el modelo de Kawamura (1951). Los diagramas polares describen el transporte total para cada rumbo y la flecha indica el vector resultante del transporte. Los diagramas de barras describen el transporte total para cada intervalo de velocidad. Nótese las diferencias tanto en magnitud como en dirección.

La ventaja de usar el modelo teórico de Kawamura (1951) y el modelo de "punto focal" de Bagnold (1941) en lugar de los modelos empíricos (modelos de regresión de los valores obtenidos) reside en que los modelos teóricos son flexibles para su uso en playas con otras granulometrías, por lo que sería aplicable a otras bases de datos de viento de la costa uruguaya. Considerando los mismos parámetros para la determinación de la velocidad de fricción se obtiene el transporte potencial anual para varias estaciones costeras, cuyos resultados que se sintetizan en la figura 13. Nótese que los valores de Punta Brava **no están ajustados** (el modelo "Punta Brava" resultaría en valores equivalentes a los valores de Carrasco).

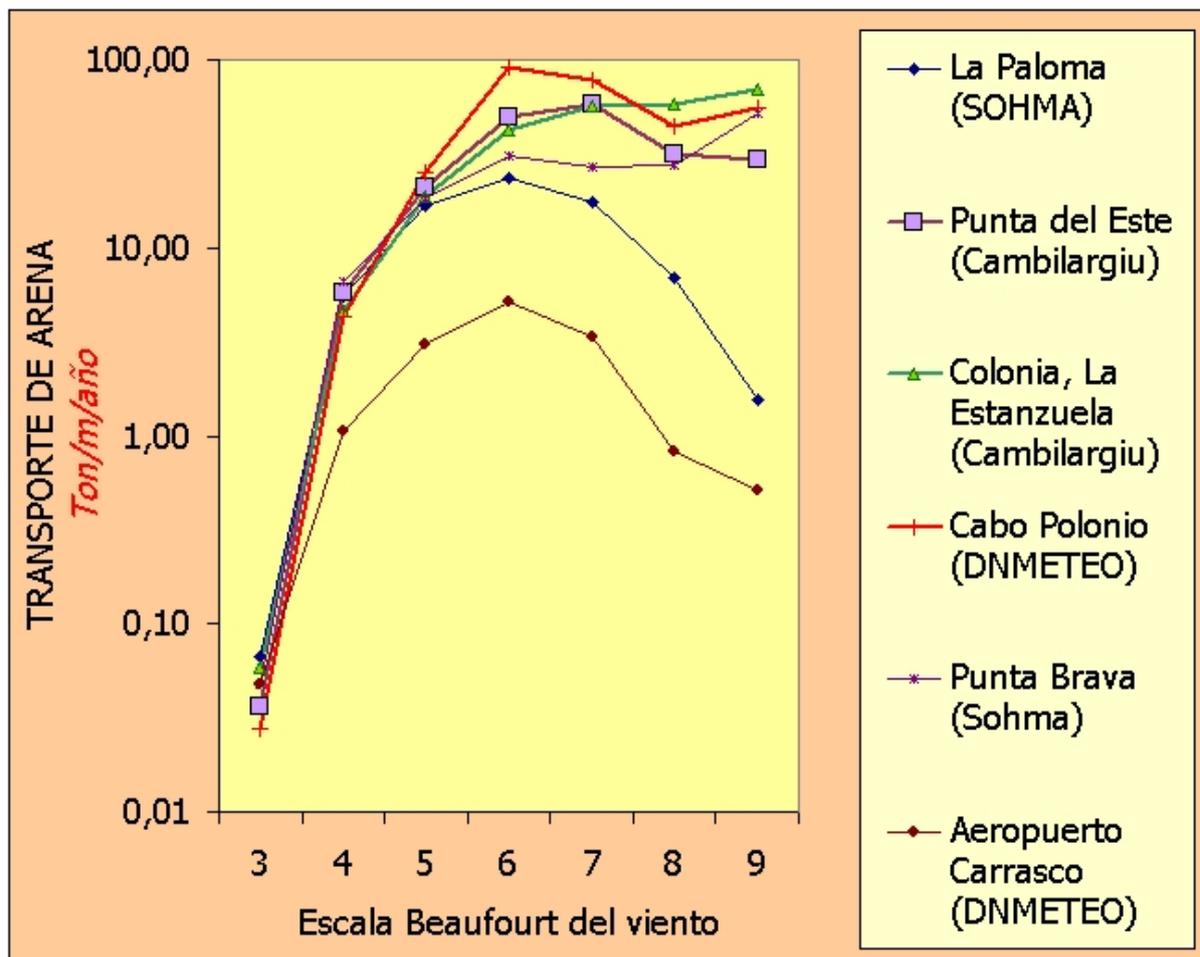


Figura 11. Transporte eólico de arena según el modelo de Kawamura (1951) para datos de viento de estaciones del río de la Plata (Colonia, Montevideo, Carrasco) y la costa oceánica (Punta del Este, La Paloma, Cabo Polonio). Nótese la característica dominancia relativa de los vientos de la fuerza Beaufort 6.

## **Discusión**

Las relaciones obtenidas entre la fricción del viento en la playa y la velocidad del viento en las estaciones meteorológicas próximas no difiere estructuralmente de los “coeficientes de arrastre” propuestos por [Hsu \(1988\)](#) en playas de Ecuador ya que en ambos casos son una función del tipo  $y=ax+b$ . Una relación similar ha sido usada por [Sarre \(1989\)](#), [Gares \(1992\)](#) y [Dingler et al \(1992\)](#) entre otros. Sin embargo, esta relación predice fricciones incorrectas por abajo del rango de observación, a diferencia del modelo de punto focal.

En todo el análisis se ha operado bajo el supuesto de que las estimaciones de la fricción del viento obtenidas en la playa se ajustan aproximadamente a los valores verdaderos. Es probable, sin embargo, que hayan diferencias sustanciales, ya que, según [Bauer et al \(1996\)](#) todas las estimaciones deben interpretarse a la luz de los intervalos de confianza alrededor de las previsiones, ya que un cambio del 10% en el valor de la fricción provoca cambios de más del 30% en el transporte ([Sherman et al, 1998](#)). Esto significa que las predicciones de transporte realizadas son precisas en un rango de +-20-30% en el mejor de los casos. Sin embargo, esta incertidumbre es pequeña si se relaciona con las diferencias que surgen de la selección del modelo de transporte, y es además constante para todas las estimaciones de la fricción del viento.

Otra incertidumbre surge de la efectividad de las trampas. Ha sido evaluada la posibilidad de que la apertura de las trampas a la entrada de arena fuera superior a la sección de 1cm prevista pero las diferencias encontradas no superaron el 10% ni

fue un error sistemático. Puede pensarse que la eficiencia de las trampas verticales del tipo [Leattherman \(1978\)](#) es diferente a la de otras trampas, pero por tratarse de técnicas relativamente estandarizadas y por ello usadas por la mayoría de los autores, este error no sería pertinente considerarlo porque sería el mismo en todos los casos.

Como generalmente sucede, las comparaciones entre los valores empíricos y los teóricos suelen concluir con cierto escepticismo en los modelos clásicos ([Gares, 1988](#); [Horikawa & Shen,1960](#)) siendo así que las predicciones, inclusive las derivadas de la interpolación de datos conocidos, deben ser consideradas con cuidado en escenarios distintos al original, e inclusive el mismo escenario en distintos momentos ([Bennet y Olyphant, 1998](#)). En este caso, se han observado cambios en el valor de la longitud de rugosidad no atribuibles a cambios en la fricción sino a cambios en la superficie de la arena en el transcurso del temporal de arena. Por ejemplo, en la tabla II, las observaciones de los días 23 de setiembre y 10 de octubre tienen similares pendientes en el perfil del viento pero el valor de la rugosidad difieren en casi un orden de magnitud, fenómeno ya notado por [Davidson-Arnott et al \(2005\)](#) entre otros. Ello implica que una velocidad determinada a una altura dada puede corresponderse con más de una fricción, según el momento y lugar.

En ninguno de los estudios revisados se usó mas de una estación meteorológica simultáneamente e inclusive no es raro que los datos viento en el terreno se restrinjan a una única altura ([e.g. Lee, 1987; Sarre, 1988](#)) o que el diámetro de la arena se le atribuya un valor “estándar” de 0,25mm.

El error procedente de la granulometría, aunque depende del modelo considerado (en particular [Hsu, 1973](#) y [Bagnold, 1941](#)) en este estudio se aproxima a la granulometría “estándar” (0,25mm). La mineralogía cuarzo-feldespática de la arena de estudio, sumada a la ausencia de fragmentos de conchillas y de cortezas salinas, también habría propiciado un transporte próximo al teórico.

El elevado tenor de humedad no habría disminuido el transporte (excepto bajo la lluvia) probablemente debido a que las velocidades del viento estudiadas eran relativamente superiores a las comúnmente descritas en los antecedentes y como señalan [Jackson y Nordstrom \(1997\)](#) los vientos fuertes propician un rápido “secado” de la superficie. La escasa pendiente de la playa supramareal (próxima a 2°) tampoco podría afectar teóricamente más de un 5% los valores esperados. Posiblemente el buen ajuste global de los datos sea posibilitado por la presencia de coeficientes empíricos flexibles en los algoritmos involucrados.

El clásico método de [Fryberger \(1979\)](#) en su versión clásica sobreestima el transporte observado a pesar de que está basado en una simplificación del modelo de [Lettau y Lettau \(1978\)](#) y éste, a escala horaria, predice transportes inferiores a los observados (figura 9) lo que es contradictorio. Una explicación posible es que el método sobreestima la fricción del viento al realizar la ponderación planteada en [Fryberger \(1984\)](#) para convertir las “unidades vectoriales” en m<sup>3</sup>/m/año. Similar sobreestimación de la fricción del viento a partir de datos meteorológicos puede presumirse en la ponderación de [Sarre \(1989\)](#). Una explicación simple al origen de este desajuste es que las funciones del tipo  $y=ax+b$  (donde  $y$ =fricción del viento,

x=velocidad del viento, en tanto a y b son coeficientes) propuestas entre otros por [Hsu \(1971\)](#) y que han sido usadas comúnmente para estimar el valor de la fricción a partir del valor del viento en una estación meteorológica (e.g. [Sarre \(1989\)](#), [Gares \(1992\)](#) y [Dingler et al \(1992\)](#) **pierden validez cuando  $b \neq 0$** , ya que suponen fricciones negativas para vientos suaves (si  $b < 0$ ) lo que carece de sentido o fricciones superiores a cero cuando hay calmas (si  $b > 0$ ) lo que no es real. Cuando estas funciones son incluidas en los modelos de transporte del tipo  $y = aX^b$  (donde y=transporte, X=fricción del viento, en tanto a y b son coeficientes empíricos) provocan que el valor del exponente "b" difiera sustancialmente de 3. Ello es contradictorio con el postulado básico que sostiene que existe una relación lineal entre la tercera potencia de la velocidad del viento y el transporte (e.g. Bagnold, 1941; Fryberger, 1979; Hsu, 1988).

Suponiendo que estas aparentes contradicciones derivadas de la estimación de la fricción no produjeran desvíos significativos entre las estimaciones y la realidad, persiste el problema de las diferencias observadas entre los valores de las velocidades medias entre las distintas estaciones. La velocidad media del viento en la Estación Punta Brava es sistemáticamente superior a la de la Estación Aeropuerto de Carrasco (ver detalle en anexo) en tanto la Estación Puerto de Montevideo tiende a registrar valores comparativamente altos durante vientos suaves, relación que se invierte en episodios de temporal. La estación meteorológica idónea sería una ubicada en la propia playa, ya que las estaciones más expuestas al viento como Punta Brava sobreestimarán el transporte de arena potencial de los vientos que llegan a las playas desde el continente o subparalelos a la costa.

A pesar de las incertidumbres referidas, los resultados obtenidos en la playa son similares a los reportados por [Sarre \(1988\)](#) en playas no urbanizadas de Gran Bretaña y coherentes con algunos de los modelos (ver figura 12). A escala anual las estimaciones anuales para Montevideo son comparativamente *menores* que en otras costas, donde el transporte anual potencial oscila entre unos 10 a más de 50m<sup>3</sup>/m/año ([Bird, 2000](#)) en particular con respecto a la costa oceánica de Uruguay ([Panario y Piñeiro, 1997](#)) (figura 11).

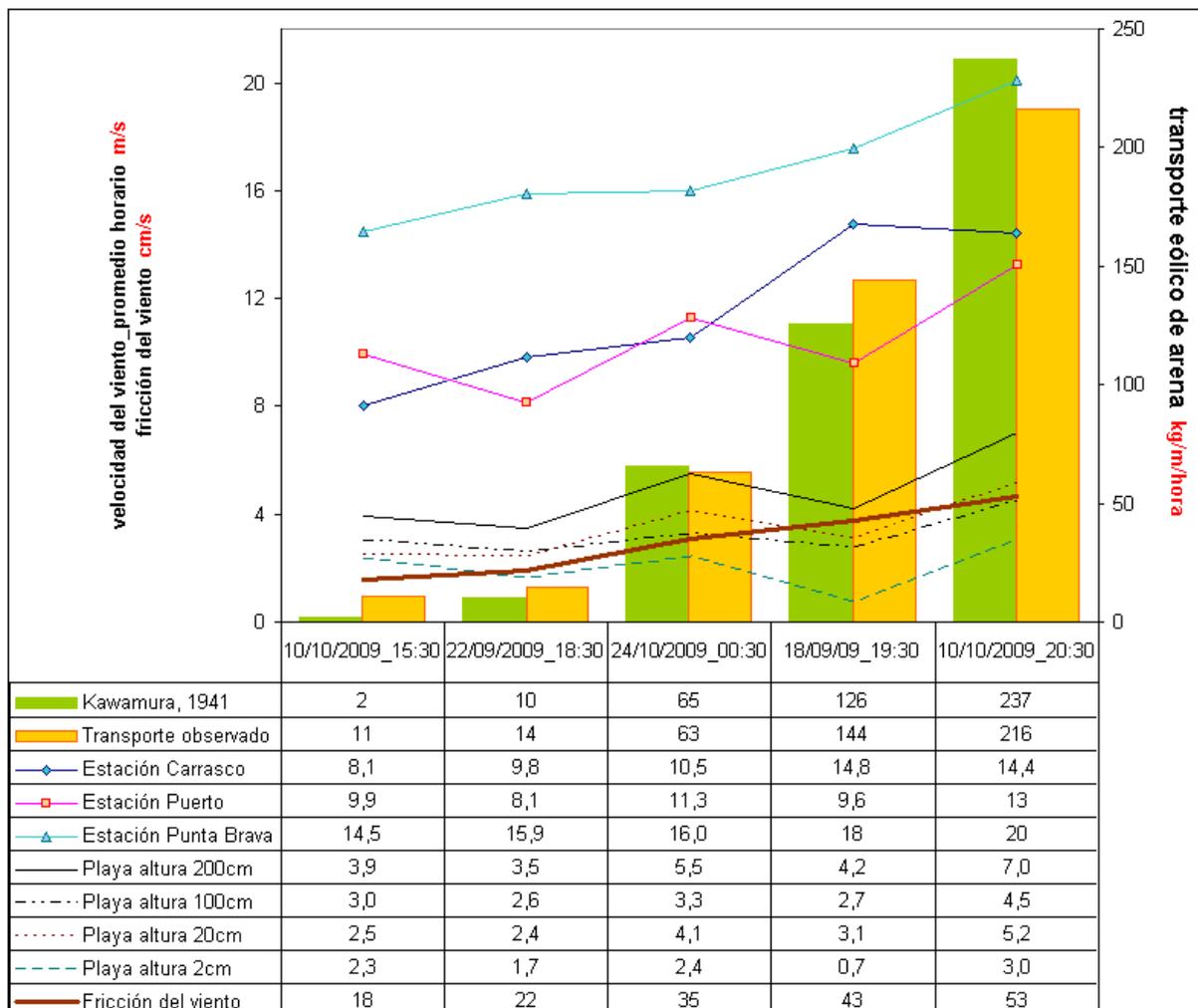


Figura 12. Un aumento lineal en la velocidad del viento se asocia con un aumento lineal en la fricción del viento y un aumento del transporte de arena similar al previsto por Kawamura (1951)

## **Conclusiones**

Un solo episodio de temporal de viento fuerte puede transportar a la parte alta de las playas de Montevideo más de una tonelada de arena cada 10 metros de playa (figura 12). Gran parte de ella es retirada con medios mecánicos (figura 13) para evitar el recubrimiento de la rambla y la obstrucción del alcantarillado.



Figura 13. Remoción con retroexcavadora y camión (flecha) de la arena transportada por el viento a la playa supramareal antes del inicio de la temporada veraniega. La arena devuelta a la línea de costa.

Debido a este fenómeno muchos países incluyendo Uruguay propiciaron la fijación de estas arenas con vegetación como acacias, pinos, eucaliptos, recientemente, juncos y otras especies herbáceas nativas o semi-nativas (figura 14, inferior).

