

VI CONGRESO CUBANO DE METEOROLOGÍA



ESTUDIO DE LA MARCHA INTERANUAL DEL VIENTO CON VISTA A LA PROSPECCIÓN EÓLICA EN TRES LUGARES DIFERENTES DE CUBA

Diaslen León Ramos¹, Lourdes Álvarez Escudero²

(1) Departamento de Meteorología. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas

Ave. Salvador Allende y Luaces. Apdo. Postal 6163. La Habana, Cuba

Teléfono: (537) 8798643; e-mail: dleon@instec.cu

(2) Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología

Apartado Postal 17032. CP 11700. Habana 17. La Habana. Cuba.

Teléfono: (537) 868 66 19, e-mail: lourdes.alvarez@insmet.cu

La Habana
Diciembre 2011

Resumen

Dada la importancia cada vez más creciente que tiene en Cuba la utilización del recurso eólico para la producción de energía limpia y la necesidad de buscar locaciones donde los regímenes de viento sean energéticamente aprovechables y permanentes, este trabajo se propone como objetivo, la determinación de la ocurrencia climática de vientos aprovechables por aerogeneradores eólicos y su tendencia. A partir de los datos de dirección y rapidez del viento para tres estaciones meteorológicas ubicadas en zonas costeras de lugares apartados de la Isla de Cuba y que son: Cabo de San Antonio, Cabo Cruz y Punta de Maisí, se procede al estudio de su climatología analizando la frecuencia de ocurrencia para dos condiciones dadas como pares (dirección – rapidez, rapidez – hora del día). Se analiza mediante ajuste de armónicos una valoración cuantitativa de la tendencia de la frecuencia de ocurrencia por pares de valores y del comportamiento futuro de la misma. Los análisis arrojan en general en la zona de estudio, un predominio de vientos bajos (entre 1 y 2 m/s) y un crecimiento del número de casos para estos mismos rangos de valores en el quinquenio 2025 – 2029. Se constata también una disminución del número de calmas y una marcha diaria caracterizada por vientos bajos en horas tempranas y finales del día y altos en horas de la tarde. Se recomienda el uso de aerogeneradores de baja velocidad de arranque en las zonas de Cabo de San Antonio y Cabo Cruz, debido a la presencia y permanencia de sus vientos, no así en Punta de Maisí donde se prevé un crecimiento de las horas de calma.

1. Introducción

Estudios sobre el aprovechamiento del viento para la producción de energía a partir de la crítica situación que enfrenta el sector energético nacional y el interés que despierta la utilización del viento para la producción de energía limpia, la Estrategia Política Ambiental de Cuba que promueve el impulso del sector energético renovable tiene como necesidad conocer el potencial eólico en diferentes zonas del país con el objetivo de ubicar los aerogeneradores en aquellos lugares más ventajosos, para su explotación a mediana y gran escalas.

Existen disímiles investigaciones relacionadas con el aprovechamiento del viento para generar energía.

Conocer si el viento en los lugares de estudio se mantendrá, aumentará o disminuirá en su rapidez media o en su ocurrencia más allá de lo que explica la variabilidad climática natural, es de vital importancia ya que es conocido que el tiempo de vida útil de un aerogenerador es de aproximadamente 25 años. Por consiguiente, es de sumo interés conocer por su repercusión económica si en un lugar determinado los vientos se comportarán de manera que un aerogenerador pueda ser utilizado en su capacidad potencial un número de años hacia el futuro.

En el año 2009(a) Álvarez et al., realiza una caracterización de las velocidades bajas del viento con vista a la generación de energía eléctrica donde analiza el comportamiento del viento en 14 estaciones meteorológicas de Cuba con vistas a la utilización en las mismas de máquinas eólicas generadoras estableciendo que los vientos son débiles para la mayoría de las máquinas en uso con umbrales 4 m/s.

Aplica un método novedoso donde calcula el incremento de los vientos hasta el año 2025 y concluye que de las 14 estaciones analizadas solo Cabo Lucrecia y Casa Blanca incrementarán los vientos 4 m/s con la disminución entre 1 y 3 m/s, mientras las otras estaciones aumentarán entre 1 y 3 m/s a costa de valores más altos de la rapidez del viento, además que las calmas (viento cero) tienen una frecuencia alta en Cuba encontrando solo una estación donde son algo menores que el 20% de las horas del año y que en 6 de las 14 estaciones las calmas sobrepasan el 40% de las horas del año. Álvarez et al. (2009b) teniendo en cuenta la nueva metodología para el estudio de la variabilidad climática Álvarez (2000) realiza una caracterización de la variabilidad del viento hasta el año 2025 para algunas estaciones meteorológicas desde el punto de vista de la generación eólico-eléctrica.

