

Acción del viento sobre el puente Bojórquez, en Cancún, Quintana Roo

POR NEFTALÍ RODRÍGUEZ CUEVAS

El Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería, ambos de la UNAM, establecieron un convenio de colaboración para determinar las condiciones de estabilidad de un tramo del puente Bojórquez, considerando las fuerzas que se presentarían durante un ciclón de máxima intensidad que se espera que puede ocurrir cada 200 años.

El objetivo principal de la investigación, solicitada por la SCT, fue entender los efectos que producirían los vientos generados por un ciclón de diseño en la zona donde se intenta construir el puente Bojórquez. Para ello, se construyó un modelo a escala de un tramo del puente, en el que se estudiaron sus propiedades aerodinámicas ante la acción del viento. También se analizó la información meteorológica sobre las condiciones históricas ocurridas en el sitio, por el paso de ciclones. Se establecieron las curvas aerodinámicas para definir la variación de coeficientes adimensionales que controlan la estabilidad de dicha estructura. Con estos estudios, se hicieron las recomendaciones pertinentes para determinar la vida útil del tramo estudiado del puente.

En el protocolo propuesto para la investigación, se establecieron las siguientes metas:

- Construir un modelo a escala 1:33, de carácter aerodinámico, con los materiales necesarios para soportar la acción del viento durante el proceso de pruebas.
- Instrumentar el modelo con catéteres piezométricos, conectados al sistema de medición HYSCAN, en dos secciones transversales del modelo, equidistantes entre sí y los extremos del modelo.
- Instalar y calibrar el modelo en la sección de pruebas del túnel de viento del II UNAM, de manera que gire sobre un eje longitudinal.
- Medir la distribución de presiones en puntos elegidos en cada sección transversal, cuando se somete el modelo a la acción del viento, con once ángulos de ataque diferentes respecto a la posición horizontal del modelo.

- Obtener los coeficientes de arrastre, C_D ; de empuje transversal, C_L , y de momento torsionante, C_M , para definir la magnitud y posición de la resultante de la acción del viento, al presentarse diferentes ángulos de ataque del viento, respecto a la superficie de rodamiento del puente.
- Estudiar las condiciones que podrían conducir a la inestabilidad de la superestructura del puente.

La Facultad de Ingeniería de la UNAM presentó el proyecto para construir un puente en planta curva, con el objeto de mejorar la vialidad de la zona hotelera de Cancún, QR, sobre la laguna Bojórquez, formado por 24 tramos, cada uno de ellos de 32 m de longitud (fig 1).

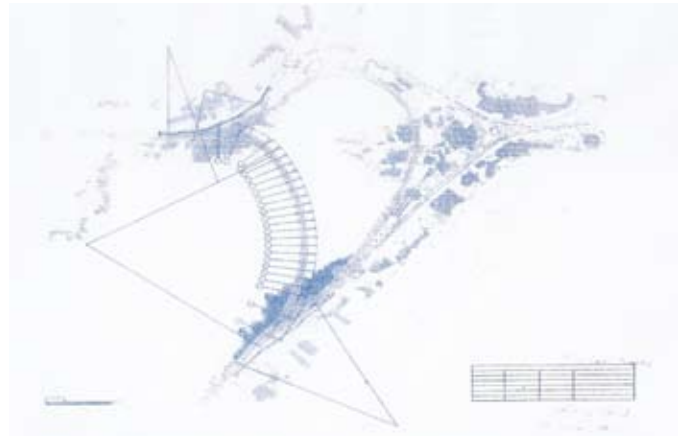


Fig 1 Vista en planta del desarrollo del puente, sobre la Laguna Bojórquez

Las figs 2 y 3 muestran la concepción constructiva para erigir el puente. En la fig 2 se puede apreciar el procedimiento para hincar pilas que alcancen el estrato de roca sedimentaria, localizado a aproximadamente 17m de profundidad, bajo la superficie media de la laguna Bojórquez.

En la parte superior de las pilas se construirá la columna de apoyo de cada tramo de puente, donde se apoyarán cuatro

PERSPECTIVA DE LA COLUMNA.



PESO CON UN METRO DE EMPOTRAMIENTO = 90 ton.