En Montevideo, la configuración de la porción supramareal de las playas estudiadas se modificó con la presencia de muros, construcciones y tareas de mantenimiento, con lo cual las playas han sido transformadas en plataformas arenosas limpias, aplanadas por maquinaria de mantenimiento y limpieza. Ello ha generado las

condiciones para que el transporte eólico de arena llegue a ser superior al previsto por varios modelos de transporte durante varios temporales moderados y fuertes sucedidos en la primavera de 2009.

En los sectores supramareales de las playas, la cantidad de arena transportada se acerca a las predicciones del modelo de Kawamura (1941).

Algunos métodos y algoritmos clásicos de cálculo de la fricción del viento y de la magnitud del transporte contienen errores y desvíos tanto sistemáticos como metodológicos. Aunque los modelos evaluados a escala horaria en general subestiman las magnitudes reales transportadas, a escala anual sucede lo contrario. Extrapolados los modelos de mejor ajuste, el transporte potencial anual se sitúa en torno a los 15m<sup>3</sup>/m/año lo que significa alrededor de un 50% del estimado sin calibrar.

Las observaciones fueron realizadas durante períodos de vientos fuertes y muy fuertes asociados al paso de depresiones atmosféricas y frentes fríos que provocaron transportes de  $\geq 50$  kg/m/hora ( $\geq 0,15$ gr/cm/seg) correspondientes a descensos topográficos milimétricos hasta centimétricos en las áreas de deflación.

A escala anual, el concepto del "punto focal" del viento (Bagnold, 1941) es de utilidad para la simulación del transporte eólico.

El modelo explica la existencia de áreas deprimidas, afectadas de deflación eólica, en las porciones SW de los arcos de playa así como la existencia, en la zona NE, de

áreas de acumulación de arena, propicias para tener un balance sedimentario positivo, favorable al desarrollo vertical, salvo en las circunstancias en que las tareas de mantenimiento o la presencia del muro de la rambla u otras construcciones llegan hasta la zona supramareal.

### **Conclusiones para la gestión y manejo**

El modelo de Kawamura (1941) predice en base a los datos de viento disponibles, que los sectores NNE de las playas tendrán un balance sedimentario de arena positivo en la porción supramareal, lo cual explica porqué los sectores opuestos (los SSW) presentan morfologías más aplanadas, cóncavas y con elevados tenores de humedad, ya que éstos sectores reciben comparativamente escasos volúmenes de arena por el viento. Los sectores donde la construcción de dunas artificiales pueden ser más exitosos serían aquellos hacia los cuales los vectores de transporte dominantes están dirigidos (página 55) es decir, hacia el norte y en menor medida hacia el este. Sin embargo, al ser el cuadrante SW de las playas el más vulnerable, debieran focalizarse medidas particulares hacia él ya que en definitiva, de lograr retener arena y aumentar el volumen de la playa supramareal, serán los más beneficiados en la conservación de la arena. En las playas estudiadas estos sectores vulnerables son, por su orientación, el sector sur de la playa Ramírez, de la playa Buceo, de la playa Pocitos.

La proximidad del muro de la rambla y otras obras impiden la acumulación de arena en el sector central de la playa Pocitos y de la playa del Buceo, ya que la playa intermareal debe conservar un ancho mínimo tal que los temporales contacten con la base de la zona de acumulación de arena eólica. Ese contacto permite, aun en dunas artificiales como las existentes en el sector oeste de la playa Malvín, un intercambio

sedimentario natural que tiende a producir una mayor pendiente de playa y morfologías convexas. El ancho puede deducirse de los caracteres morfológicos observados como se propone en Panario et al (2008b) reproducido en la figura 13. Cuando la urbanización (muros, escaleras, parqueizados, etc.) lo impide, debieran tomarse medidas para evitarlo.

En consecuencia si los sectores meridionales de las playas no son gestionados para invertir el signo del balance sedimentario anual, la erosión eólica favorecerá al desarrollo de sectores planos a cóncavos, con alta humedad, vulnerables a las olas de tormenta. Por su parte, los sectores septentrionales de las playas reciben las mayores cantidades de arena que de ser retenida con vegetación sobre la playa supramareal (ver figura 13) propiciará el desarrollo de un cordón dunar artificial que puede ser alcanzado por el oleaje en episodios de tormentas generando a largo plazo un intercambio sedimentario semejante al natural.

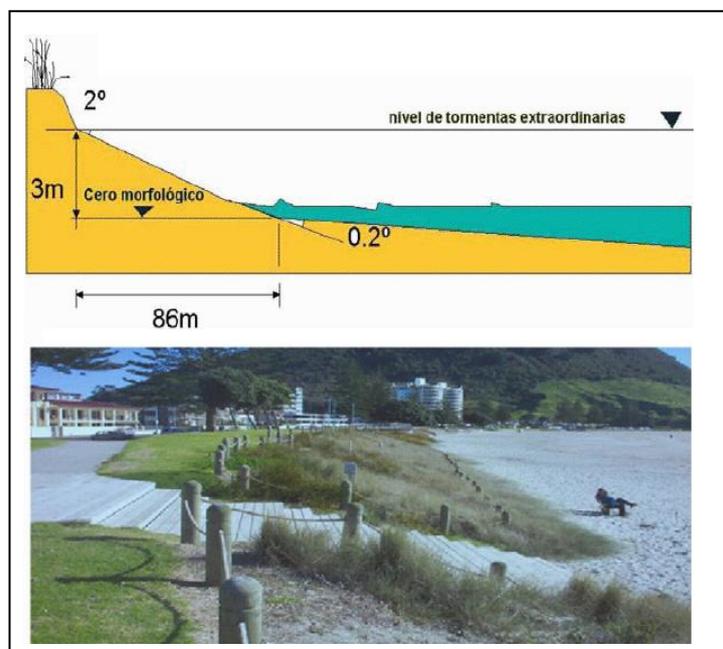


Figura 14. Arriba: Croquis de la medida del ancho mínimo intermareal (Panario, 2008b). Abajo: Modelo de construcción de duna litoral en ambientes urbanizados. Playa Marine Parade, N.Zelanda. [http://www.envbob.govt.nz/media/pdf/report\\_coastalhazardsandclimate.pdf](http://www.envbob.govt.nz/media/pdf/report_coastalhazardsandclimate.pdf)

## **Bibliografía**

Acha, E.M.; Mianzan, H.W.; Iribarne, O.; Gagliardi, D.A.; Lasta, C. y P. Daleo (2003). "The role of the Río de la Plata bottom salinity front in accumulating debris". *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 46. p.197-202.

Alcántara-Carrió, J. e I. Alonso (2002) "Measurement and prediction of aeolian sediment transport at Jandía Isthmus (Fuerteventura, Canary Islands)" *Journal of Coastal Research*. Vol. 18. No2, p.300-315.

Anderson, R.S. y P.K. Haff (1988) "Simulation of Eolian Saltation" *Science*, Vol. 241, p.820-822.

Anderson, R.S. y B. Hallet (1986) "Sediment transport by wind: Howard a general model" *Geological Society of America Bulletin*, Vol.97, p.523-535.

Andreotti, B. (2004) "A two-species modelo of aeolian sand transport" *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 510, p.47-70.

Anfuso, G. (2004) "Caracterización de celdas litorales en un tramo costero aparentemente homogéneo del litoral de Cádiz (SO de España)". *Revista Cuaternario & Geología*. Vol.18. p.25-36.

Anfuso, G.; Benavente, J.; Del Río, L. y F.J. Gracia (2007) "An approximation to short-term evolution and sediment transport pathways along the littoral of Cadiz Bay (SW Spain)" *Environmental Geology*. DOI 10.1007/s00254-007-1140-9.

Anton, D. y H. Goso (1974) "Estado actual de los conocimientos sobre el Cuaternario en el Uruguay" En: *Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre*. Vol. 3, p.151-157

Anthony, E.J.; Vanhee, S. y M-H. Ruz (2006) "Short-term beach-dune budgets on the north sea coast of France: Sand supply from shoreface to dunes, and the role of wind and fetch". *Geomorphology*. Vol. 81. p. 316-329.

Archetti, R. (2009) "Quantifying the Evolution of a Beach Protected by Low Crested Structures Using Video Monitoring". *Journal of Coastal Research*. Vol. 25. p.884- 899.

Arctowski, H. (1901) "Les dunes du Cap Polonio" *Bulletin de la Societé Belge de Geologie*. Tome XV, p.689-692.

ASTM D 2434: Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).

Bagnold, R.A. (1941) "The Physics of Blown Sand and Desert Dunes" Methuen, London. 265 pp.

Bauer, B.O., R.G.D. Davidson-Arnott, K.F. Nordstrom, J. Ollerhead y N. Jackson (1996) "Indeterminacy in aeolian sediment transport across beaches" *Journal of Coastal Research*, Vol. 12, No3, p. 641-653.

Bauer, B.O., Sherman, D.J., Nordstrom, K.F. y P.A. Gares (1990) "Aeolian transport measurements and prediction across a beach and dune at Castroville, California. En: Nordstrom, K.F., N.P.Psuty y R.W.G.Carter (eds) Coastal Dunes: Form and Process, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, p.39-56.

Bauer, B.O. y R.G.D. Davidson-Arnott (2002) "A general Framework for modeling sediment supplí to coastal dunes including wind angle, beach geometry, and fetch effects". *Geomorphology*. Vol.49. p.89-108.

Belly, P.Y. (1964) "Sand Movement by Wind" US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center. Technical Memorandum, No.1.

Bennett, S.W. y G.A. Olyphant (1998) "Temporal and Spatial Variability in Rates of Eolian Transport Determined from Automated Sand Traps: Indiana Dunes National Lakeshore, U.S.A." *Journal of Coastal Research*. Vol. 14, N°1, p.283-290.

Bird, E. C. F. (2000) "Coastal Geomorphology: An Introduction". John Wiley & Sons. Chichester.

Boon, J.D. (1969) "Quantitative analysis of beach sand movement, Virginia Beach, Virginia". *Sedimentology*. Vol. 13. p. 85-103.

Bressolier, C. y Y.F. Thomas (1997) "Studies on wind and plant interactions on the french atlantic coastal dunes" *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 47, pp.331-338.

Breton, F. y P. Esteban (1995) The management and recuperation of beaches in Catalunya. En: *Directions in European Coastal Management*. Ed: Healy, M.G. y J.P. Doody, p.511-516.

Brookfield, M. (1970) "Dune trends and wind regime in Central Australia" *Zeitschrift für Geomorphologie*. Supplement-band 10, p.121-153.

Brown A.C., y A. McLachlan (1990) "Ecology of Sandy Shores". Elsevier Science Publishers. Amsterdam.

Buckey, R. (1987) "The effect of sparse vegetation on the transport of dune sand by wind". *Nature*. Vol. 325, p.426-428.

Bullard, J.E. (1997) "A note on the use of the "Fryberger method" for evaluating potential sand transport by wind" *Journal of Sedimentary Research*. Vol. 67, N°3, p.499-501.

Burone, L.; Venturini, N.; Sprechmann, P.; Valente, P. y P. Muniz (2006) "Foraminiferal responses to polluted sediments in the Montevideo coastal zone, Uruguay". *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 52. p.61-73.

Butterfield, G.R. (1999) "Aplication of thermal anemometry and high-frequency measurements of mass flux to aeolian sediment transport research" *Geomorphology*. Vol.29. p. 31-58.

Byrne, R.J. (1968) "Aerodynamic Roughness Criteria in Aeolian Sand Transport". *Journal of Geophysical Research*. Vol. 73, N°2, p.541-547.

Cambilargiu, E. (1963) "Primer mapa isoviento del Uruguay. Tablas y diagramas del viento en 26 estaciones". Facultad de Ingeniería y Agrimensura. Publicación N° 24. 38pp.

Carmenen, B. y P. Larroudé (2003) "Comparison of sediment transport formulae for the coastal environment" *Coastal Engineering*. Vol. 48, p.111-132.

Carlin, P. (2005) "A suggested modification to a common expression for the energy content of a wind data sample" *Wind Energy*. Vol.8, p.477-480.

Carter, R.W.G. (1988) *Coastal Environments. An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines*. Academic Press, London. 617p.

Carter, R.W.G. y C.D. Woodroffe (1994) "Coastal Evolution. Late Quaternary shoreline morphodynamics (A contribution to IGCP Project 274-)" Cambridge University Press. 539 pp.

Castel, I.I.Y. (1988) "A Simulation Model of Wind Erosion and Sedimentation as Basis for Management of a Drift Area in Netherlands" *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 13, p.501-509.

Cooper, J.A.G. y O.H. Pilkey (2004) "Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule". *Global and Planetary Change*. Vol. 43. p. 157-171.

Cornelis, W.M. y D. Gabriels (2003) "The effect of surface moisture on the entrainment of dune sand by wind: an evaluation of selected models" *Sedimentology*. Vol. 50, p.771-790.

Craig, M.S. (2000) "Aeolian sand transport at the Landsphere Dunes, Northern California". *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 25, p.239-253.

Chapell, A.; G. McTainsh; J. Leys y C. Strong (2003) "Using geostatistics to elucidate temporal change in the spatial variation of aeolian sediment transport" *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol.28, p.567-585.

Chapman, D.M. (1990) "Aeolian Sand Transport - An Optimized Model". *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 15, p.751-760.

Chepil, W.S. y R.A. Milne (1941) "Wind erosion of soil in relation to roughness of surface" *Soil Science*. Vol. 52, N°6, p.417-432.

Chepil, W.S. (1956) "Influence of moisture on erodibility of soil by wind". *Proceedings of Soil Science Society American*. Vol. 20. p. 288-292.

David, R. (1994) "La fixation des dunes maritimes de Gascogne" *La Vie des Sciences, Comptes Rendues*. Tome 11, No2, p.123-147.

Davidson-Arnott, R.G.D. y M.N.Law (1996) "Measurement and prediction of long-term sediment supply to coastal foredunes" *Journal of Coastal Research*. Vol.12. No.3, p.645-663.

Davidson-Arnott, R.G.D., MacQuarrie, K. Y T. Aagaard (2005) "The effect of wind gust, moisture content and fetch length on sand transport on a beach". *Geomorphology*. Vol. 68. p.115-129.

Davidson-Arnott, R.G.D. y B.O. Bauer (2008) "Aeolian sediment transport on a beach: Thresholds, intermittency, and high frequency variability" *Geomorphology*. en prensa.

Dean, R.G. (1991) "Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications". *Journal of Coastal Research*. Vol. 7. p.53-84.

Defeo, O.; McLachlan, A.; Schowman, D.S.; Schlacher, T.A.; Dugan, J.; Jones, A.; Lastra, M. Y F. Scapini (2009) "Threats to sandy beach ecosystems: A review". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol. 81. p. 1-12.

Dingler, J.R; S.A. Hsu y T.E. Reiss (1992) "Theoretical and measured aeolian sand transport on a barrier island, Louisiana, USA" *Sedimentology*. Vol.39, N°6, p.1031-1044.

Dong, Z.; H. Liu; H. Wang y X. Wang (2003) "Aeolian sand transport: a wind tunnel model" *Sedimentary Geology*. Vol. 161, p.71-83.

Dong, Z.; Wang, H. Liu y X. Wang (2004) "The blown sand flux over a sandy surface: a wind tunnel investigation on the fetch effect" *Geomorphology*, Vol. 57, p. 117-127.

Eliot, I.G. y D.J. Clarke (1988) "Temporal and spatial variability of the sediment budget of the subaerial beach at Varilla, New South Wales" *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*. Vol. 33, p. 945-969.

Fryberger, S.G. (1979) "Dune forms and wind regime" En: McKee E.D. (Ed): *A Study of Global Sand Seas*. U.S. Geological Survey. Prof. Pap. 1052, 137-139.

Fryberger, S.G., A.M. Al-Sari, T.J. Clisham, S.A.R. Rizvi, K.G. Al-Hinai (1984) "Wind sedimentation in the Jafurah sand sea, Saudi Arabia" *Sedimentology*, Vol. 31, 413-431.

Gares, P.A. (1990) "Eolian processes and dune changes at developed and undeveloped sites, Island Beach, New Jersey". En: *Coastal Dunes: Form and process*. Ed. K.F.Nordstrom; N.P.Psuty y R.W.G.Carter. John Wiley & Sons Ltd. 388p.

Gares, P. A. (1992) "Topographic Changes Associated with Coastal Dune Blowouts at Island Beach State Park, New Jersey" *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 17, 589-604.

Gares, P.A.; R.G.D.Davidson-Arnott; B.O. Bauer, D.J. Sherman; R.W.G. Carter, D.W.T. Jackson y K.F. Nordstrom (1996) "Alongshore variations in aeolian

sediment transport: Carrick Finn Strand, Ireland". *Journal of Coastal Research*, Vol. 12, No3, p.673-682.

Gillette, D.A. y D. Ono (2008) "Expressing sand supply limitation using a modified Owen saltation equation". *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 33. p.1806-1813.

Goudie, A.S. (2008) "The history and nature of wind erosion in deserts" *Annual Review of Earth Planetary Science*. Vol. 36, p.97-119.

Greeley, R.; D.G. Blumberg and S.H. Williams (1996) "Field measurements of the flux and speed of wind-blown sand" *Sedimentology*. Vol.43, p.41-52.

Hardisty, J. Y R.J.S. Whitehouse (1988) "Evidence for a new sand transport process from experiments on Saharan dunes" *Nature*. Vol. 332, p.532-534.