De la revisión realizada se constata que los análisis de marcha interanual del viento son escasos y los expuestos son la base sobre la que se desarrolla este trabajo, por lo que en los siguientes capítulos se procederá a realizar un estudio de marcha interanual de frecuencias de ocurrencia para pares de variables y su comportamiento futuro, para tres zonas del país de forma detallada.

Los objetivos de este estudio consisten identificar las características de la distribución del viento en las estaciones de Cabo de San Antonio, Cabo Cruz y Punta de Maisí,, realizar un pronóstico de los cambios que pueden ocurrir en el viento en estos lugares hasta el año 2025 y determinar si es factible la instalación de los aerogeneradores a partir de los pronósticos realizados.

2. Materiales y Métodos

Selección de la zona de estudio

Para la selección de las zonas de estudio se escogieron las estaciones meteorológicas de Cabo de San Antonio en la provincia Pinar del Río, Cabo Cruz en la provincia Granma y Punta de Maisí en la provincia Guantánamo, estaciones estas costeras y representativas de diferentes zonas del país y se hizo debido principalmente a ser lugares ventajosos desde el punto de vista del régimen de sus vientos, para pequeños aerogeneradores, por lo que no han sido estudiadas sus series representativas de viento en su comportamiento interanual y de tendencia, ya que estos estudios se han centrado en las zonas con clases de potencia de moderado, bueno y excepcional. Además estos sitios presentan una apartada ubicación, donde en muchos casos no llegan las redes del Sistema Electroenergético Nacional, presentan un mínimo de impacto visual de los aerogeneradores, debido a lo retirado de sus lugares de asentamiento y además de satisfacer una potencial demanda energética, con producción limpia, que impondría un futuro desarrollo del turismo.

Los datos de la estación Punta Lucrecia en la provincia de Holguín, también serán analizados, para usarlos desde un punto de vista comparativo, debido a que esta estación fue usada como referencia para las instalaciones del Parque Gibara I, actualmente en explotación.

A partir de los resultados obtenidos del Mapa del Potencial Eólico de Cuba (Soltura et al. 2006) la velocidad media estimada a 50 metros de la superficie para estas estaciones es: Estación de Cabo de San Antonio: 5.33 m/s, Estación de Cabo Cruz: 5.43 m/s, Estación de Punta de Maisí: 5.98 m/s

Fuentes de información y calidad

Para realizar la investigación se utilizaron las series de datos trihorarios de dirección y rapidez del viento en superficie de las estaciones meteorológicas de Cabo de San Antonio, Cabo Cruz, Punta de Maisí y Punta Lucrecia en los períodos 1970 – 2009 para las primeras 3 estaciones y 1975 – 2009 para la última.

Para evaluar la calidad de las series de registros del viento se procedió a dos tipos generales de chequeos. El primer grupo trató de detectar errores de asentamiento, así se comprobó si todos los campos en análisis se encontraban dentro de los rangos adecuados y si la relación entre la fuerza y la dirección del viento en el caso de las calmas

era consecuente. Se comprobaron según los datos recogidos aquellos valores de rapidez del viento por encima de los 100 km/h, el caso de vientos reportados con dirección 0° (se cambió por 360) y que se reportaron como código de no dato (999) las direcciones del viento correspondientes a la rapidez 0 km/h (calmas). El segundo chequeo se refirió al completamiento de las series de registros y el sesgo que la falta de datos podría introducir en su distribución. Para ello se usó la metodología utilizada Álvarez et al. (2008) basada en la determinación del largo de la serie, la información utilizable, el sesgo mensual y el sesgo horario. A la clasificación de los índices dados en la metodología, se le hicieron pequeñas variaciones para su utilización.

Metodología para el cálculo de la tendencia cuantitativa de las series

La metodología a usar para el cálculo de las tendencias de forma cuantitativa es la implantada por Álvarez en el año 2000.