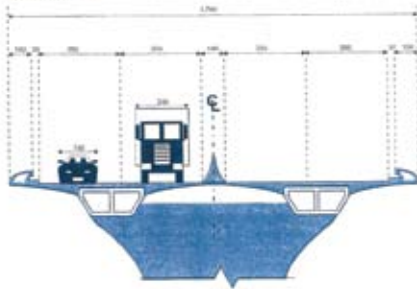
1: Se coloca la pila (16 ton)



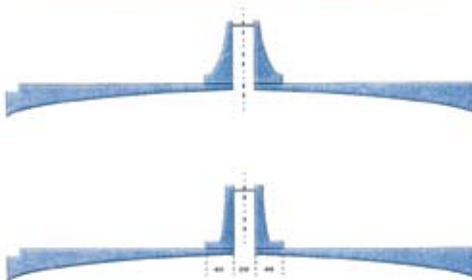
2: Se colocan las traveses. (109 ton c/u)



4: Se colocan los parapetos y la barrera central.



SUGERENCIAS PARA LA VENTILACIÓN ENTRE LAS PARTES INFERIOR Y SUPERIOR DEL PUENTE



extremos de los tramos precolados, de 32 m de claro. Sobre éstos se colará *in situ* una losa superior, que servirá como superficie de rodamiento de seis carriles de circulación, con un ancho total de 20.6 m; se proyecta construir dos parapetos laterales y una barrera central para dividir el tránsito. Ésta separará cada tramo, y permitirá la circulación de aire entre las partes inferior y superior del puente, lo que mejorará la circulación del aire alrededor del puente y modificará la acción del viento sobre cada uno de sus tramos.

Los parapetos laterales de la calzada se diseñaron para que el flujo de aire durante ciclones, provoque un flujo laminar sin vórtices, y evitar así los fenómenos aerolásticos que ocasionan vibraciones importantes en el puente.

RÉGIMEN METEOROLÓGICO DEL SITIO

Por su posición geográfica, la península de Yucatán está expuesta a vientos de alta intensidad, provocados por las zonas de alta temperatura en el mar Caribe y los fenómenos circulatorios de la atmósfera entre mayo y noviembre, que originan ciclones y tormentas tropicales.

En el periodo comprendido entre 1851 y 2000, se ha presentado un número importante de eventos ciclónicos y tormentas tropicales, cuya distribución se muestra en la fig 4. Así, en las cercanías de Cancún, con coordenadas 86.80°W, 21.23°N; se han presentado más de 54 eventos con vientos de alta velocidad, lo que corresponde a una frecuencia relativa próxima a 0.35, en los 150 años de observación.

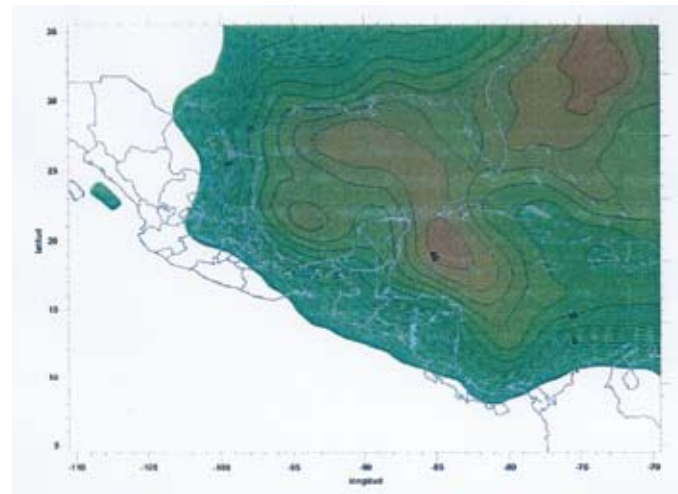


Fig 4 Distribución del número de tormentas tropicales y huracanes, entre 1851 y 2000

Se puede establecer que durante este último periodo de observación, la velocidad máxima registrada en la zona de

Fig 2 Etapas constructivas del puente sobre la Laguna Bojórquez

Fig 3 Concepción estructural de un tramo del puente sobre la Laguna Bojórquez

Cancún no sobrepasa 220 km/h. Al comparar este dato con la información estadística que publicó la CFE en el capítulo de Diseño por viento del *Manual de Diseño de Obras Civiles*, para un periodo de retorno de 100 años, se puede determinar que mientras la velocidad máxima sostenida es 173 Km/h, el periodo de retorno de 200 años se estima que presentaría 185 Km/h como velocidad máxima sostenida. Ambos estudios se basaron en datos obtenidos en el observatorio de Cozumel, QR (fig 5).