Havholm, K.G. y G. Kocurek (1988) "A preliminary study of the dynamics of a modern dune, Algodones, southeastern California, USA". *Sedimentology*. Vol. 35. p.649-669.

Hesp, P. (1981) "Morphology, dynamics and internal stratification of some established foredunes in southeast Australia" *Sedimentary Geology*. Vol. 55. p.17-41

Hesp, P. y B.G. Thom (1990) "Geomorphology and evolution of active transgressive dunefields". En Nordstrom, K.F., Psuty, N.P., Carter, R.W.G. (Eds) *Coastal Dunes Form and Process*. Wiley. Chichester.

Hesp, P. (2002) "Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics" *Geomorphology*. Vol.48, p.245-268.

Hesp, P.; de Castilhos, J.A.; da Silva, G.M.; Dillenburg, S.; Martinho, C.T.; Aguiar, D.; Fornari, M.; Fornari, M. y G. Antunes (2007) "Regional wind fields and dunefield migration, southern Brazil". *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 32, p. 561-573.

Horikawa, K. y H.W. Shen (1960) "Sand movement by wind action. On the characteristics of sand traps" *US Army Corps of Engineers. Beach Erosion Board Technical memorandum N°119*. 61pp.

Howard, A.D.; J.B. Morton; M. Gad-El-Hak y D.B. Pierce (1978) "Sand transport model of barchan dune equilibrium" *Sedimentology*, Vol. 25, pp 307-338.

Houston, J.R. (2008) "The economic value of beaches-A 2008 update". *Shore and Beach*. Vol. 78. p.22-28.

Horikawa, K. y Shen, H. (1960) "Sand movement by wind action (of the characteristics of sand traps)". *U.S. Army Corps of Engineers. Technical Memo 119*, 51p

Hsu, S.A. (1971) "Wind Stress Criteria in Eolian Sand Transport" *Journal of Geophysical Research*, Vol.76, p.8684-8686.

Hsu, S. A. (1973) "Computing aeolian sand transport from shear velocity measurements" *Journal of Geology*, Vol. 81, p.739-743.

Hsu, S.A. (1988) "Coastal Meteorology" Academic Press Inc. San Diego. 260pp.

Hsu, J.R.C. y C.Evans (1989) "Parabolic Bay Shapes and Applications". *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Part 2*, Thomas Telford, London, Vol. 87. pp. 557-570.

Hunt, M.L.; R. Zenit; C.S. Campbell y C.E. Brennen (2002) "Revisiting the 1954 suspension experiments of R.A. Bagnold" *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 452, p.1-24.

Hunter, R.E. y B.M. Richmond (1988) "Daily cycles in coastal dunes" *Sedimentary Geology*, Vol.55, p.43-67.

Illenberger, W.K. y I.C. Rust (1988)"A sand budget for the Alexandria coastal dunefield, South Africa". *Sedimentology*. Vol. 35, p.513-521.

Inman, K.L., G.C. Ewing y J.B. Corliss (1966) "Coastal Sand Dunes of Guerrero Negro, Baja California, Mexico" *Geological Society of American Bulletin*. Vol. 77. p.787-802.

Iversen, J.D. y K.R. Rasmussen (1999) "The effect of wind speed and bed slope on sand transport" *Sedimentology*. Vol. 46, p.723-731.

Jackson, D.W.T. (1996a) "Potential inertial effects in aeolian sand transport: preliminary results" *Sedimentary Geology*. Vol. 106. N°3-4, p.193-202.

Jackson, D.W.T. (1996b) "A new, instantaneous aeolian sand trap design for field use" *Sedimentology*. Vol.43, p.791-796.

Jackson, D.W.T. y K.F. Nordstrom (1997) "Effects of time-dependent moisture content of surface sediments on aeolian transport rates across a beach, Wildwood, New Jersey, USA" *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol.22, p.611-621.

Jackson, D.W.T. y K.F. Nordstrom (1998) "Aeolian transport of sediment on a beach during and after rainfall, Wildwood, NJ, USA" *Geomorphology*. Vol.22, p.151-157.

Jackson, D.W.T. y J.A.G. Cooper (1999) "Beach fetch distance and aeolian sediment transport" *Sedimentology*. Vol.46, p.517-522.

Jensen, J.L. y M. Sorensen (1982) "Estimation of some aeolian saltation transport parameters: A re-analysis of William´s data" *Sedimentology*. Vol. 33, p.547-558.

Jimenez, J.A., L.P Maia, J. Serra y J. Morais (1999) "Aeolian dune migration along the Ceará coast, north-eastern Brazil" *Sedimentology*. Vol. 46, p. 689-701.

Jones, J.R. y B.B. Willetts (1979) "Errors in measuring uniform aeolian sand flow by means of an adjustable trap" *Sedimentology*. Vol.26, p.463-468.

Kadib, A.A. (1965). "A function of sand movement by wind". Univ. California, Berkeley. Tech. Rept. HEL-2-12, 91 pp.

Kawamura, R. (1951) "Study of Sand Movement by Wind". Univ. Tokyo. Rept. Inst. Sci. & Technology, Vol.5.

Käyhkö, J. (2007) "Aeolian blowout dynamics in subarctic lapland based on decadal levelling investigations" *Geografiska Annaler Series A: Physical Geography*. Vol. 89, p65-81.

Khalaf, F.I. & Al-Ajmi, D. (1993). "Aeolian processes and sand encroachment problems in Kuwait". *Geomorphology*. Vol. 6. 111-134.

Kokurek, G.; Townsley, M.; Yeh, E.; Havholm, K. Y M.L. Sweet (1992) "Dune and dune-field development on Padre Island, Texas, with implications for interdune deposition and water-table-controlled accumulation". *Journal of Sedimentary Petrology*. Vol. 62. p. 622-635.

Kroon, Aart y Piet Hoekstra (1990). "Eolian sediment transport on a natural beach". *Journal of Coastal Research*. Vol. 6. 367-379.

Krumbein, W.C. (1944) "Shore processes and beach characteristics, technical memorandum" N°3. Beach Erosion Board, U.S.Army Corps of Engineers. 47pp.

Lancaster, N. (1985): "Variations in wind velocity and sand transport on the windward flank of desert sand dunes". *Sedimentology*. Vo. 32, p.581-593.

Leatherman, S.P. (1978) "A new aeolian sand trap design" *Sedimentology*, Vol. 25, 303-306.

Lee, J.A.(1987) "A field experiment on the role of small scale wind gustiness in aeolian sand transport" *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 12, p.331-335.

Leoz, E. (1990) "Transporte de arena por el viento en la playa La Esmeralda". Monografía no publicada de la materia Geomorfología. Uruguay. 18p.

Lettau, K. y H. Lettau (1969) "Bulk transport of sand by the barchans of the Pampa de la Joya in southern Peru". *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 13, p. 182-195.

Lettau, K. y H. Lettau (1978) "Experimental and micro-meteorological field studies of dune migration. En: Explaining the World Driest Climate. Lettau, HH. Y K. Lettau (eds). IES Report, 101, Institute for Environmental Studies, University of Wisconsin-Madison. 110-147p.

Levin, N.; Kidron, G.J. y E. Ben-Dor (2007) "Surface properties of stabilizing coastal dunes: combining spectral and field analyses". *Sedimentology*, Vol.54, p.771-788.

Li, J.; Okin, G.S.; Alvarez, L. Y H. Epstein (2007) "Quantitative effects of vegetation cover on wind erosion and soil nutrient loss in a desert grassland of southern New Mexico, USA". *Biogeochemistry*. Vol. 85. p.317-332.

Livingstone, I.; Wiggs, G.F.S. y C.M. Weaver (2007) "Geomorphology of desert sand dunes: a review of recent progress". *Earth-Science Reviews*. Vol. 80. p. 239-257.

Long, J.T. y R.P. Sharp (1964) "Barchan-Dune movement in Imperial Valley, California.". *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 75. 149-156.

Matias, A.; Ferreira, Ó., Dias, J.A. y A. Vila-Concejo (2004) "Development of indices for the evaluation of dune recovery techniques". *Coastal Engineering*. Vol.51. p. 261-276.

McGlashan, D.J.; Duck, R.W. y C.T. Reid (2005) "Defining the foreshore: coastal geomorphology and British laws" *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol. 62. p. 183-192.

McKenna Neuman, C. y W.G. Nickling (1994) "Momentum extraction with saltation: Implications for experimental evaluation of wind profile parameters" *Boundary-Layer Meteorology*. Vol.68, p.35-50.

McKenna Neuman, C. y C. Maxwell (1999) "A wind tunnel study of the resilience of three fungal crust to particle abrasion during aeolian sediment transport" *Catena*. Vol.38, p.151-173.

McKenna Neuman, C. (2003) "Effects of temperature and humidity upon the entrainment of sedimentary particles by wind" *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 108, p.61-89.

McKenna Neuman, C. (2006) "Measurement of water content as a control of particle entrainment by wind" *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 31, p.303-317.

Meur-Férec, C. y M-H. Ruz (2002) "Transports éoliens réels et théoriques en haut de plage et sommet de dune (Wissant, Pas-de-Calais, France)" *Géomorphologie: Relief, processus, environnement*. No4, p.321-334.

McEwan, I.K. (1993) "Bagnold's kink: a physical feature of a wind velocity profile modified by blown sand?". *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol.18. p.145-156.

McEwan, I.K. y Willetts, B.B. (1993) "Sand Transport by Wind: a review of the current conceptual model". En Pye, K. (ed): "The Dynamics and Environmental Context of Aeolian Sedimentary Systems". *Geological Society Special Publication No. 72*. P. 7-16.

MTOP (1979) "Conservación y mejora de playas - URU. 73.007" PNUD-UNESCO. Montevideo.

Mulligan, K.R. (1988): "Velocity profiles measured on the windward slope of a transverse dune". *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 13, p.573-582.

Muñoz-Perez, J.J.; de San Roman-Blanco, B.L.; Gutierrez-Mas, J.M.; Moreno, L. y G.J. Cuenca (2001) "Cost of Beach maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain). *Coastal Engineering*. Vol. 42. p. 143-153.

Muniz, P.; Venturini, N. y A. Martínez (2002) "Physico-chemical characteristics and pollutants of the benthic environment in the Montevideo coastal zone, Uruguay". *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 44. p. 956-976.

Namikas, S.L. y D.J. Sherman (1997) "Predicting aeolian sand transport: revisiting the White model" *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 22, p.601-604.

Namikas, S.L. y D.J. Sherman (1998) "AEOLUS II: an Interactive program for the simulation of aeolian sedimentation" *Geomorphology*. Vol. 22, p.135-149.

Namikas, S.L. (2002) "Field evaluation of two traps for high-resolution aeolian transport measurements. *Journal of Coastal Research*. Vol. 18, No.1, p.136-148.

Namikas, S.L. (2003) "Field measurement and numerical modeling of aeolian mass flux distributions on a sandy beach". *Sedimentology*, Vol. 50, p.303-326.

Namikas, S.L.; B.O.Bauer y D.J.Sherman (2003) "Influence of averaging interval on shear velocity estimates for aeolian transport modeling". *Geomorphology*. Vol. 53. p.235-246.

Nash, D.B. (1994) "Effective Sediment-Transporting Discharge from Magnitude-Frequency Analysis". *Journal of Geology*. Vol. 102. 79-95.

NICMM, National Institute of Coastal and Marine Management of the Netherlands (2004) "A guide to coastal erosion management practices in Europe: lessons learned" En [www.euroasion.org/shoreline/lessons\\_learned.pdf](http://www.euroasion.org/shoreline/lessons_learned.pdf) (acceso 10Dic2009)

Ni, J.; Li, Z. y C. Mendoza (2004) "Blown-sand transport rate" *Earth surface processes and landforms*. Vol. 29, p.1-14.

Nickling, W.G. (1984) "The stabilizing role of bonding agents on the entrainment of sediment by wind" *Sedimentology*. Vol. 31. p.111-117.

Nickling, W.G. (1988) "The initiation of particle movement by wind". *Sedimentology*. Vol. 35. P.499-511.

Nordstrom, K.F. & Jackson, N.L. (1992): "Effect of source width and tidal elevation changes on aeolian transport on an estuarine beach". *Sedimentology*, Vol.39.p.769-778.

Nordstrom, K.F.; B.O.Bauer, R.G.D. Davison-Arnott: P.A. Gares, R.W.G. Carter; N.L. Jackson y D.J. Sherman (1996) "Offshore aeolian transporta cross a beach: Carick Finn Strand, Ireland" *Journal of Coastal Research*, Vol. 12, No3, p.664-672.

Nordstrom, K.F. y S.M. Arens (1998) "The role of human actions in evolution and management of foredunes in The Netherlands and New Jersey, USA". *Journal of Coastal Conservation*. Vol. 4. pp. 169-180.

Nordstom, K.F., Lampe, R. Y L.M. Vandemark (2000) Reestablishing naturally functioning dunes on developed coasts. *Environmental Management*. Vol. 25. No 1. pp. 37-51.

Nordstom, K.F., Jackson, N.L.; Bruno, M.S. y H. A. de Butts (2002) Municipal initiatives for managing dunes in coastal residential areas: a case study of Avalon, New Jersey, USA. *Geomorphology*, Vol. 47, pp. 137-152.

Nordstrom, K.F. (2005) "Beach Nourishment and coastal habitats: Research needs to improve compatibility". *Restoration Ecology*. Vol. 13. p.215-222.

Nordstrom, K.F.; Jackson, N.L.; Hartman, J.M. y M. Wong (2007) "Aeolian sediment transport on a human-altered foredune". *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 32. pp. 102-115.

Nordstrom, K.F. (2008) "Beach and dune restoration" Cambridge University Press. 187pp. UK.

O'Brien M.P. y B.D. Rindlaub (1936) "The transportation of sand by wind" *Civil Engineering*. Vol.6.p.225-242.

Oke, T.R. (1987) "Boundary layer climates". 2a ed. Routledge. 435 pp.

Olivier, M.J. y G.G. Garland (2003) "Short-term monitoring of foredune formation on the East Coast of South Africa". *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol.28. p.1143-1155.

Owen, P.R. (1964) "Saltation of uniform grains in air". *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 20. p.225-242.

Panario, D. y Piñeiro, G.S. (1997) "Vulnerability of oceanic dune systems under wind pattern change scenarios in Uruguay" *Climate Research*. Vol.9. p.67-72.

Panario, D.; Gutiérrez, O. y G. Piñeiro (2008) "Propuesta técnica para la conservación y recuperación de la playa del Buceo y playas certificadas de Montevideo. Informe Final". Facultad de Ciencias, Unidad de Ciencias de Epigénesis. 80pp y anexos.

Panario, D.; Gutiérrez, O. y G. Piñeiro (2008b) "Hacia una restauración ambiental en la playa Brava de Montevideo". Actas CD Workshop regional "Erosión Costera: Herramientas para su estudio y gestión". UNESCO ECOPLATA Montevideo. Disponible en: <http://www.unesco.org/uy/ciencias-naturales/es/areas-de-trabajo/ciencias-naturales/ciencias-basicas-politica-cientifica-y-desarrollo-sostenible/inicio/en-portada/taller-regional-erosion-costera-herramientas-para-su-estudio-y-gestion.html> accedido 2010-01-08.

Pearce, K.I. e I.J. Walker (2005) "Frequency and magnitude biases in the 'Fryberger' model, with implications for characterizing geomorphically effective winds" *Geomorphology*. Vol.68, p.39-55.

Phillips, J.D. (1994) "Deterministic uncertainty in landscapes". *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 19. P.389-401.

Pluis, J.L.A. (1992) "Relationships between deflation and near surface wind velocity in a coastal dune blowout" *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol.17. 663-673.

Potter, P.E. (1994) "Modern sands of South America: composition, provenance and global significance" *Geol Rundsch*. Vol. 83, p.212-232.

Preciozzi, F.J.; Spoturno, W.; Heinzen, W. y P. Rossi (1985) "Memoria explicativa de la carta geológica del Uruguay a escala 1:500.000. DINAMIGE, 72 p.

Prohaska F.J. (1976) *World Survey of Climatology. Climates of Central and South America*. Vol.12. Ed. W.S.Schwerdtfeger. Elsevier Science Publisher. Amsterdam.

Psuty, N.P. (1988a) "Sediment budget and dune/beach interaction" *Journal of Coastal Research*. Spec. Issue. No3, p. 1-4.

Pye, K. (1990) "Physical and human influences on coastal dune development between the Ribble and Mersey estuaries, northwest England". En: *Coastal Dunes: Form and process*. Ed. K.F.Nordstrom; N.P.Psuty y R.W.G.Carter. John Wiley & Sons Ltd. 388p.

Pye, K. (1993) "The nature and significance of aeolian sedimentary systems" en Pye, K. (ed): "The Dynamics and Environmental Context of Aeolian Sedimentary Systems". Geological Society Special Publication No.72. p.1-4.

Roig i Munar, F.X. (2004) "Análisis y consecuencias de la modificación artificial del perfil playa-duna provocado por el efecto mecánico de su limpieza". *Investigaciones Geográficas*, No.33, p.87-103.