Se comienza el análisis apoyados en los espacios de Banach y Hilbert (Maurín, 1972), atacando la estadística en una forma diferente que basa sus cálculos en la distribución de frecuencias en lugar de estimadores de tendencia central. Para ello se enuncian algunas propiedades de los teoremas y espacios de Hilbert relacionados que demuestran la validez de esta metodología. Además utilizan las matrices de probabilidades (Rao, 1971) y conforma matrices de tendencia que determinan los resultados.

En línea general la metodología consiste en el ajuste de curvas y la evaluación de la pendiente del mencionado ajuste de forma matricial, donde los ajustes tienen la forma:

$$y = a_0 + a_1x + \sum_{n=1}^m b_n \cos(\alpha_n x) + c_n \sin(\alpha_n x) \quad (1)$$

siendo “y” el valor de frecuencia de ocurrencia para un par de variables definidas, “x” se refiere al número del quinquenio o período determinado para el ajuste y m es un número entero, menor que el número de coeficientes a ajustar.

Para el caso de estudio se realizarán 2 tipos de matrices:

- Frecuencia de ocurrencia de rangos de dirección del viento por rangos de rapidez del viento.
- Frecuencia de ocurrencia de rangos de rapidez del viento por horas del día.

Los rangos de dirección del viento están definidos según la rosa de los vientos de 16 rumbos (22.5°). Los rangos de rapidez del viento están divididos en 18 clases dadas por “calmas”, 16 clases que se incrementan desde 0.1 m/s en 1 m/s y otra clase para los mayores que 16 m/s.

En este caso se trabajarán matrices quinquenales que abarcan 8 quinquenios (el último con solo 4 años) para todas las estaciones con excepción de Punta Lucrecia, aunque esta se utilizará solo para comparaciones. El número de armónicos a utilizar será 2 ($m=2$) y se ajustarán 6 coeficientes.

Para la comprobación del cálculo de las tendencias se procederá a recalcularlas sin tener en cuenta el último quinquenio, se realizará un pronóstico para este y se calcularán los errores entre la extrapolación y el valor real punto a punto.

El pronóstico del potencial eólico para el 2025 se calculará a partir de la extrapolación de los valores de frecuencia para cada rapidez del viento y su aplicación a las curvas de potencia nominal dadas para distintas máquinas según los cálculos realizados para las máquinas instaladas en Cuba (Alfredo Roque, Centro de Física de la Atmósfera, comun. pers.)

Herramienta para el cálculo del ajuste

Para la aplicación de la metodología del cálculo de la tendencia de forma cuantitativa, se diseñó con la ayuda de los compañeros del Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología (José Armando Espinosa, Centro de Física de la Atmósfera, comun. pers.) un programa en MATLAB versión 7.6.0 (R2008a), que tiene los siguientes pasos:

1. Asimilación de los datos de entrada: estos son ficheros separados por comas, que poseen toda la información captada para cada estación y consta de los campos: número de estación (según código de la OMM), año, mes, día, hora (local trihoraria), dirección del viento (en grados), rapidez del viento (en Km/h). Estos datos fueron exportados de una Base de Datos montada sobre MS-ACCESS, creada para el desarrollo de esta investigación y la cual permitió una gestión adecuada de los datos, tanto para la validación de la información, como su salida hacia otras aplicaciones.
2. Cálculo de las matrices para dos diferentes combinaciones de pares de variables y para diferentes períodos de tiempo (anuales y quinquenales). Las salidas de esta parte del programa pueden ser gráficas o en ficheros separados por comas para aplicar a otros procedimientos.
3. Cálculo de los ajustes (ver fórmula 1) para cada punto de cada tipo de matriz y salida de los coeficientes de ajuste de forma matricial. Las salidas de esta parte del programa pueden ser gráficas o en ficheros separados por comas para aplicar a otros procedimientos.

4. Cálculo del pronóstico de la frecuencia de ocurrencia de pares de variables, según extrapolación de la ecuación de ajuste. Aquí puede escogerse el momento para el cual quiere hacerse el pronóstico en dependencia del período de tiempo utilizado (anuales o quinquenales). Las salidas de esta parte del programa pueden ser gráficas o en ficheros separados por comas para aplicar a otros procedimientos.