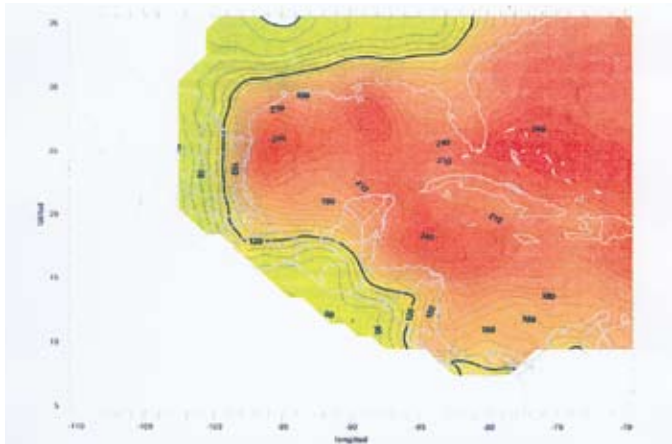


Fig.5 Velocidad de vientos máximos sostenidos, durante ciclones tropicales, entre 1851 y 2000 (km/h)

A fin de dilucidar la velocidad regional de diseño a 10 m de altura sobre el terreno, se revisó información sobre las velocidades de viento sostenidas entre 1851 y 2006, causados por fenómenos meteorológicos generados por el paso de eventos ciclónicos o por tormentas tropicales. En este periodo de 156 años, se detectaron 54 eventos de alta velocidad del viento, en la zona próxima a Cancún, de los cuales 26 fueron tormentas tropicales y 28, ciclones. Según su categoría, los ciclones fueron: diez de categoría 1, once de categoría 2, seis de categoría 3 y uno solo, Allen, de categoría 4, que se aproximó sin tocar tierra, el 8 de agosto de 1980, con velocidad máxima sostenida próxima de 150 nudos.

Recientemente, en 2005, el ciclón Wilma azotó la zona de Cancún (figs 6a y 6b) y al pasar el ojo del ciclón cerca del puerto, adquirió categoría 3, cuya velocidad máxima sostenida estuvo entre 178 y 210 km/h, como se establece en la escala Saffir-Simpson.

Por otra parte, la información de las mediciones obtenidas en varias estaciones automáticas ubicadas en la costa de la península de Yucatán, por el Centro Nacional de Huracanes (NOAA), durante el paso del ciclón Wilma permiten conocer que la velocidad máxima sostenida en isla Mujeres, durante nueve horas, resultó de 90 nudos o sea 167 Km/h.