Ruiping, Z., Minrui, Q.; Bao, Y.; Jianjun, Q. y Z. Kecun (2008) "Characteristics of near-surface wind regimes in the Taklimakan Desert, China. *Geomorphology*. Vol. 96, p. 39-47.

Ruz, M-H. y C. Meur-Férec (2004) "Influence of high water levels on aeolian sand transport: upper beach/dune evolution on a macrotidal coast, Wissant Bay, northern France" *Geomorphology*. Vol. 60, p.73-87.

Saizar, A. (1997) "Assessment of impact of a potential sea-level rise on the coast of Montevideo, Uruguay" *Climate Research*. Vol.9. p.73-79.

Sarre, R.D. (1988) "Evaluation of aeolian sand transport equations using intertidal zone measurements, Saunton Sands, England". *Sedimentology*. Vol.35, p.671-679.

Saqqā, W.A. y A.W. Saqqā (2007) "A computer program (WDTSRP) designed for computation of sand drift potential (DP) and plotting sand roses". *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 32, p. 832-840.

Sarre, R.D. (1989) "Aeolian sand drift from the intertidal zone on a temperate beach: potential and actual rates" *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol.14. p.247-258.

Sauermann, G.; Andrade, J.S.; Maia, L.P.; Costa, U.M.S.; Araújo, A.D. y H.J. Herrmann (2003) "Wind velocity and sand transport on a barchan dune" *Geomorphology*. Vol. 54. p.245-255.

Saye, S.E.; van der Wal, D.; Pye, K. y S.J.Blott (2005) "Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: An investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data". *Geomorphology*. Vol. 72. p.128-155.

SCOR (Scientific Committee on Ocean Research) Working Group 89 (1991) "The response of beaches to sea-level changes: a review of predictive models". *Journal of Coastal Research*. Vol. 7, N°3. p. 895-921.

Sherman, D.J. (1992) "An equilibrium relationship for shear velocity and apparent roughness length in aeolian saltation" *Geomorphology*. Vol.5, p.419-431.

Sherman, D.J. (1995) "Problems of scale in the modeling and interpretation of coastal dunes" *Marine Geology*. Vol. 124, p.339-349.

Sherman, D.J.; D.W.T. Jackson; S.L. Namikas y J.Wang (1998) "Wind-blown sand on beaches: an evaluation of models" *Geomorphology*. Vol.22, p.113-133.

Short, A.D. y P.A. Hesp (1982) "Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia" *Marine Geology*, Vol. 48. p.259-284.

Simionato, C.G.; Dragani, W.; Meccia, V. y M. Núñez (2004) "A numerical study of the barotropic circulation of the Río de la Plata estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth's rotation and low frequency wind variability". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol. 61. p. 261-273.

Simeoni, U.; Calderoni, G.; Tessari, U. y E. Mazzini (1999). "A new application of System Theory to foredunes intervention strategies". *Journal of Coastal Research*. Vol. 15. p. 457-470.

Sørensen, M. (1991) "An analytic model of wind-blown sand transport". *Acta Mech. Suppl.* 1. p. 67-81.

Spies, P.-J.; McEwan, I.K. y G.R.Butterfield (1995) "On wind velocity profile measurements taken in wind tunnels with saltating grains". *Sedimentology*. Vol. 42. p. 515-521.

Spies, P.-J.; McEwan, I.K. y G.R.Butterfield (2000) "One-dimensional transition behaviour in saltation" *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 25. p. 505-518.

Stive, J.F.; Aarninkhof, S.G.J.; Hamm, L.; Hanson, H.; Larson, M.; Wijnberg, K.M.; Nicholls, R.J. y M. Capobianco (2002). "Variability of shore and shoreline evolution". *Coastal Engineering*. Vol. 47. p. 211-235.

Stout, J.E. y T.M. Zobeck (1997) "Intermittent saltation" *Sedimentology*. Vol. 44, p.959-970.

Svasek, J.N. & Terwindt, J.H.J. (1974) "Measurements of sand transport by wind on a natural beach". *Sedimentology*, Vol. 21, p.311-322.

Thieler, E.R.; Pilkey, O.H.; Young, R.S.; Bush, D.M. y F.Chai (2000) "The use of mathematical models to predict beach behavior for U.S. Coastal Engineering: A critical review". *Journal of Coastal Research*. Vol. 16. p.48-70.

Tsoar, H. (1974) "Desert dunes morphology and dynamics, El Arish (Northern Sinai)". *Zeitschrift für Geomorphologie*. Suppl. Bd. 20. 41-61.

Tsoar, H. (1983) "Dynamic processes acting on a longitudinal (seif) sand dune. *Sedimentology*. Vol. 30, p.567-578.

Van der Wal, D. (2000) "Modelling aeolian sand transport and morphological development in two beach nourishment areas" *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 25, p.77-92.

Ventura, N.; Cataldo, J. Y G. Casaravilla (2000) "Feasibility of use of wind energy generation at sewage plants in Montevideo City". *World Renewable Energy Congress*. N°6. p.1225-1228. Pergamon, Amsterdam.

Vespremenau-Sroe, A. Y L. Preoteasa (2007) "Beach-dune interactions on the dry-temperate Danube delta coast" *Geomorphology*. Vol. 86. p.267-282.

Volonté, C.R. y R.J. Nicholls (1995) "Uruguay and Sea-Level Rise: Potential Impact and Responses" *Journal of Coastal Research*. Special Issue No.14, p.262-284.

Wahid, A.M. (2008) "GIS-based modeling of wind-transported sand on the Qaa Plain beach, southwestern Sinai, Egypt". *Journal of Coastal Research*. Vol.24. p. 936-943.

Wal, A. y J. McManus (1993) "Wind regime and sand transport on a coastal beach-dune complex, Tentsmuir, eastern Scotland", en Pye, K. (ed): "The Dynamics and Environmental Context of Aeolian Sedimentary Systems" *Geological Society Special Publication No.72*, p.159-171.

Wang, P.; Kraus, N.C. y R.A. Davis (1998) "Total longshore sediment transport rate in the surf zone: field measurements and empirical predictions". *Journal of Coastal Research*. Vol.14. Nº1. p.269-282.

Wang, P. y N.C. Kraus (1999) "Horizontal water trap for measurement of aeolian sand transport". *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 24. p.65-70.

Wang, X.; Dong, Z.; Liu, L. Y J. Qu (2004) "Sand sea activity and interactions with climatic parameters in the Taklimakan Sand Sea, China". *Journal of Arid Environments*, Vol. 57, p. 85-98.

Werner, B.T. (1990) "A steady-state model of wind-blown sand transport" *The Journal of Geology*. Vol.98. No.1, p.1-17.

White, B.R. (1979) "Soil transport by wind on Mars". *Journal of Geophysical Research*. Vol. 84. p.4643-4651.

White, B.R.; R. Greeley; J.D. Iversen y J.B. Pollack (1976) "Estimated grain saltation in a Martian atmosphere" *Journal of Geophysical Research*. Vol.81. No.32, p.5643-5652.

White, B.R. y H. Tsoar (1998) "Slope effect on saltation over a climbing sand dune". *Geomorphology*. Vol. 22. p. 159-180.

Wiggs, G.F.S.; Atherton, R.J. y A.J. Baird (2004) "Thresholds of aeolian sand transport: establishing suitable values". *Sedimentology*. Vol. 51. p. 95-108.

Willets, B.B.; Rice, M.A. & Swaine, S.E. (1982) "Shape effect in aeolian grain transport" *Sedimentology*, Vol. 29. p.409-417.

Yasso, W.E. (1965) "Plan Geometry of Headland Bay Beaches. *Journal of Geology*. Vol. 73. p.702-714.

Yizhaq, H.; Ashkenazy, Y. y H. Tsoar (2007). "Why do active and stabilized dunes coexist under the same climatic conditions?" *Physical Review Letters*. PRL 98, 188001.

Zingg, A.W. (1953) "Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material". *Proc. 5<sup>th</sup> Hydraul. Conf. Bull. Iowa State Univ. Studies in Engineering*, Vol. 34. p. 111-135.

Zobeck, T.M.; G. Sterk; R. Funk; J.L. Rajot; J.E. Stout y R.S. Van Pelt (2003) "Measurement and data analysis methods for field-scale wind erosion Studies and model validation" *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 28, p.1163-1188.

## Anexo

I.- Descripción y salidas de los 10 modelos usados para distintas granulometrías.

II.- Descripción y salidas de 12 modelos para arena de 0,25mm.

III.- Datos de las estaciones meteorológicas durante el desarrollo de las observaciones de transporte de arena por el viento en el terreno.

IV.- Datos del perfil del viento durante el desarrollo de las observaciones de transporte de arena por el viento.

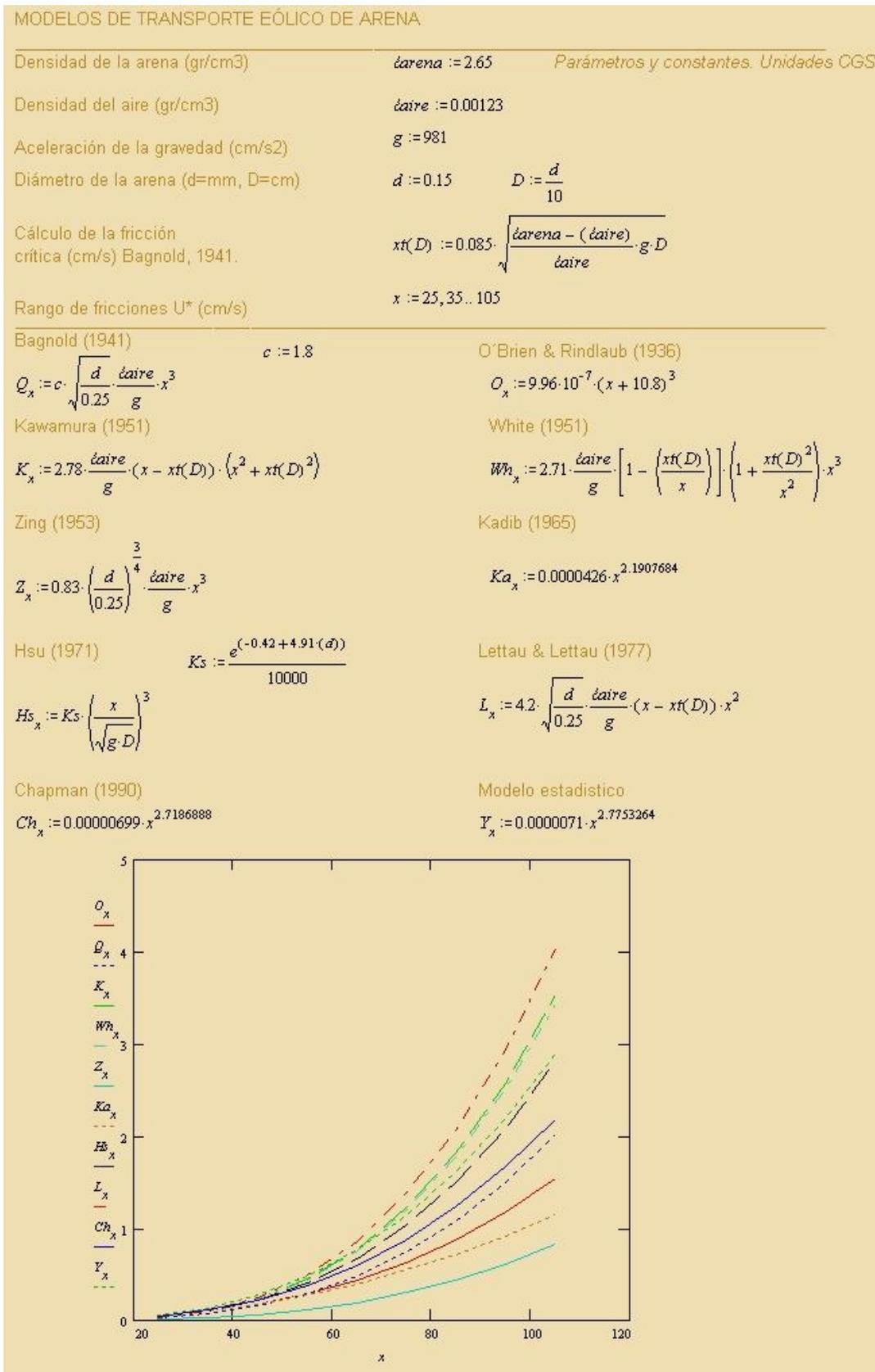
V.- Variabilidad del viento en los perfiles del viento durante el desarrollo de las observaciones de transporte de arena por el viento (Box-Plots).

VI.- Series temporales de las velocidades del viento durante el desarrollo de las observaciones de transporte de arena por el viento.

VII.- Relaciones entre la fricción del viento y la velocidad del viento en estaciones meteorológicas próximas, durante períodos de transporte de arena por el viento sobre la playa supramareal.

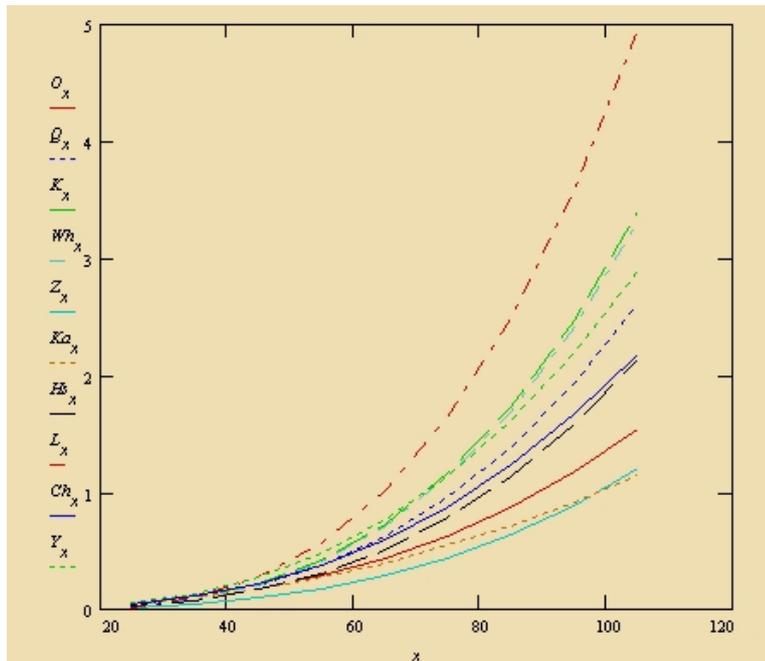
### Anexo I

Ecuaciones de los modelos de transporte de arena por el viento usados y sus salidas para diámetro de grano de **0,15mm**.

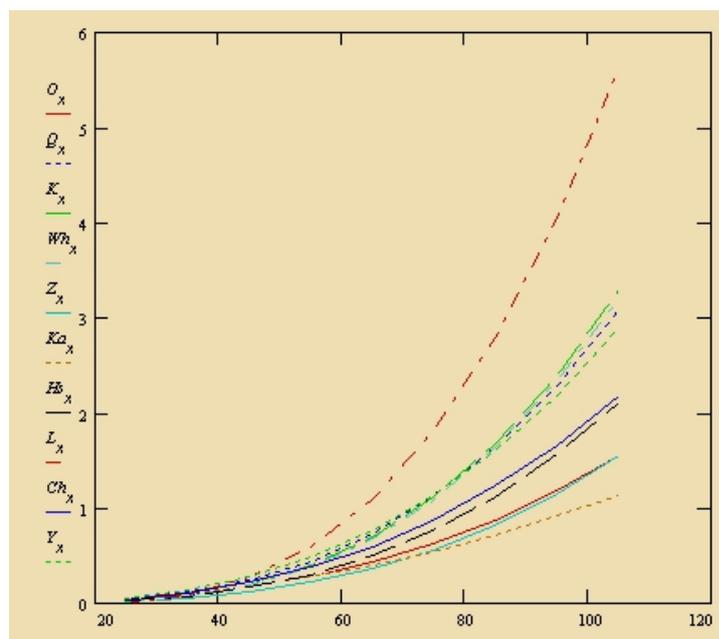


### Anexo I (continuación)

Ecuaciones de los modelos de transporte de arena por el viento usados y sus salidas para diámetro de grano de **0,25mm**.

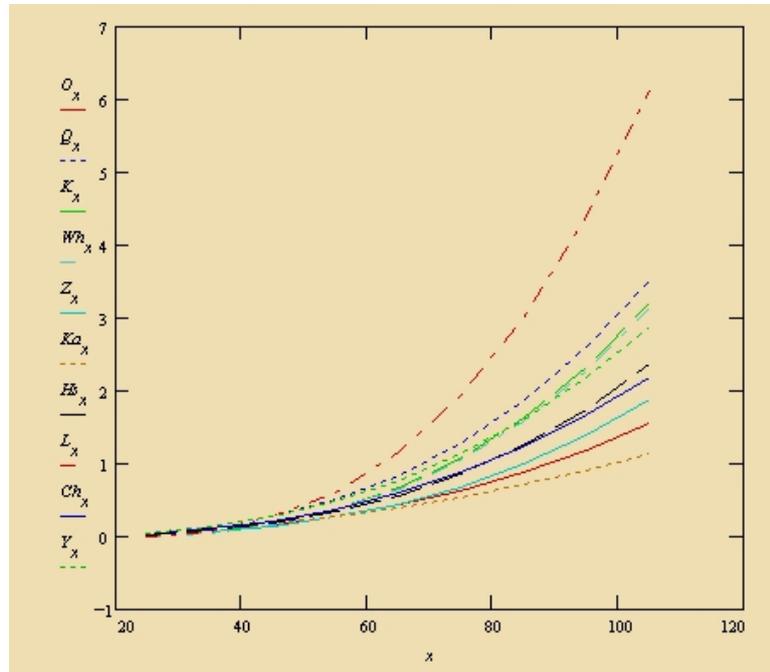


Ecuaciones de los modelos de transporte de arena por el viento usados y sus salidas para diámetro de grano de **0,35mm**.