3. Resultados y Discusión

Análisis de las matrices de dirección contra rapidez del viento y rapidez del viento contra hora del día para todo el período de estudio

El procesamiento de las series de observaciones trihorarias de dirección y rapidez del viento en su totalidad para cada una de las estaciones en estudio, nos ofrecen la frecuencia de ocurrencia para cada par de variables y nos permite determinar los máximos de ocurrencia y la marcha diaria más frecuente de la rapidez del viento. Lo obtenido se representa en las figuras de la 1 a la 6.

De la Figura 1 se observa que para la estación de Cabo de San Antonio los vientos predominantes son del este, donde pueden tener frecuencias de más del 1% para 4m/s de rapidez. En general los rumbos más frecuentes se agrupan entre el NNE y el ESE, entre 1 y 2 m/s. El máximo absoluto se encuentra en el este para 1 m/s con una frecuencia de ocurrencia cercana al 8%.

Con respecto a la marcha diaria (Figura 2) se observan máximos en vientos débiles en horas de la noche, la madrugada y primeras horas del día y valores mayores de ocurrencia para clases altas de rapidez del viento en horas de la tarde, así entre las 10 y las 16 hora local se encuentran ocurrencias mayores del 1% para vientos de alrededor de los 6 m/s. El máximo absoluto se alcanza a las 07 hora local para velocidades de 1 m/s y con más del 5% de ocurrencia. Las calmas representan alrededor del 8% del total de observaciones y son máximas a las 22 hora local con más del 2%.

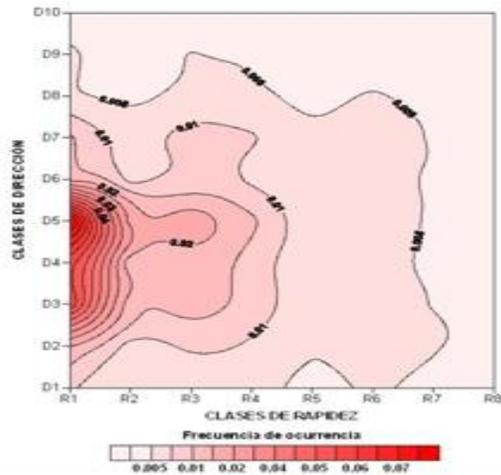


Figura 1. Frecuencia de ocurrencia de clases de rapidez contra clases de rumbo del viento para el período 1970 – 2009 en la estación Cabo de San Antonio (detalle).

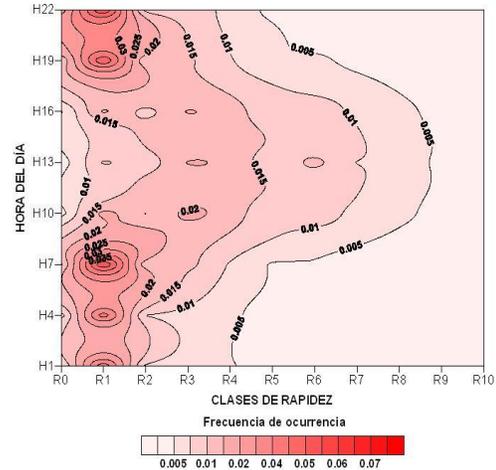


Figura 2. Frecuencia de ocurrencia de clases de rapidez del viento contra hora del día para el período 1970 – 2009 en la estación Cabo de San Antonio (detalle).

La estación de Cabo Cruz presenta una distribución de dirección - rapidez ligeramente diferente (ver Figura 3), aquí el máximo absoluto lo alcanza el NE para 1 m/s con alrededor de un 7% de ocurrencia, aunque los vientos entre el NNE y el E y entre 1 y 2 m/s, presentan ocurrencias sobre el 2%. Como particularidad se nota una presencia significativa para vientos de componente sur (fundamentalmente SE) con máximos del 2% de ocurrencia para clases de rapidez de 4 y 6 m/s.

En el caso de la marcha diaria (Figura 4) se observa que la distribución es similar a la de Cabo de San Antonio con máximos de vientos bajos en horas de la madrugada, la mañana y la noche y ocurrencias mayores para vientos altos en horas de la tarde, donde se alcanza hasta un 1% de ocurrencia entre las 10 y las 16 hora local. El máximo de ocurrencias para clases de rapidez alta ocurre a las 13 hora local para vientos de 8 m/s y para las clases de rapidez baja a las 07 para 1 m/s. Las calmas aquí son inferiores al 4% del total de observaciones con máximo de ocurrencia cercano al 1% a las 19 hora local.