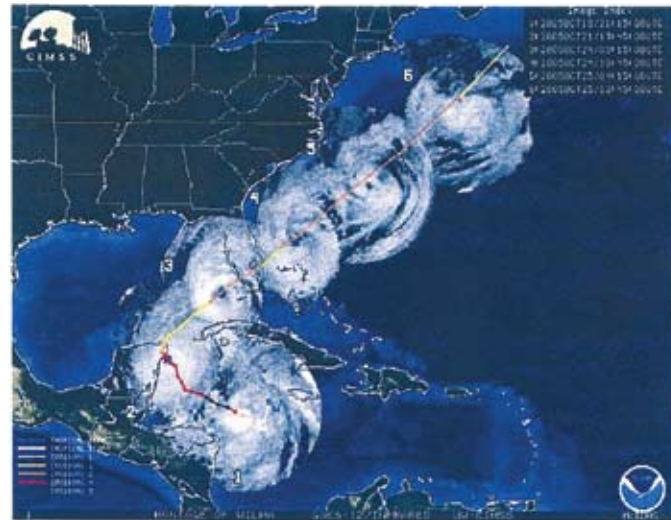


Fig 6a Trayectoria del ciclón Wilma

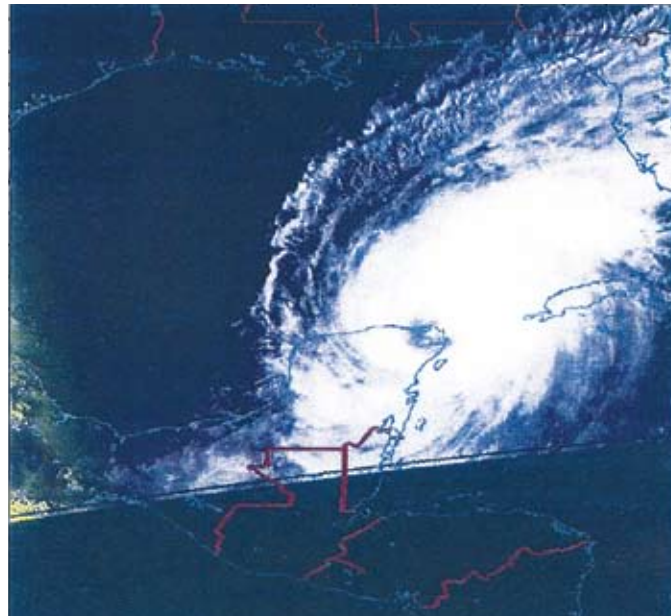


Fig 6b Ciclón Wilma, sobre el puerto de Cancún

Datos publicados por el Sistema Meteorológico Nacional indican que este ciclón entró a tierra cerca de playa del Carmen, QR, casi a la medianoche del 21 de octubre de 2005; en el transcurso del día se degradó rápidamente, hasta alcanzar una velocidad sostenida de 160 Km/h a las 18 horas. Durante las siguientes 24 horas mantuvo este nivel de velocidad máxima sostenida, hasta el 23 de octubre, en que abandonó tierra e incrementó nuevamente su velocidad al salir al mar. Durante el tiempo que permaneció en tierra, la presión atmosférica se mantuvo en 960 milibares, mientras que al tocar tierra llegó a 930 milibares.

En los registros de ciclones de categoría 3 que han penetrado en la región de Cancún, destaca el ciclón Gilberto, que el 15 de septiembre de 1988 tocó tierra, a una velocidad sostenida de 213 Km/h y una presión atmosférica de 944 milibares. Previamente, este ciclón alcanzó categoría 5, en una posición distante de Cancún. Al entrar en Cancún se degradó, y a las 6 h GMT, su velocidad descendió a 194 Km/h, y siguió así durante el resto del día. La presión atmosférica ese día, se mantuvo cerca de 944 milibares.

El resto de los ciclones de categoría 3 no han tocado tierra cerca de Cancún, por lo que los datos de los dos ciclones anteriores representan las acciones más desfavorables ocurridas en los 155 años de historia de ciclones en la zona. Por ello, se considera que los datos estadísticos correspondientes a 200 años representan las condiciones regionales de diseño para ese periodo de retorno. La presión barométrica correspondiente resulta próxima a 944 milibares. También se estudió la variación de la velocidad sostenida con la altura, marea de tormenta y altura significativa de oleaje.

ENFOQUE TEÓRICO DEL PROBLEMA

Una vez definidas las variables que controlan el diseño por viento, de una estructura en Cancún, se revisaron las bases teóricas para establecer la acción del viento sobre el tramo de puente en estudio.

Los puentes son estructuras sensibles a los efectos producidos por el viento, que puede inducir vibraciones indeseables en algunos de los modos de vibrar de la estructura portante. Esos movimientos dependen de las fuerzas que se generan al interactuar el puente con el viento, las cuales son función de la forma geométrica de la sección transversal del puente, de sus dimensiones y de las propiedades dinámicas del viento y la estructura.

El sistema de fuerzas resultantes de la interacción con el viento se puede representar, en la mayor parte de los puentes, mediante aproximaciones lineales, mientras las características aerodinámicas de la cubierta del puente no muestren una alta dependencia con la variación del ángulo de ataque, α , que se establece entre la dirección media del viento y la superficie de rodamiento del puente. Además, al aumentar el claro libre del puente, existe mayor posibilidad de aparición de efectos no lineales.

En los avances recientes para modelar las fuerzas aerodinámicas, se establecen variables que controlan el movimiento generado por la velocidad media del viento, las vibraciones

auto excitadas y los efectos de la turbulencia. Es común expresar esas fuerzas de interacción, como la suma, a un valor medio, del efecto auto excitable y las fuerzas variables en el tiempo.

Para conocer el comportamiento de una estructura, se recurre a pruebas en túnel de viento, donde se puede controlar la velocidad del viento y el ángulo de ataque. Por ello, se hicieron pruebas en un modelo a escala del puente en estudio, colocado en diversas posiciones dentro de la sección de pruebas del túnel de viento del II UNAM, con el fin de conocer las funciones que definen a los coeficientes adimensionales, con los cuales se pueden establecer las fuerzas que produce el viento y resolver las ecuaciones diferenciales que controlan el movimiento del puente por la acción del viento.