## Anexo I (continuación)

Ecuaciones de los modelos de transporte de arena por el viento usados y sus salidas para diámetro de grano de **0,45mm**.



Ecuaciones de los 12 modelos de transporte de arena por el viento usados inicialmente *incluyendo los modelos de Owen (1964) y Sorensen (1991)* junto a los resultados para un diámetro de grano de 0,20mm.

$\delta_{arena} := 2.65$      $\delta_{aire} := 0.00123$      $g := 981$      $d := 0.25$      $D := \frac{d}{10}$      $D = 0.025$   
 $x := 25, 35 \dots 115$

$xt(D) := 0.085 \cdot \sqrt{\frac{\delta_{arena} - (\delta_{aire})}{\delta_{aire}} \cdot g \cdot D}$   
 $xt(D) = 20$

Ecuación de Bagnold (1941) para el cálculo de la fricción crítica de inicio del transporte de arena por el viento

1.- Hsu (1971)

$$H_x := K \cdot \left( \frac{x}{\sqrt{g \cdot D}} \right)^3$$

$$K := \frac{e^{(-0.42 + 4.91 \cdot (d))}}{10000}$$

$$K = 2.242 \cdot 10^{-4}$$

2.- Bagnold (1941)

$$Q_x := 2 \cdot \sqrt{\frac{d}{0.25} \cdot \frac{\delta_{aire}}{g}} \cdot x^3$$

3.- O'Brien & Rindlaub (1936)

$$O_x := 9.96 \cdot 10^{-7} \cdot ((x + 10.8))^3$$

4.- Kawamura (1951)

$$K_x := 2.78 \cdot \frac{\delta_{aire}}{g} \cdot (x - xt(D)) \cdot (x + xt(D))^2$$

5.- White (1951)

$$W_x := 2.61 \cdot \frac{\delta_{aire}}{g} \cdot (x - xt(D)) \cdot (x^2 + xt(D)^2)$$

equivalente a:

$$Wh_x := 2.71 \cdot \frac{\delta_{aire}}{g} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{xt(D)}{x} \right) \right] \cdot \left( 1 + \frac{xt(D)^2}{x^2} \right) \cdot x^3$$

6.- Zing (1953)

$$Z_x := 0.83 \cdot \left( \frac{d}{0.25} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{\delta_{aire}}{g} \cdot x^3$$

7.- Kadib (1965)

$$Ka_x := 0.0000426 \cdot x^{2.1907684}$$

8.- Lettau & Lettau (1977)

$$L_x := 4.2 \cdot \sqrt{\frac{d}{0.25} \cdot \frac{\delta_{aire}}{g}} \cdot (x - xt(D)) \cdot x^2$$

9.- Chapman (1990)

$$Ch_x := 0.00000699 \cdot x^{2.7186888}$$

10.- Modelo estadístico

$$Y_x := 0.0000071 \cdot x^{2.7753264}$$

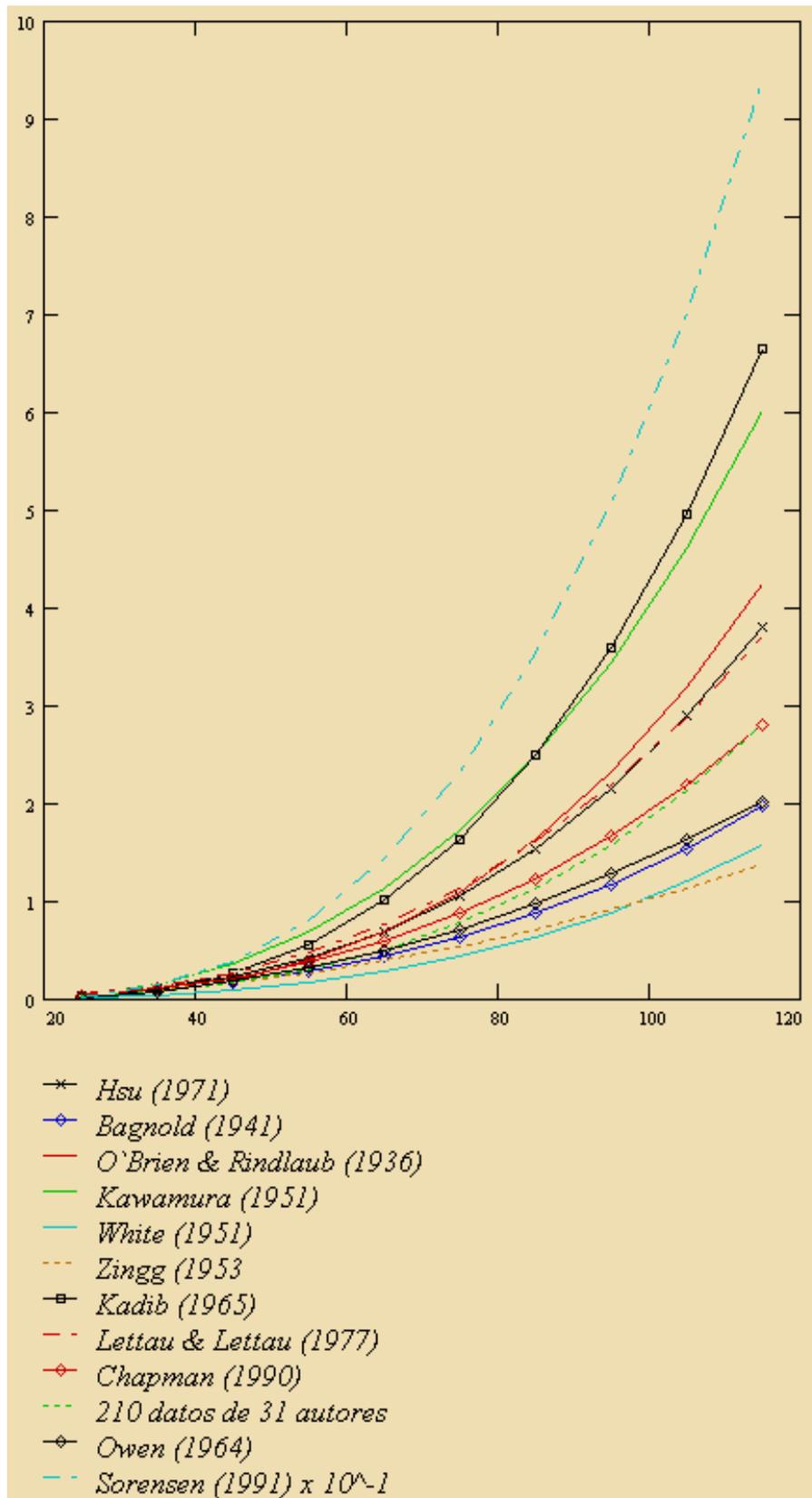
$$Ow_x := 0.25 \cdot \left[ \left[ 1 - \left( \frac{xt(D)}{x} \right) \right] \right] \cdot \left[ 1 + \left( 24.27 \cdot \frac{xt(D)}{x} \right) \right] \cdot \left( \frac{\delta_{aire}}{g} \right) \cdot x^3$$

11.- Owen (1964)

12.- Sorensen (1991)

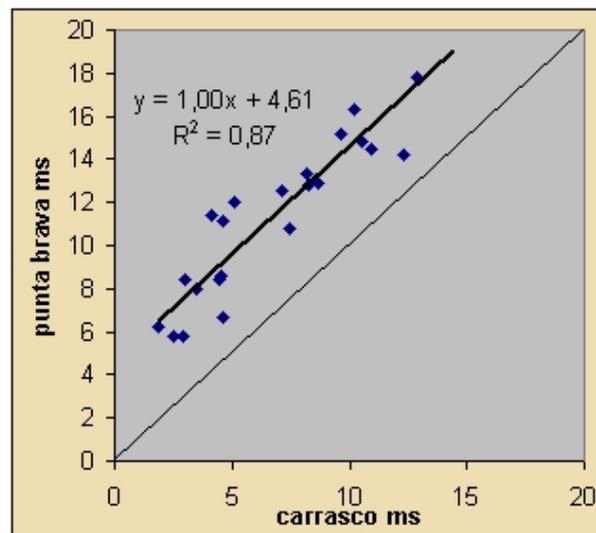
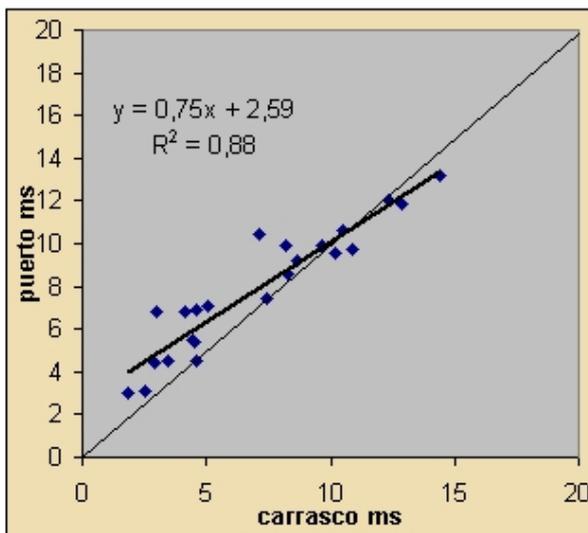
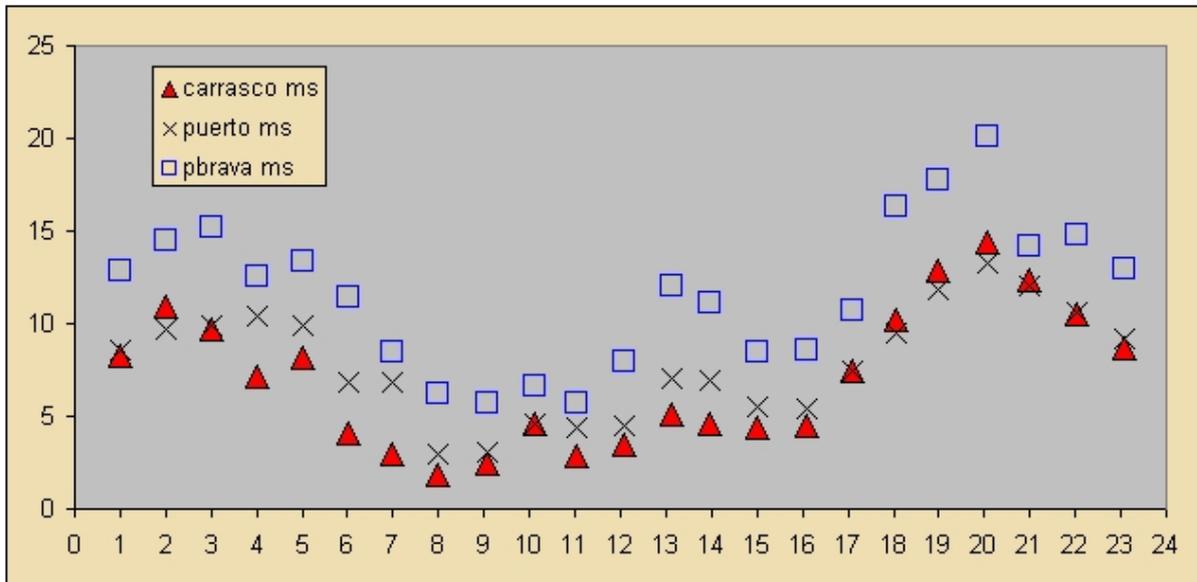
$$So_x := 0.0004 \cdot g \cdot \left[ 1 - \left( \frac{xt(D)}{x} \right) \right] \cdot \left[ 1 + (7.6 \cdot (xt(D))) + \left( 205 \cdot \frac{x}{xt(D)} \right) \right] \cdot \left( \frac{\delta_{aire}}{g} \right) \cdot x^3$$

Anexo II **(continuación)** Expresión gráfica de los resultados de 12 modelos de transporte de arena por el viento usados *incluyendo los modelos de Owen (1964) y Sorensen (1991)* para un diámetro de grano de 0,25mm.



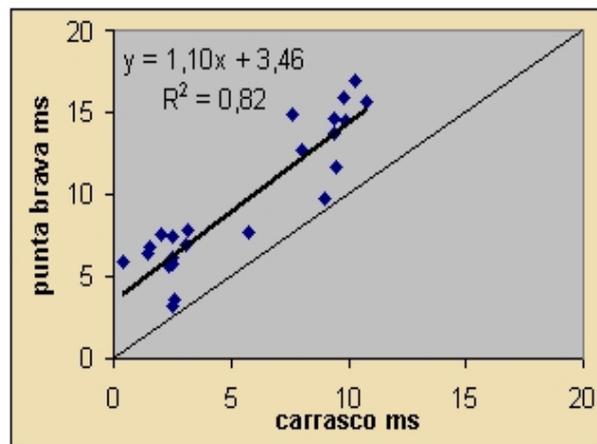
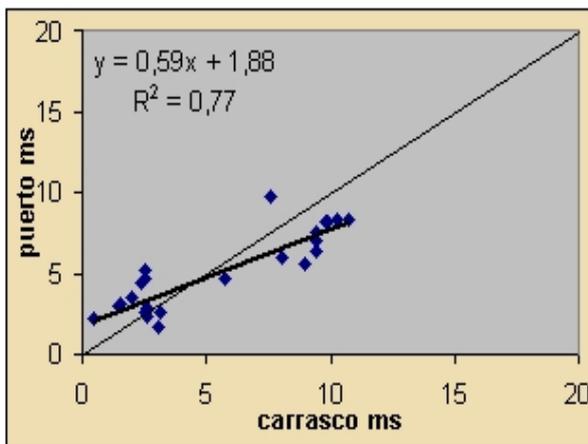
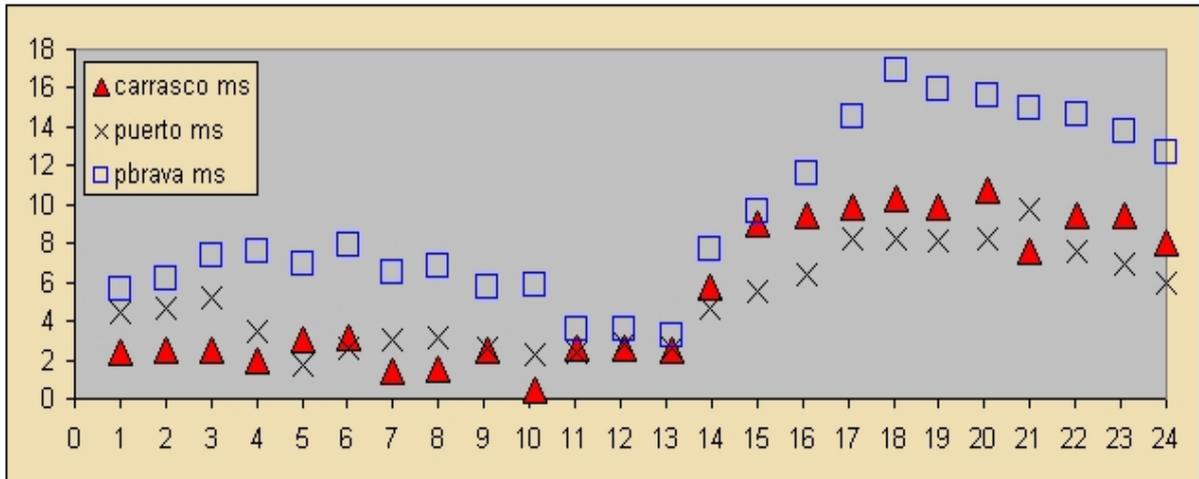
Anexo III.- Datos de las estaciones meteorológicas durante el desarrollo de las observaciones de transporte de arena por el viento en el terreno.

Datos horarios de las velocidades medias del viento durante el **18 de Septiembre de 2009, 19:30hs** (arriba) y relaciones entre la velocidad del viento en Carrasco con el registro de Puerto de Montevideo y Punta Brava (abajo).