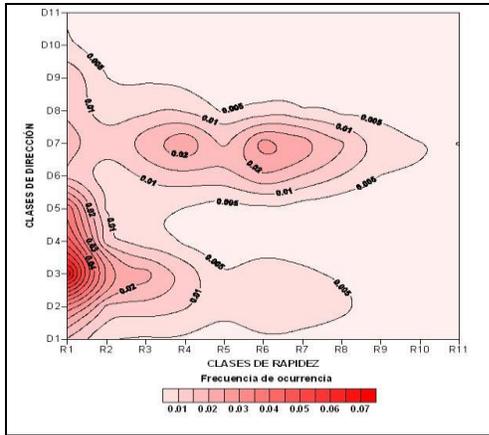


Figura 3. Frecuencia de ocurrencia de clases de rapidez contra clases de rumbo del viento para el período 1970 – 2009 en la estación Cabo Cruz (detalle).

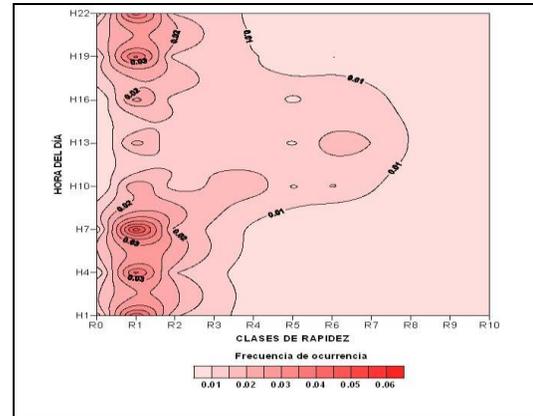


Figura 4. Frecuencia de ocurrencia de clases de rapidez del viento contra hora del día para el período 1970 – 2009 en la estación Cabo Cruz (detalle).

La distribución de frecuencia de ocurrencia de clases de rapidez del viento por clases de dirección (Figura 5) muestra un comportamiento particularmente diferente a las dos estaciones en estudio que la precedieron. Aunque los vientos más representativos tienen componente norte, los picos de ocurrencia se suceden para 4 y 6 m/s, pero con frecuencias de ocurrencia inferiores al 4%. El máximo absoluto ocurre en el este con 6 m/s y con una frecuencia de alrededor del 5%.

La distribución de frecuencia de ocurrencia de clases de rapidez del viento por hora del día para la estación de Punta de Maisí (Figura 6), también presenta un patrón distinto al de las restantes estaciones en estudio. Los valores máximos de frecuencia de ocurrencia no sobrepasan el 3.5% del total de observaciones válidas y existen “áreas” más grandes donde los valores de frecuencia de ocurrencia están por encima del 1%. El máximo absoluto corresponde a las calmas en el horario de las 7 hora local, pero en casi todas las horas del día hay representatividad por encima del 1% para vientos entre 4 y 8 m/s. El máximo para las clases de rapidez mayores se alcanza a las 13 hora local con valores por encima del 2% y con vientos superiores a 4 m/s. Las calmas representan el 13% de las observaciones válidas, casi igual que la clase de 4 m/s.

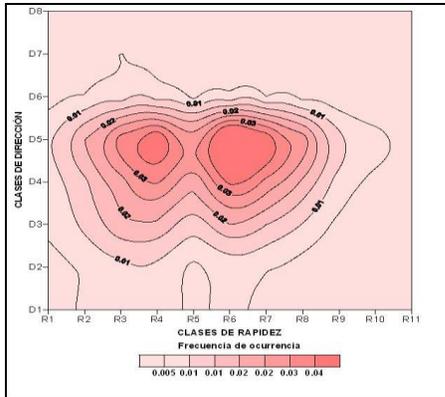


Figura 5. Frecuencia de ocurrencia de clases de rapidez contra clases de rumbo del viento para el periodo 1970 – 2009 en la estación de Punta de Maisí (detalle).

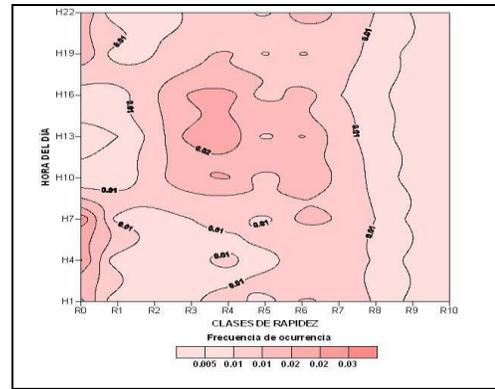


Figura 6. Frecuencia de ocurrencia de clases de rapidez del viento contra hora del día para el período 1970 – 2009 en la estación de Punta de Maisí (detalle).