Estas pruebas para evaluar las fuerzas producidas por la interacción con el viento, se hacen con modelos a escala que reproducen geométricamente la forma y dimensiones del puente. En el escalamiento de dichos modelos y del viento, es importante evitar la influencia de las paredes de la sección de pruebas del túnel de viento, así como tratar de que el modelo no ocupe más del 15 % del área transversal. Para este estudio, se seleccionó la escala 1:33, con el fin de estudiar con detalle el efecto del flujo sobre el modelo.

La selección de la velocidad del viento dentro del túnel es arbitraria y en pruebas de secciones de puentes es común usar velocidades menores de 15 m/s. Se seleccionaron cuatro velocidades de prueba, para observar los coeficientes locales de presión y su variabilidad con el cambio de velocidad. En el intervalo seleccionado, entre 6.3 y 15.7 m/s, los coeficientes locales de presión en los puntos de medición seleccionados, mostraron un bajo coeficiente de variación.

Las pruebas realizadas para definir las presiones locales mediante un modelo rígido instrumentado en varios puntos, permitieron: calcular los coeficientes locales de presión, conocer los coeficientes aerodinámicos que definen las fuerzas de interacción del viento con el modelo y, mediante los coeficientes adimensionales C_L , C_D y C_M , definir las bases para el análisis estructural del puente.

En el modelo a escala se definió con claridad la forma de los parapetos laterales, ya que de su geometría, depende de manera significativa la distribución de las presiones generadas por el viento

INSTRUMENTACIÓN USADA DURANTE LAS PRUEBAS.

Se utilizó el método de vórtices aleatorios, para analizar el campo de flujo alrededor de las secciones transversales del puente, con y sin parapetos laterales. Los resultados obtenidos mostraron que la selección adecuada del tipo de parapeto, es significativa para disminuir la velocidad del viento sobre la superficie de rodamiento del puente, y que su altura y forma alteran los valores de los coeficientes aerodinámicos; mientras menor sea la altura, más disminuyen los coeficientes de arrastre.

Para los elementos horizontales de los parapetos laterales, se seleccionó un perfil aerodinámico tipo NACA 66-015, donde las pruebas aerodinámicas mostraron fuerzas de arrastre prácticamente nulas y no se presentaron diferencias en las velocidades sobre y bajo el perfil, lo que evita la generación de vórtices.

El modelo fue fabricado con placas de acrílico, y en sus extremos se colocaron diafragmas de rigidez, para poder ubicarlo dentro de la sección de pruebas del túnel de viento. En esos elementos de rigidez, se pusieron conectores de latón, a fin de conectar los catéteres unidos a los puntos de medición seleccionados. Dos modelos de geometría similar, con separación entre ellos, formaron al modelo de prueba, cuyo peso total fue 10.044 kg.

MODELO DEL PUENTE, ESCALA 1:33, COLOCADO EN LA SECCIÓN DE PRUEBAS DEL TÚNEL DE VIENTO

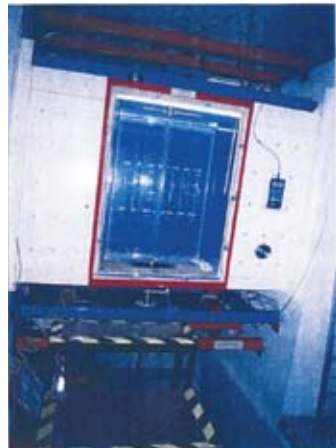


Fig 7a Vista lateral de la sección de prueba



Fig 7b Dispositivo para controlar el ángulo de ataque

En dos secciones transversales, equidistantes de los diafragmas de rigidez, se efectuaron perforaciones, para establecer conexión con los puntos de medición.

Las figs 7a y 7b muestran el modelo colocado en la sección de pruebas del túnel de viento, y el dispositivo para controlar el ángulo de ataque del viento.

En cada uno de los puntos de medición seleccionados, se colocó estratégicamente un catéter de poliuretano, adherido con pegamento y conectado a dispositivos ZOC, en los cuales la presión del aire se transformó en una señal analógica, mediante sensores piezoresistivos, los cuales proporcionan señales, que se transmitieron a la consola del sistema HYSKAN 1000, que se utilizó para definir numéricamente la presión generada en cada punto de medición.