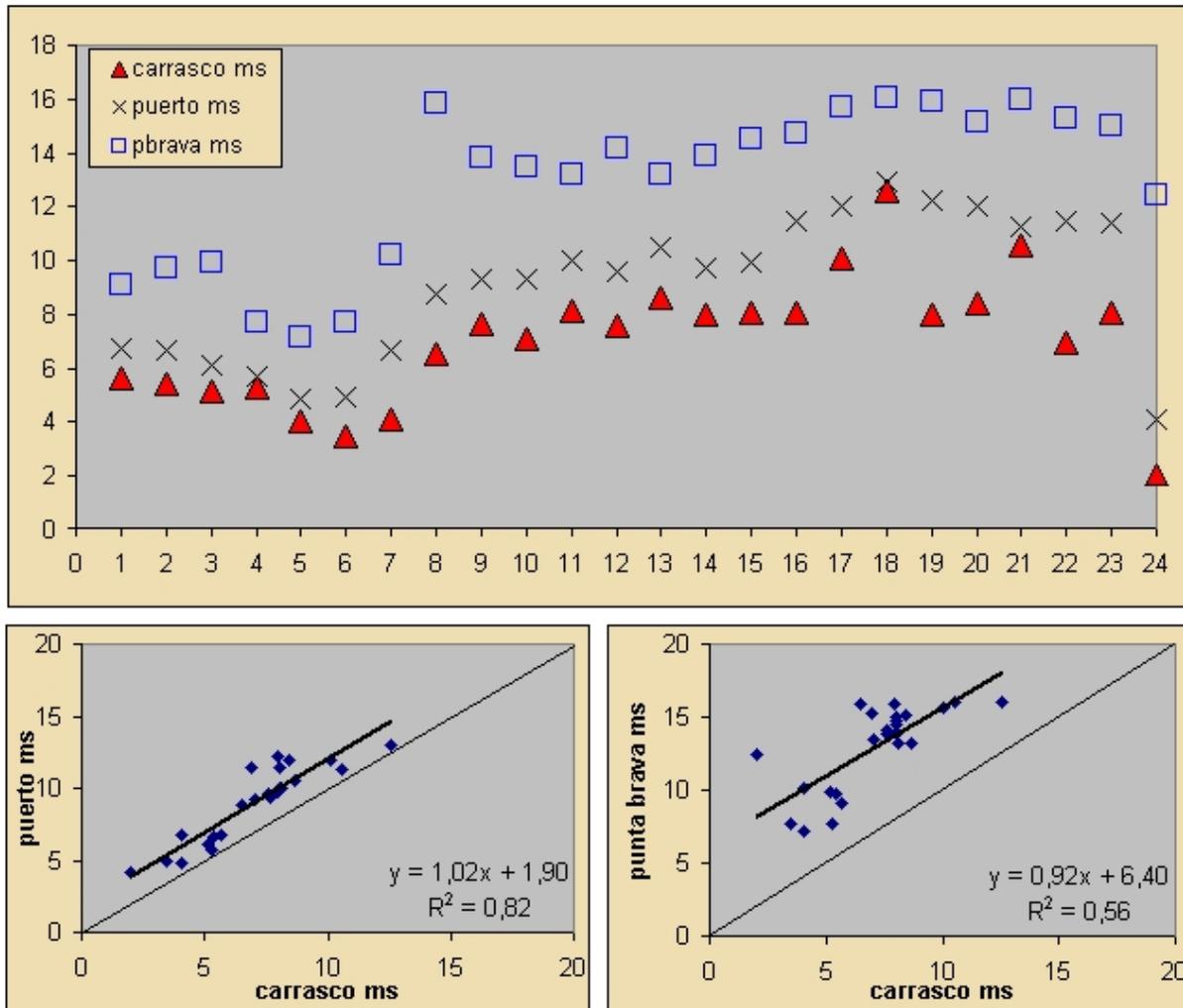
Anexo III.- Datos de las estaciones meteorológicas durante el desarrollo de las observaciones de transporte de arena por el viento en el terreno **(continuación)**

Datos horarios de las velocidades medias del viento durante el **22 de Septiembre de 2009, 18:30hs** (arriba) y relaciones entre la velocidad del viento en Carrasco con el registro de Puerto de Montevideo y Punta Brava (abajo).



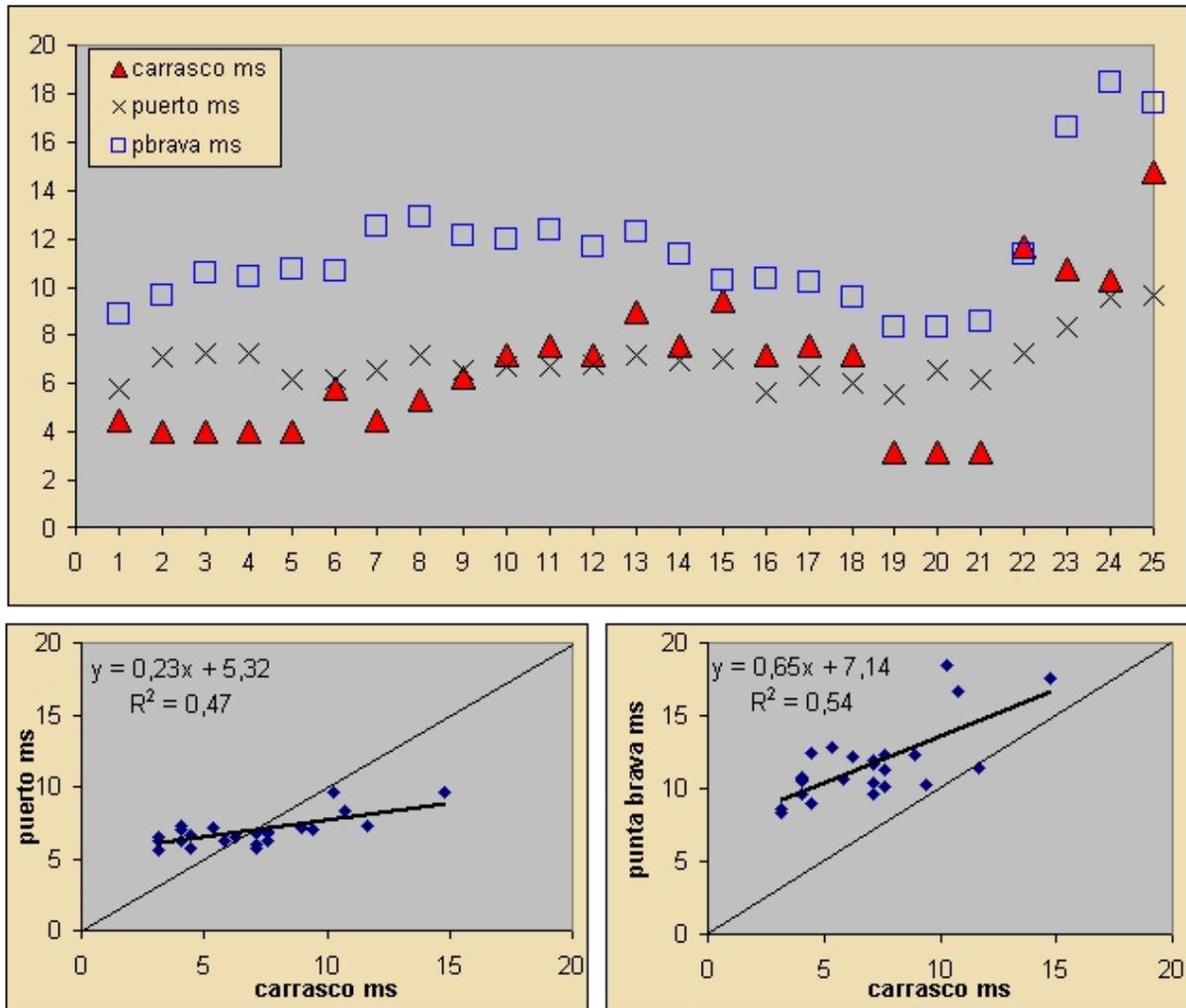
Anexo III.- Datos de las estaciones meteorológicas durante el desarrollo de las observaciones de transporte de arena por el viento en el terreno **(continuación)**

Datos horarios de las velocidades medias del viento durante el **10 de Octubre de 2009, 15:30hs y 20:30hs** (arriba) y relaciones entre la velocidad del viento en Carrasco con el registro de Puerto de Montevideo y Punta Brava (abajo).

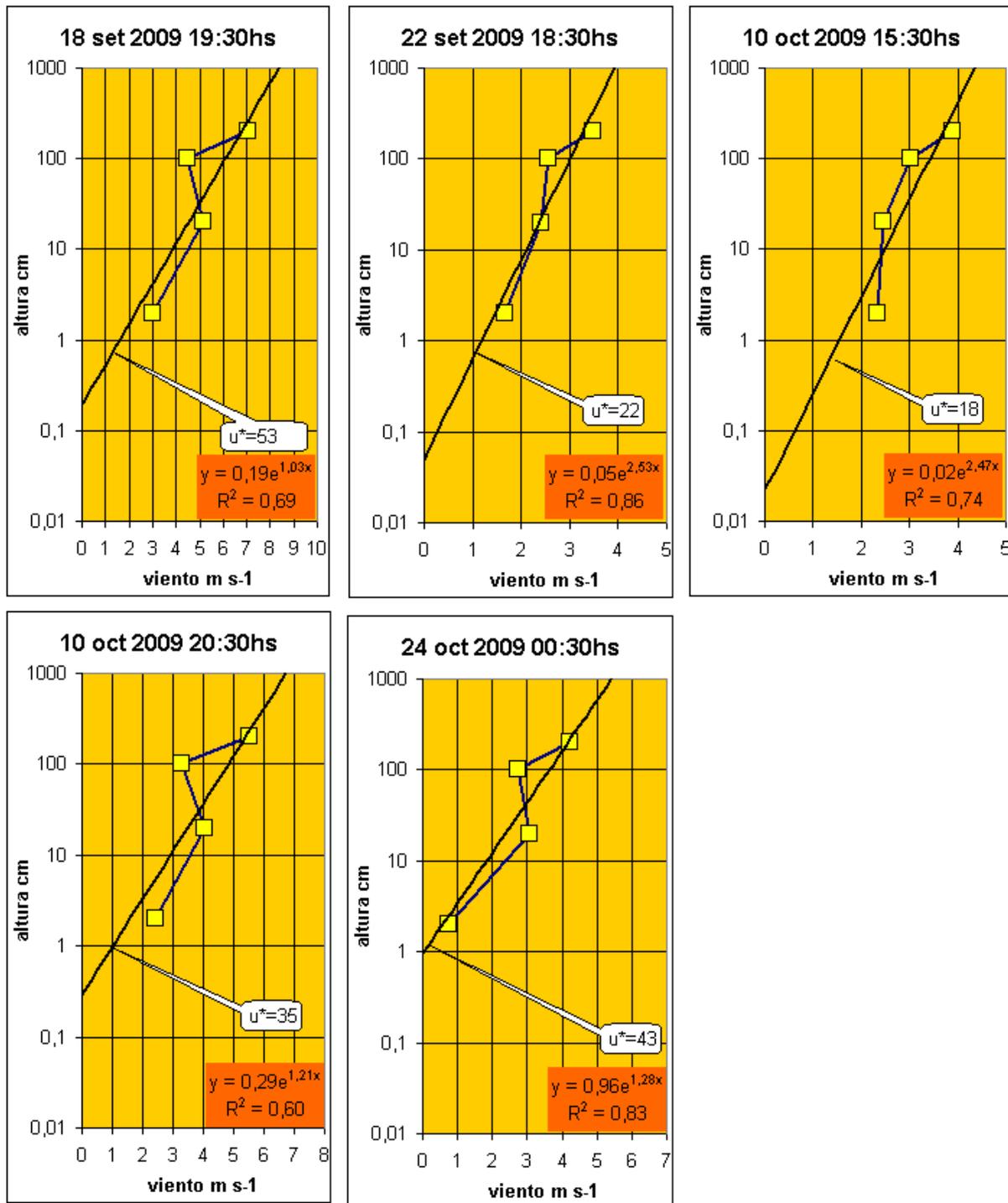


Anexo III.- Datos de las estaciones meteorológicas durante el desarrollo de las observaciones de transporte de arena por el viento en el terreno **(continuación)**

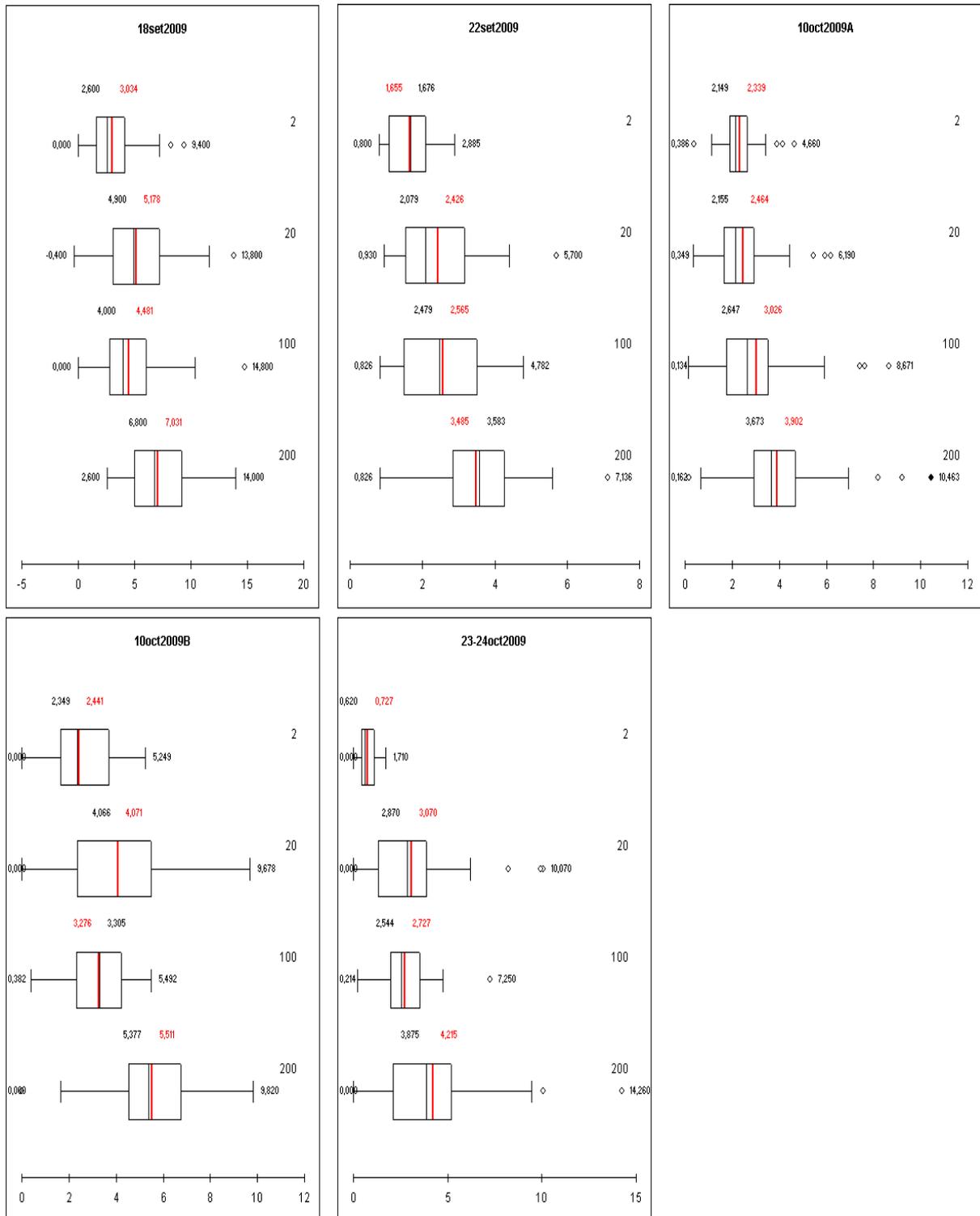
Datos horarios de las velocidades medias del viento durante el **23 y primera hora del 24 de Octubre de 2009, 00:30hs** (arriba) y relaciones entre la velocidad del viento en Carrasco con el registro de Puerto de Montevideo y Punta Brava (abajo).