En general se observa que el comportamiento de la ocurrencia de pares rapidez – dirección del viento y rapidez - hora del día, tienen rasgos comunes en las tres estaciones en estudio, dado fundamentalmente por predominio de vientos de componente norte y velocidades inferiores a los 4 m/s y ocurrencia de vientos más bajos en horas de la madrugada, la mañana y la noche y más altos en horas de la tarde. Como puntos no concordantes se nota cierta preponderancia de valores altos de componente sur en la estación de Cabo Cruz y representatividad por encima del 1% para valores de rapidez de más de 6 m/s en todas las horas del día en la estación de Punta de Maisí.

Pronóstico en el cambio del régimen de viento para el quinquenio 2025 – 2029 para las tres estaciones en estudio

En el presente acápite se presentará la distribución del viento para las matrices de “clases de dirección” contra “clases de rapidez” y de “clases de rapidez” contra “hora del día” mediante el análisis de la frecuencia de ocurrencia pronosticada con ayuda de los ajustes para el quinquenio 2025 – 2029 a la que se le sustrae la frecuencia de ocurrencia de la matriz climática a partir de cuyo estudio se obtuvo la ecuación de ajuste. Esta representación nos mostrará el cambio que en incremento o decremento de número de casos, se espera para el mencionado quinquenio futuro. Se escoge el quinquenio 2025 – 2029 ya que lo separan entre 15 y 20 años del fin de las series climáticas analizadas y alrededor de ese número de años es que se extiende la vida útil de un aerogenerador.

En la Figura 7 se representa el análisis de la matriz diferencia del pronóstico de ocurrencia para el quinquenio 2025 - 2029 menos la matriz climática, de clases de dirección contra clases de rapidez del viento, para la estación de Cabo de San Antonio. Aquí se observa que un marcado aumento de la ocurrencia para vientos entre 1 y hasta 2 m/s, fundamentalmente para la dirección "E". Se reconoce además una disminución del número de casos para vientos entre 3 y 6 m/s, fundamentalmente de las direcciones NE y ESE.

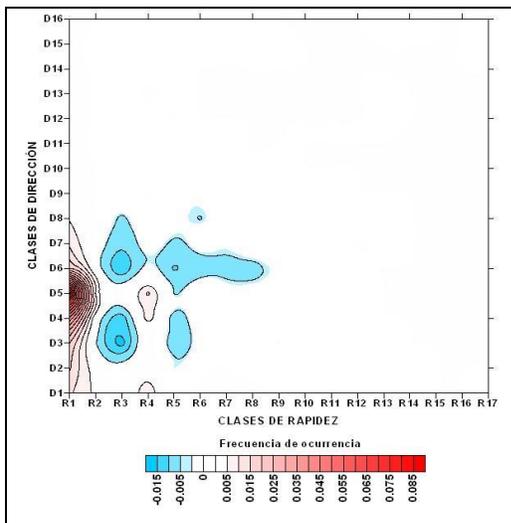


Figura7. Análisis de la matriz diferencia de frecuencia de ocurrencia del pronóstico para el quinquenio 2025 - 2029 y la matriz climática de clases de dirección contra clases de rapidez del viento, para la estación de Cabo de San Antonio.

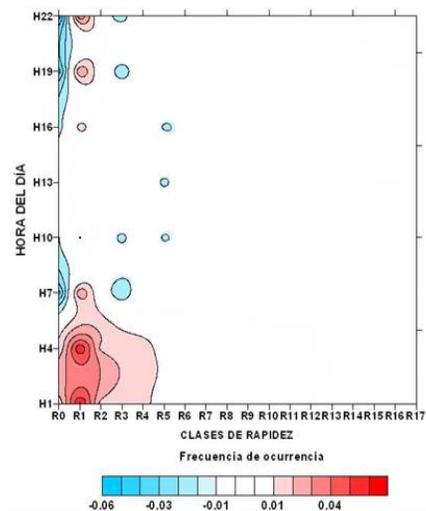


Figura8. Análisis de la matriz diferencia de frecuencia de ocurrencia del pronóstico para el quinquenio 2025 - 2029 y la matriz climática de clases de rapidez del viento contra hora del día, para la estación de Cabo de San Antonio.