En adición a estos puntos de medición, se colocó en la parte frontal del modelo, un tubo *Pitot*, conectado al sistema de medición, para definir la presión de estancamiento. A partir de ese valor, al dividir la presión medida en cada punto del modelo entre la presión de estancamiento, se definieron los coeficientes locales de presión, válidos tanto para el modelo como para el prototipo, según lo establece el teorema de Buckingham.

Además, cerca del extremo del tubo *Pitot*, se colocó un anemómetro de hilo caliente con el cual se monitoreó la velocidad del viento en la sección de pruebas, la cual se controló por un inversor, que vigiló la velocidad del rotor de aluminio que genera el flujo de aire dentro del túnel de viento. Se llevó además, registro de temperatura y humedad alrededor de la sección de pruebas.

Después de verificar el buen funcionamiento de todas las conexiones de los catéteres a los puntos de medición, y de que el sistema de medición funcionara correctamente, se estableció un programa de pruebas constituido esencialmente por dos condiciones de prueba:

- Prueba del modelo con la ventana abierta
- Prueba del modelo con la ventana cerrada.

Conocidos los coeficientes locales de presión promedio, se registraron las presiones de cada sección transversal de prueba. También se calcularon las áreas tributarias y se definieron las fuerzas normales asociadas a cada área tributaria.

Las fuerzas obtenidas, con la dirección definida por el signo del coeficiente local de presión, se proyectaron sobre dos ejes ortogonales. Además, se calculó el momento de dichas fuerzas respecto al centroide de cada sección transversal, para definir la posición de la resultante de las fuerzas producidas por la acción del viento.

Las fuerzas así calculadas, se proyectaron en otro sistema de ejes centroidales, para conocer los valores de C_L , C_D , y

C_M en cada sección transversal instrumentada; se obtuvo su valor promedio para cada ángulo de ataque del viento medio sobre la sección transversal del puente, y estos valores se graficaron.

Con el fin de evaluar las fuerzas resultantes de la acción de un viento de alta velocidad (220 km/h), se evaluaron las fuerzas que se pueden generar sobre un tramo de 32 m de largo, al aparecer vientos medios de alta velocidad en Cancún.

Se hicieron gráficas de la variación de las fuerzas resultantes de arrastre, de levantamiento y del momento respecto al centróide, en función del ángulo de ataque del viento medio, respecto a la superficie de rodamiento del puente en estudio. Estas fuerzas son las generadas en el tramo de puente, y no consideran los efectos que el viento produce en las pilas de soporte, ni las acciones que se puedan inducir en las pilas por la marea de tormenta, ni por el efecto de oleaje en la zona costera.

COMENTARIOS FINALES

Con esta investigación, se identificaron las variables básicas para analizar y diseñar la estructura portante de un puente que soporta la acción de vientos huracanados. Para ello se establecieron:

- el intervalo de velocidades regionales que se presentan en la región de Cancún
- la marea de tormenta y el oleaje máximo en la zona
- la variación con la altura de la velocidad sostenida dentro del ojo del ciclón
- los coeficientes aerodinámicos básicos, ante diversos ángulos de ataque.

Al usar estos valores para estudiar la respuesta media combinada de las pilas de soporte y la superestructura, para establecer las dimensiones definitivas de la estructura portante, se recomienda considerar la existencia de diafragmas de rigidez entre las trabes precoladas, tanto sobre los apoyos, como en los tercios de cada claro, con el fin de separar los periodos de flexión y de torsión. Así se logra que la velocidad crítica de viento que produce separación inestable de la capa límite que rodea al puente, resulte mayor al límite superior de las velocidades probables durante un ciclón, obtenidas en esta investigación.

Por otra parte, para estimar los valores máximos de velocidad instantánea, se revisó la información obtenida de las mediciones de un ciclón intenso (Isabel, 2003), tanto en la costa, como en boyas marinas.

En 51 estaciones terrestres, el cociente resultante de dividir la velocidad máxima instantánea entre la velocidad máxima sostenida resultó 1.37, con un coeficiente de variación de 11 %, y para 21 boyas marinas el cociente resultó 1.29, con un coeficiente de variación de 7 %. Las normas británicas sobre ciclones recomiendan para vientos ciclónicos, un cociente próximo de 1.4. 🧑🏻