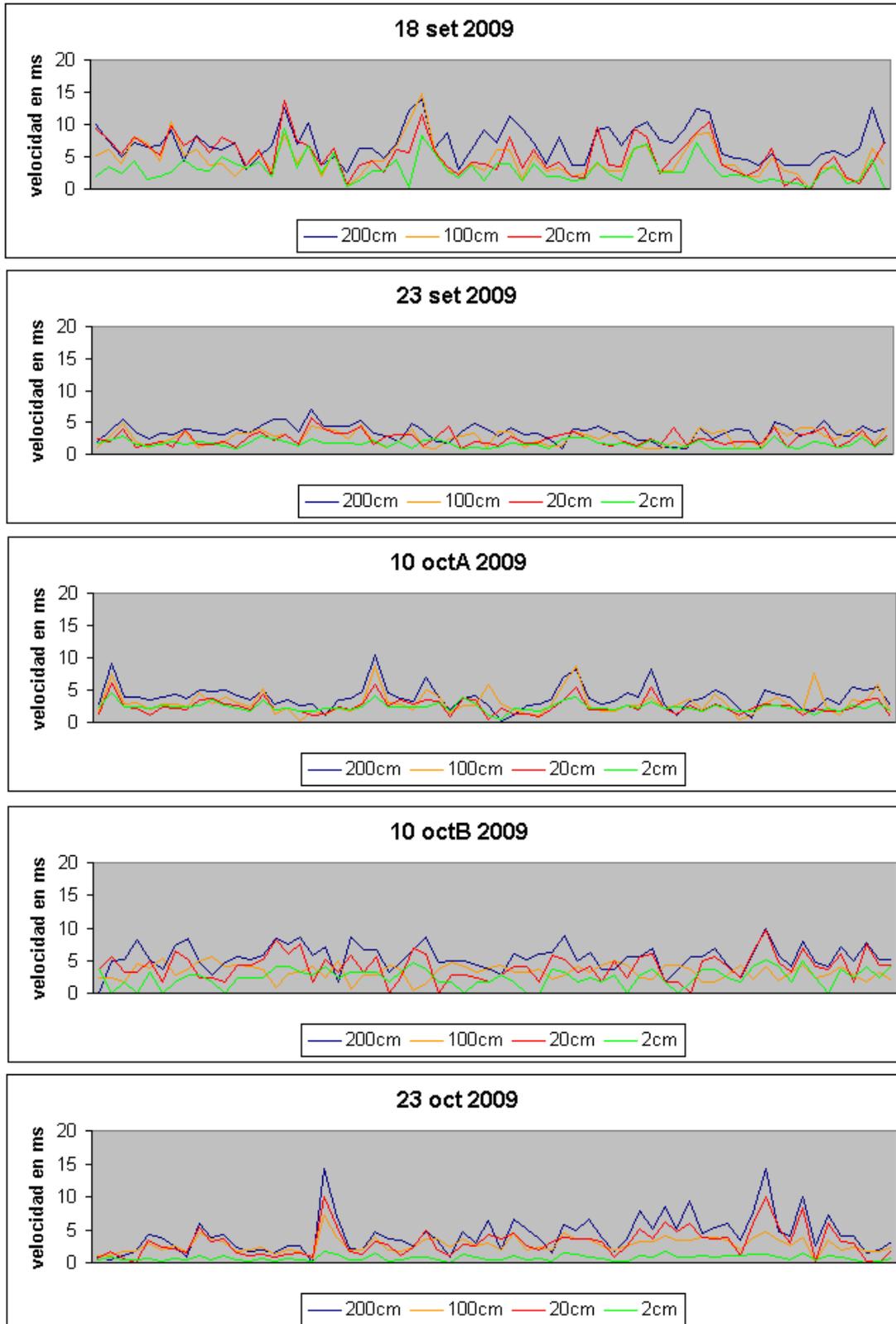
Anexo IV.- Datos del perfil del viento durante el desarrollo de las observaciones de transporte de arena por el viento en el terreno.



### Anexo V.- Variabilidad del viento en los perfiles del viento durante el desarrollo de las observaciones de transporte de arena por el viento en el terreno (Box-Plots)



Anexo VI.- Series temporales de las velocidades del viento durante el desarrollo de las observaciones de transporte de arena por el viento.



## ***Apéndice***

## Análisis de las series temporales

Las estimaciones del trabajo anual del viento realizadas con el método ajustado de Fryberger (1979) pueden ser de utilidad para la gestión y mantenimiento de playas urbanizadas como las de Montevideo. Los resultados informan sobre **cuánta** arena puede transportarse (DP, *drift potencial*) y hacia **dónde** (RDD, *resultant drift direction*). El método no predice **cuándo** sucederá el transporte, lo que supone válida la hipótesis *ergódica*<sup>6</sup>. Sin embargo, algunos autores han cuestionado la validez de los modelos clásicos en razón del carácter no-estacionario o no lineal del viento<sup>7</sup>. Las hipótesis de no-linealidad y no-estacionariedad son evaluadas.

- 1) Se evalúa la hipótesis de que las series temporales sean variables *independientes e igualmente distribuidas* (i.i.d.).
- 2) Se discute la *estacionariedad y auto correlación* del viento.
- 3) Se filtra el componente transitorio (estacionario, de tendencia) del componente aleatorio (permanente) de algunas series.
- 4) Se discuten las implicancias de estos análisis en las políticas de conservación de playas y reconstrucción de dunas.

---

<sup>6</sup> Un sistema es ergódico si todos sus estadísticos se pueden determinar de una sola de sus realizaciones (según Samper Calvete, F.J. y J. Carrera Martínez (1990): “*Geoestadística. Aplicaciones a la ideología subterránea*”. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Politècnica de Catalunya. Barcelona. 484pp).

<sup>7</sup> Fan, L.T. y L.A. Disrud (1977) “*Transient wind erosion: a study of the nonstationary effect on rate of wind erosion*”. Soil Science. Vol.124, pp.61-65.,

Bennett, S.W. y G.A. Olyphant (1998) “*Temporal and spatial variability in rates of eolian transport determined from automated sand traps: Indiana Dunes National Lakeshore, U.S.A.*” Journal of Coastal Research, Vol. 14, pp. 283-290.

## 1) Prueba de hipótesis de variables independientes e igualmente distribuidas (i.i.d.) Brock-Dechert-Scheinkman (BDS)<sup>8</sup>

El test estadístico BDS es una prueba asintótica a dos colas que proporciona una herramienta no paramétrica para evaluar la hipótesis de series i.i.d. contra todas las hipótesis alternativas restantes, sean éstas lineales o no lineales, estocásticas o deterministas (Brock et al., 1996). El estadístico BDS tiene su origen en el trabajo sobre dinámica de sistemas no lineales y la teoría del caos. Aunque su uso está difundido dentro del análisis econométrico, también ha sido aplicado a series climáticas (Richards, 1997<sup>9</sup>; Kim et al, 2003<sup>10</sup>; Weng et al, 2008<sup>11</sup>). Las secuencias de comandos para programas como Octave, R o Matlab son libres y también está incluida la prueba en algunos programas comerciales como Eviews.

La prueba BDS mide la significancia estadística de los cálculos de la dimensión de correlación. La integral de correlación es una medida de la frecuencia con que dos puntos distanciados por un tiempo “*epsilon*” aparezcan juntos en la serie temporal, constituyendo un patrón. Ello es evaluado en un conjunto de  $m$ -espacios modificables al igual que el valor *epsilon*. Los autores recomiendan usar una fracción del desvío estándar de la muestra (0.5 a 2) y un  $m$  de 2 a 6. La prueba de hipótesis se aplica con

---

<sup>8</sup> Brock, W., Dechert, W., Scheinkman, J., LeBaron, B. (1996) “A test for Independence based on the correlation dimension”. *Econometrics Reviews*. Vol. 15, pp. 197-235.

<sup>9</sup> Richards, G.R. (1997) “Interpolating a paleoclimatic time series: nonlinearity, persistence and trending in the Cenozoic”. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Vol. 128, pp. 17-27.

<sup>10</sup> Kim, H.S.; Kang, D.S. y J.H.Kim (2003). “The BDS statistic and residual test”. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. Vol. 17, pp. 104-115.

<sup>11</sup> Weng, Yu-Chi; Chang, Ni-Bin; T.Y.Lee (2008) “Nonlinear time series analysis of ground-level ozone dynamics in Southern Taiwan”. *Journal of environmental Management*. Vol. 87. p. 405-414.

el estadístico  $z$  (estadístico BDS dividido por el error estándar). El estadístico  $z$  tiende a cero si la serie es i.i.d., por lo que se rechaza la hipótesis de que la serie es i.i.d. si la probabilidad asociada al valor de  $z$  es, en este caso, menor a 0.05.

La prueba de la hipótesis de i.i.d. es descrita por Benestad (2003)<sup>12</sup> quien desarrolla la biblioteca **iid.test** de ® (también llamado GNU-s)<sup>13</sup>.

- **Prueba BDS de las series de viento y transporte en playa**

Se realizó la prueba BDS a 20 series de velocidades del viento con 1280 valores en los cinco episodios de muestreo. Las series de datos son ingresadas al sistema como variables siguiendo el criterio "altura\_fecha", lo que señala la altura en centímetros del registro del viento (200, 100, 20, 2cm) y la fecha del temporal (18 y 23 de Setiembre, 10 de Octubre - tarde y noche- y 22 de Octubre). Se usó una dimensión de inserción  $m=6$  y un  $\epsilon=1$  desvío estándar.

Se aplicó la prueba BDS también a 20.000 remuestreos con reemplazamiento de la muestra original (*bootstrapping*). Estos remuestreos son usados para ajustar los valores críticos en muestras pequeñas. Han sido obtenidos 20 resultados de los cuales en 18 casos no se rechaza la hipótesis de i.i.d. y sí se rechaza en los dos restantes (figura i) ambos correspondientes al temporal de la noche del 23-24 de Octubre, en las alturas de 100 y de 20cm.

---

<sup>12</sup> Benestad, R.E. (2003) "How often can we expect a record event?". Climate Research. Vol. 25. p. 3-13.

<sup>13</sup> <http://www.r-project.org/>.

22-23 de Octubre_noche 2009							BDS Test for _100_22_OCT_NOCHE							
BDS Test for _200_22_OCT_NOCHE Date: 06/17/10 Time: 22:01 Sample: 1 64 Included observations: 64							Date: 06/17/10 Time: 22:12 Sample: 1 64 Included observations: 64							
Dimension	BDS Statistic	Std. Error	z-Statistic	Normal Prob.	Bootstrap Prob		Dimension	BDS Statistic	Std. Error	z-Statistic	Normal Prob.	Bootstrap Prob		
2	0.004689	0.010931	0.428923	0.6680	0.5974		2	0.027121	0.008026	3.379342	0.0007	0.0120		
3	0.016971	0.017571	0.965864	0.3341	0.3154		3	0.029614	0.012915	2.292950	0.0219	0.0628		
4	0.025405	0.021166	1.200242	0.2300	0.2312		4	0.022368	0.015570	1.436620	0.1508	0.1990		
5	0.028608	0.022321	1.281701	0.1999	0.2024		5	0.032931	0.016429	2.004435	0.0450	0.0950		
6	0.025632	0.021781	1.176774	0.2393	0.2274		6	0.032331	0.016040	2.015655	0.0438	0.0930		
Raw epsilon		3.638026	V-Statistic		0.707031		Raw epsilon		1.606096	V-Statistic		0.709473		
Pairs within epsilon		2896.000	V-Statistic		0.543274		Pairs within epsilon		2906.000	V-Statistic		0.535202		
Triples within epsilon		142416.0					Triples within epsilon		140300.0					
Dimension	C(m,n)	c(m,n)	C(1,n-(m-1))	c(1,n-(m-1))	c(1,n-(m-1))^k		Dimension	C(m,n)	c(m,n)	C(1,n-(m-1))	c(1,n-(m-1))	c(1,n-(m-1))^k		
2	959.0000	0.491039	1362.000	0.697389	0.486351		2	1007.000	0.515617	1365.000	0.698925	0.488496		
3	668.0000	0.353252	1315.000	0.695399	0.336281		3	708.0000	0.374405	1326.000	0.701216	0.344791		
4	475.0000	0.259563	1273.000	0.695628	0.234158		4	490.0000	0.267760	1288.000	0.703825	0.245391		
5	326.0000	0.184181	1220.000	0.689266	0.155572		5	351.0000	0.198305	1235.000	0.697740	0.165374		
6	217.0000	0.126826	1168.000	0.682642	0.101195		6	248.0000	0.149444	1189.000	0.694915	0.112614		

BDS Test for _20_22_OCT_NOCHE							BDS Test for _2_22_OCT_NOCHE							
Date: 06/17/10 Time: 21:27 Sample: 1 64 Included observations: 64							Date: 06/17/10 Time: 21:21 Sample: 1 64 Included observations: 64							
Dimension	BDS Statistic	Std. Error	z-Statistic	Normal Prob.	Bootstrap Prob		Dimension	BDS Statistic	Std. Error	z-Statistic	Prob.			
2	0.027225	0.010081	2.700612	0.0069	0.0308		2	0.011095	0.007163	1.548968	0.1214			
3	0.039999	0.016216	2.466694	0.0136	0.0444		3	0.004989	0.011401	0.437591	0.6617			
4	0.045465	0.019545	2.326112	0.0200	0.0554		4	-0.009363	0.013594	-0.688711	0.4910			
5	0.053999	0.020622	2.618480	0.0088	0.0364		5	-0.006719	0.014186	-0.473622	0.6358			
6	0.058672	0.020134	2.914035	0.0036	0.0246		6	-0.002754	0.013698	-0.201035	0.8407			
Raw epsilon		2.882204	V-Statistic		0.708008		Raw epsilon		0.620000	V-Statistic		0.702148		
Pairs within epsilon		2900.000	V-Statistic		0.541283		Pairs within epsilon		2876.000	V-Statistic		0.521439		
Triples within epsilon		141894.0					Triples within epsilon		136692.0					
Dimension	C(m,n)	c(m,n)	C(1,n-(m-1))	c(1,n-(m-1))	c(1,n-(m-1))^k		Dimension	C(m,n)	c(m,n)	C(1,n-(m-1))	c(1,n-(m-1))	c(1,n-(m-1))^k		
2	1010.000	0.517153	1367.000	0.699949	0.489928		2	959.0000	0.491039	1353.000	0.692780	0.479945		
3	744.0000	0.393443	1337.000	0.707033	0.353443		3	641.0000	0.338974	1312.000	0.693813	0.333985		
4	555.0000	0.303279	1304.000	0.712568	0.257814		4	425.0000	0.232240	1283.000	0.701093	0.241603		
5	409.0000	0.231073	1252.000	0.707345	0.177074		5	288.0000	0.162712	1241.000	0.701130	0.169431		
6	303.0000	0.177089	1199.000	0.700760	0.118417		6	187.0000	0.109293	1188.000	0.694331	0.112047		

Figura i. Salidas de la prueba BDS sobre cuatro series de valores de velocidad del viento medidas en la playa durante el temporal del 23 al 24 de Octubre de 2009. Nótese el recuadro punteado donde se incluyen los rechazos de la hipótesis de i.i.d., correspondientes a las alturas de 20 y 100cm sobre el suelo.

## Prueba BDS sobre las series de viento anuales

Se realizó la prueba BDS a las series anuales de viento de las estaciones Carrasco y Punta Brava (tabla I). En este caso se rechaza en todos los casos la hipótesis de i.i.d. dado que la probabilidad asociada al estadístico fue inferior a 0.05.

Tabla I. Tabla de resultados de la prueba BDS sobre series temporales de viento anuales de Carrasco y Punta Carretas (viento medio y ráfagas).

Test BDS de variable " <b>Viento medio</b> ". DNMet. Carrasco.				
Dimension	BDS Statistic	Std. Error	z-Statistic	Prob.
2	0.058561	0.000417	1.405.377	0.0000
3	0.069498	0.000481	1.446.012	0.0000
4	0.061288	0.000416	1.474.185	0.0000
5	0.048031	0.000315	1.525.263	0.0000
6	0.03534	0.000221	1.600.816	0.0000
Epsilon=	2.582.744	Años 1997(p)-2008(p)		trihorario

Test BDS de variable " <b>Viento medio</b> ". Nimbus-Punta Carretas.				
Dimension	BDS Statistic	Std. Error	z-Statistic	Prob.
2	0.16799	0.00027	6.224.778	0.0000
3	0.236665	0.000302	7.842.185	0.0000
4	0.255268	0.000253	1009.22	0.0000
5	0.250244	0.000186	1.348.459	0.0000
6	0.235253	0.000126	1.867.219	0.0000
Epsilon=	170.516	Año 2009.	Datos cada 15min.	

Test BDS de variable " <b>Viento ráfagas</b> ". Nimbus-Punta Carretas.				
Dimension	BDS Statistic	Std. Error	z-Statistic	Prob.
2	0.166442	0.000302	551.985	0.0000
3	0.239857	0.000345	6.955.192	0.0000
4	0.263454	0.000296	8.910.943	0.0000
5	0.262524	0.000222	1.183.111	0.0000
6	0.250506	0.000154	1.625.527	0.0000
Epsilon=	3.069.787	Año 2009	Datos cada 15min.	

## 2) Prueba de Dickey-Fuller extendida (DFE)

Dado que las series temporales a escala anual no son i.i.d., ello podría deberse a la existencia de dependencias temporales en los datos y/o a que las series sean no-estacionarias, lo que se analiza en lo que sigue.

La función de auto-correlación de la muestra y la prueba de raíz unitaria (Dickey-Fuller extendida o DFE) permiten evaluar la autocorrelación y la estacionariedad respectivamente<sup>14</sup>.

Si se rechaza la hipótesis nula de que la serie tiene una raíz unitaria, la serie se denomina *integrada de orden cero* (I(0)). De lo contrario es necesario diferenciar la serie sucesivas veces hasta hacerla estacionaria. En general, tras la primera diferencia, las series quedan estacionarias, situación en la que se la denominan *integrada de orden uno* (I(1)). Las series estacionarias manifiestan en el dendograma una rápida caída de los valores de la función de autocorrelación en los primeros espaciados, sin embargo es de rigor verificar la no existencia de correlación serial en base a la prueba y el estadístico Durbin-Watson (DW). Para aceptar la hipótesis de no correlación serial, el estadístico DW debiera ser próximo al valor 2. Los cálculos pueden realizarse con los programas libres R u Octave o bien con Matlab o Eviews. Algunos de resultados obtenidos son ilustrados la tabla II<sup>15</sup>. Los resultados tenidos sobre las series anuales de viento

---

<sup>14</sup> El desarrollo teórico se encuentra en: Engle, R. F., y D. L. McFadden (eds.) (1994): “*Handbook of Econometrics*” Volume 4. North-Holland, Amsterdam.