Con respecto al mismo análisis para la matriz diferencia de clases de rapidez contra hora del día y para la estación de Cabo de San Antonio (Figura 8), lo más sobresaliente es el aumento de la frecuencia en horas de la madrugada y hasta las 7 hora local de la clase correspondiente a 1 m/s y la disminución del número de casos de calmas, fundamentalmente a las 7 hora local y en horas de la noche.

La matriz diferencia para la estación de Cabo Cruz en lo referido a clases de dirección contra clases de rapidez del viento (Figura 9), también muestra un aumento de la frecuencia en la clase de 1 m/s para vientos de componente N, contra un decremento del número de casos de entre 2 y 5 m/s para las direcciones "este" y ESE.

Con respecto a las horas del día (Figura 10) se observa también un aumento de frecuencia en la clase correspondiente a 1 m/s en horas de la madrugada, primeras horas de la mañana y la noche y una baja en los valores de frecuencia de entre 3 y 5 m/s en horas de la tarde.

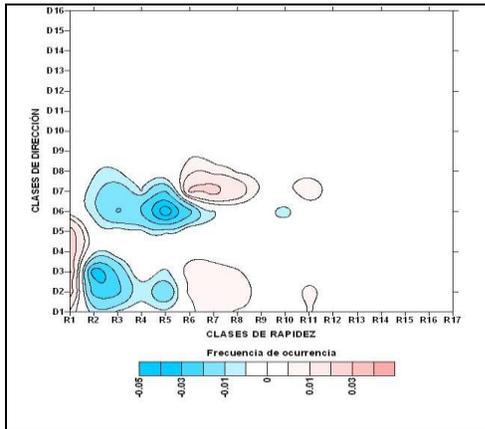


Figura 9. Análisis de la matriz diferencia de frecuencia de ocurrencia del pronóstico para el quinquenio 2025 - 2029 y la matriz climática de clases de dirección contra clases de rapidez del viento, para la estación de Cabo Cruz.

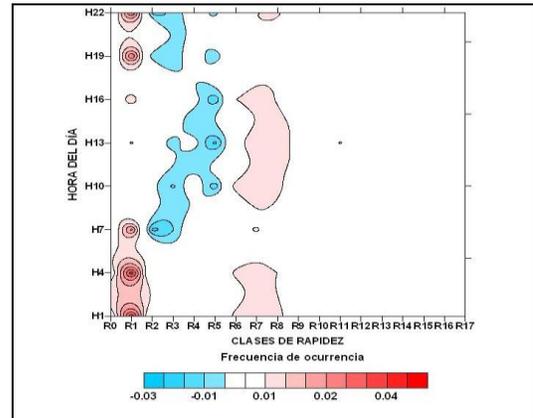


Figura 10. Análisis de la matriz diferencia de frecuencia de ocurrencia del pronóstico para el quinquenio 2025 – 2029 y la matriz climática de clases de rapidez del viento contra hora del día, para la estación de Cabo Cruz.

La estación de Punta de Maisí como caso particular, muestra incremento de las frecuencias de 4 y 6 m/s para el rumbo NNE principalmente y decremento marcado para el “este” y los 5 m/s, en lo referido al par dirección – rapidez del viento (Figura 11). Con respecto al par rapidez – hora del día (Figura 12) muestra un marcado incremento de las calmas en los horarios donde estas son más representativas (01- 07 y 19 -22 hora local) y un decremento del número de casos para los 5 m/s avanzada la mañana y la tarde.

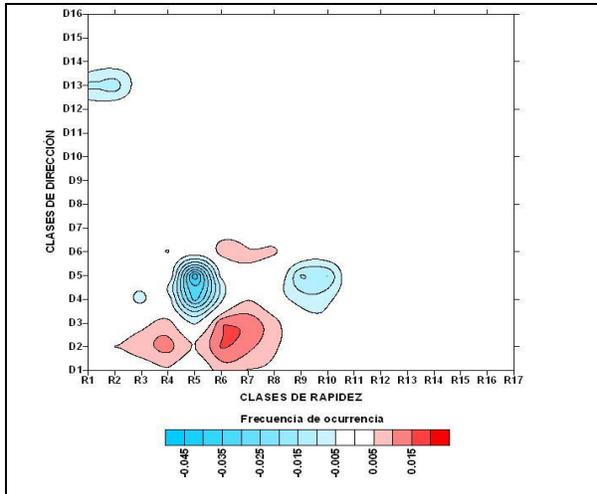


Figura 11. Análisis de la matriz diferencia de frecuencia de ocurrencia del pronóstico para el quinquenio 2025 – 2029 y la matriz climática de clases de dirección contra clases de rapidez del viento, para la estación de Punta de Maisí.