<sup>15</sup> El desarrollo teórico puede seguirse en Box, G.E. y G.M. Jenkins (1976): “*Time Series Analysis. Forecasting and Control*” Ed. Holden-Day, Inc. Oakland. USA. 575pp. O en Bowerman, B.L. y R.T. O’Connell (1987): “*Time Series Forecasting. Unified concepts and computer implementation*” Ed. Duxbury Press. USA. 540pp.

analizadas prueban ( $p < 0.05$ ) la no existencia de una raíz unitaria, en consecuencia a escala anual son estacionarias. Ello es coherente con la expresión gráfica de la función de autocorrelación, ya que los valores descienden relativamente rápido al aumentar el espaciado (*lag*) visible en la figura ii. A escala diaria y horaria la mayor parte de las series son estacionarias en la primer diferencia, es decir son integradas de orden 1 (I(1)).

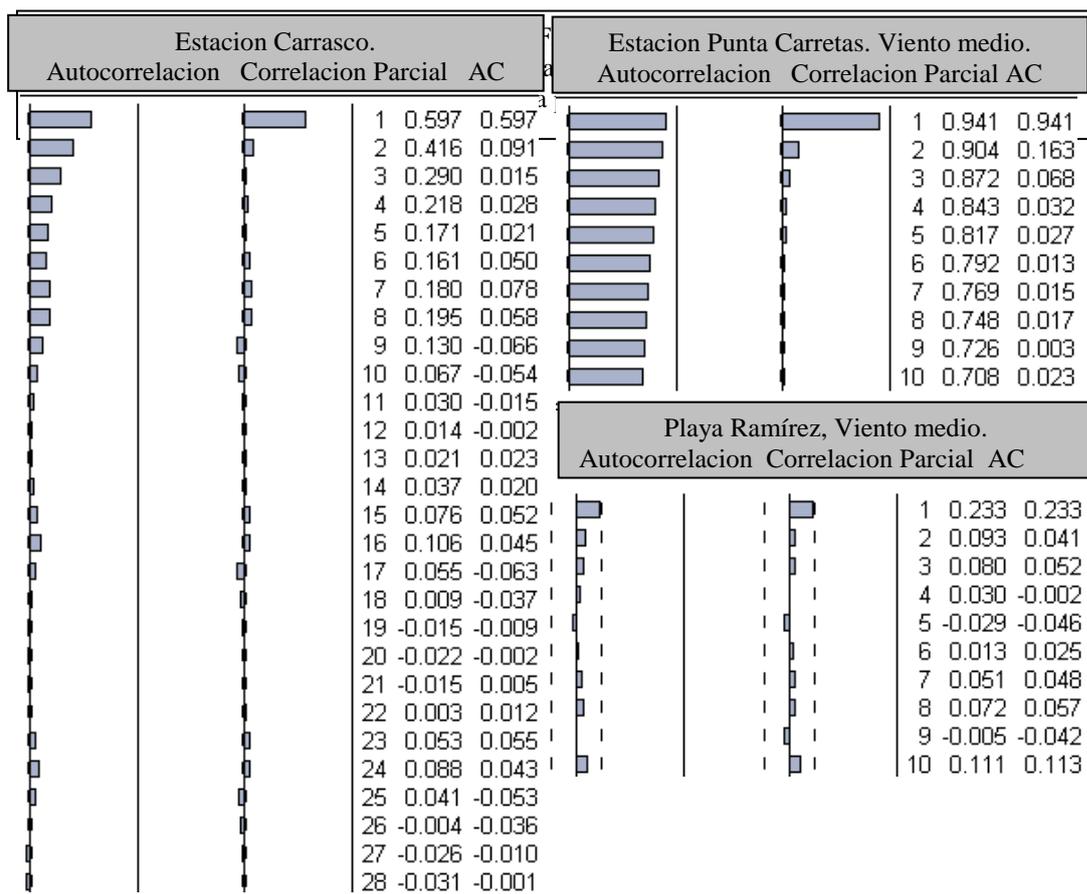


Figura ii. Ejemplo de correlogramas de las series analizadas, calculados sobre el nivel del valor de velocidad del viento. Se incluyen a la Estación Carrasco (izquierda), Punta Carretas (derecha, arriba) y Playa Ramírez –viento medio a 20cm de altura- (derecha, abajo).

Tabla II. Tabla de resultados de la prueba DFE sobre series temporales de viento anuales de Carrasco y Punta Carretas (viento medio y ráfagas).

Test DFE de variable " <b>Viento medio</b> ". DNMet. Carrasco.		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-4.332.152	0.00000
Test critical values: 1% level	-2.565.039	
5% level	-1.940.835	
10% level	-1.616.693	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.		
Durbin-Watson stat	2.000.046	R-squared 0.239088

Test DFE de variable " <b>Viento medio</b> ". Nimbus-Punta Carretas.		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-2.061.388	0.00000
Test critical values: 1% level	-3.430.367	
5% level	-2.861.432	
10% level	-2.566.753	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.		
Durbin-Watson stat	1.999.798	R-squared 0.062927

Test DFE de variable " <b>Viento ráfagas</b> ". Nimbus-Punta Carretas.		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-4.838.023	0.00000
Test critical values: 1% level	-2.565.028	
5% level	-1.940.833	
10% level	-1.616.694	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.		
Durbin-Watson stat	1.999.895	R-squared 0.104155

### **3) Tendencia y ciclos en las series temporales**

Un proceso estocástico puede ser estacionario o no. En caso de serlo, puede descomponerse en una suma infinita de armónicos de amplitudes aleatorias, que pueden estar relacionados estadísticamente con su frecuencia respectiva mediante una función que tenga naturaleza espectral. En caso de no ser un proceso estacionario o contener “episodios no estacionarios” no podría descomponerse en una suma de funciones seno y coseno y quedaría evidenciado en los residuales ante un proceso de filtrado como la transformación de Fourier, lo que se describe en lo que sigue.

Con el modelo de transporte de arena ajustado de Kawamura (1941)<sup>16</sup> se generaron las series de transporte de arena anual en base a las estaciones:

- Estación Aeropuerto de Carrasco (estación oficial de la DNMeteorología con datos trihorarios, 1-dic-1997 al 21-ago-2008).
- Estación Punta Carretas NIMBUS (ubicado en una torre de 10m en techo de edificio en Tomás Diago 659, 7º piso).

---

<sup>16</sup> Para evitar los valores transportes negativos obtenidos con el modelo de Kawamura (1941) en velocidades inferiores a la crítica, éste se ajustó a una parábola.

- Estación Carrasco (DNMeteorología) periodo de 10 años, datos tri-horarios:

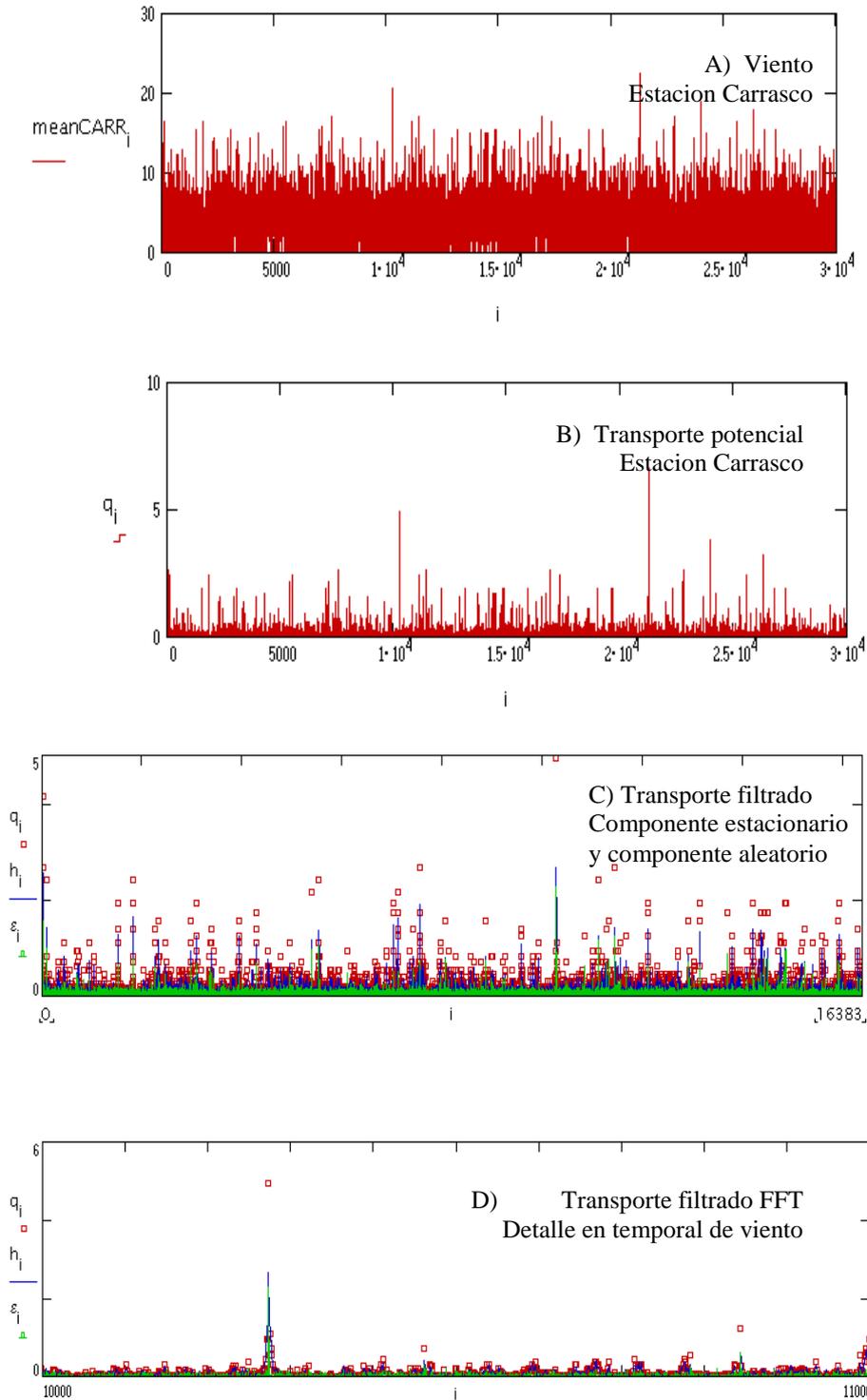


Figura iii. Series de viento y transporte para la Estación Carrasco. A= Serie de viento en m/s de la estación Aeropuerto de Carrasco (meanCARRi); B= Serie del transporte potencial instantáneo en  $gr/cm/s$  ( $q_i$ ); C= Separación del componente lineal ( $h_i$ ) del aleatorio (epsilon) resultado del filtrado lineal de Fourier (FFT). Los valores originales del transporte son denotados con  $q_i$ ; D) Detalle de uno de los episodios de alto transporte (Nótese el aumento el componente aleatorio durante los eventos de mayor transporte).

• **Nimbus Punta Carretas. Año 2009, FREC: 15min.**

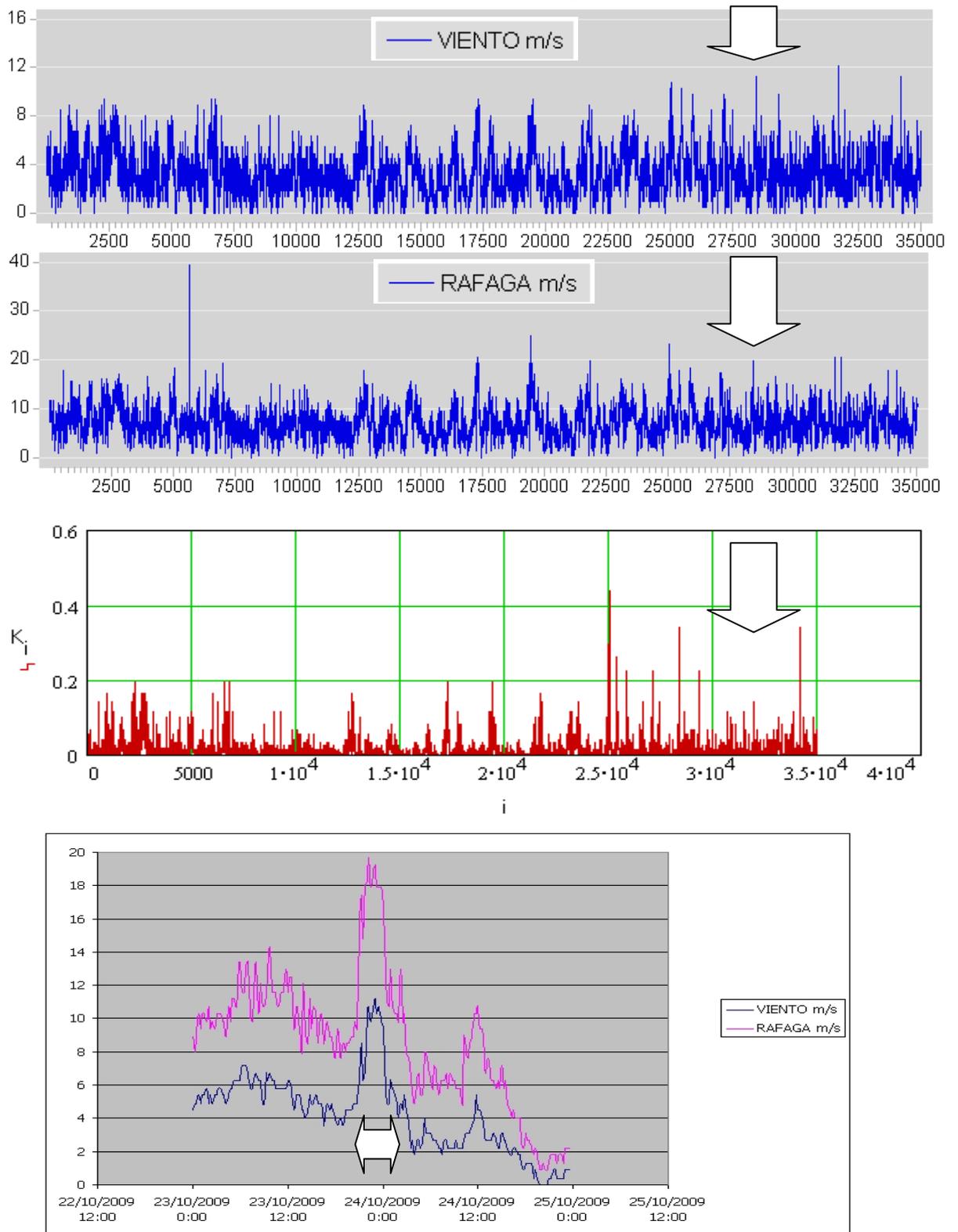


Figura iv: Estación Punta Carretas. Arriba: Serie temporal del viento (m/s). Centro: Serie temporal del transporte (gr/cm/s). Nótese que al igual que en Carrasco y Puerto de Montevideo, buena parte del transporte sucede durante episodios transitorios de alta energía. Abajo: detalle del valor del viento y las ráfagas durante el temporal del 23 al 24 de octubre (marcado con flecha).

En las figuras iii y iv, se distinguen en las series de transporte de arena, grupos discretos de eventos, los que se corresponderían a los eventos responsables de la mayor parte del transporte anual.

La transformación de Fourier (FFT) de las series de transporte, al separar el componente estacionario del aleatorio, permite constatar que en los episodios discretos de alta energía, el componente aleatorio aumenta notablemente su valor, visible en el detalle de episodios de temporal.

Las series climáticas muestran una autocorrelación y correlación parcial a cortas distancias y en ciclos de 12hs visible en los correlogramas de la figura ii.

En resumen, del análisis de las series de viento y de transporte se ha verificado que a escala anual y en las series horarias de un temporal fuerte existe un *comportamiento no lineal* (verificado con el *test* BDS). Se verifica también la existencia de *no estacionariedad* y *autocorrelación* en varias series de viento a escala diaria y horaria (evidenciada por la prueba DFE y por los correlogramas).

El filtrado lineal de Fourier ha permitido separar al componente aleatorio del estacionario a partir de lo cual resulta aparente que durante los episodios de alta energía aumenta la participación del componente

aleatorio. Este componente aleatorio no es lineal, como demuestra el *test* BDS de dos muestras en la playa.

Un modelo basado **solo** en el componente estacionario podría fallar en sus predicciones, ya que la porción estocástica puede ser dominante en los episodios responsables de la mayor parte del transporte de arena. El modelo propuesto, calibrado en condiciones de alta energía, quizás no sea válido durante eventos de energía moderada, lo cual debiera ser investigado.

Las políticas de conservación de playas debieran evaluar si es más eficaz invertir en el cuidado diario de las playas o al contrario, centrar los esfuerzos en propiciar tendencias positivas en el balance sedimentario a largo plazo. Debiera considerarse también la prevención de riesgos geológicos asociados a episodios de alta energía y corta duración, responsable de pérdidas económicas y sociales derivadas de la degradación y pérdida de valor de las playas así como el recubrimiento de arena de las ramblas