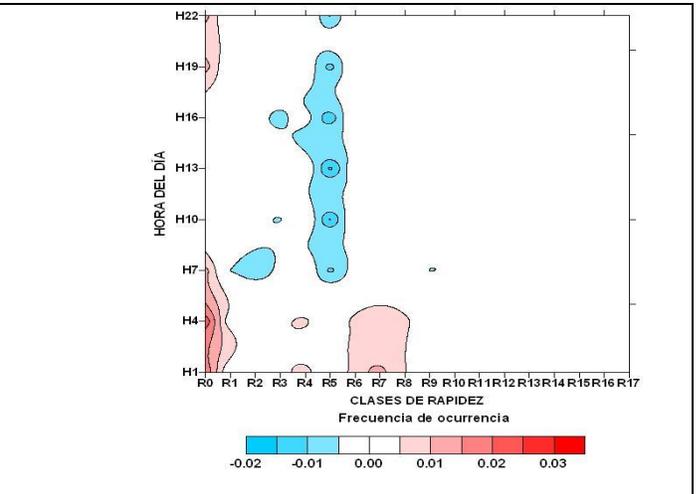


Figura 12. Análisis de la matriz diferencia de frecuencia de ocurrencia del pronóstico para el quinquenio 2025 - 2029 y la matriz climática de clases de rapidez del viento contra hora del día, para la estación de Punta de Maisí.

En resumen puede mencionarse que las estaciones de Cabo de San Antonio y Cabo Cruz auguran un incremento del número de casos de rapidez del viento de 1 m/s para el quinquenio 2025 – 2029, mientras en la estación Punta de Maisí se esperan aumentos de las calmas y decremento de los casos de 5 m/s.

Estudio preliminar de la factibilidad de explotación de aerogeneradores para las estaciones en análisis a partir del comportamiento de sus regímenes de viento

Para poder proponer el uso de aerogeneradores en base al comportamiento de los vientos en cada una de las estaciones en estudio, se halló a partir de la matriz climática cuantas horas quinquenales representaban las frecuencias de ocurrencia obtenidas del procesamiento de los registros de vientos disponibles, en este caso agrupando la información por clases de rapidez del viento. Este mismo tratamiento se siguió en el caso de las frecuencias de ocurrencia pronóstico para el quinquenio 2025 – 2029. Lo planteado se representa en las Figuras 13, 14 y 15.

Para la estación de Cabo de San Antonio (Figura 13) se observa que los vientos de 1 m/s ocupan más de la cuarta parte del total de horas posibles para un quinquenio desde el punto de vista de la climatología, pero el pronóstico augura un crecimiento del número

de horas con esta rapidez del viento hasta casi la mitad de las horas posibles para un quinquenio y un marcado decremento de las horas de calmas. Las clases más altas de rapidez del viento son poco representativas y los pronósticos están por lo general por debajo de las cantidades climáticas.

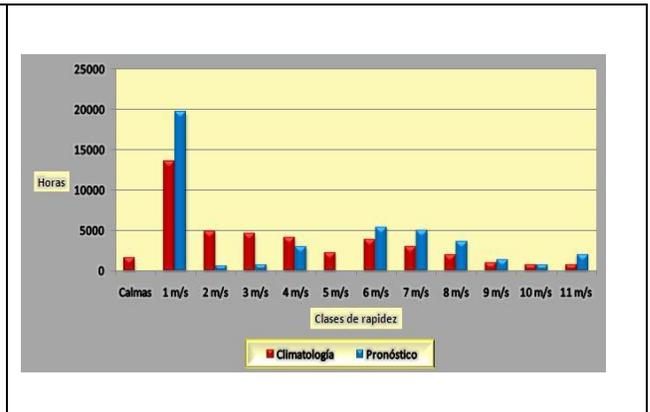
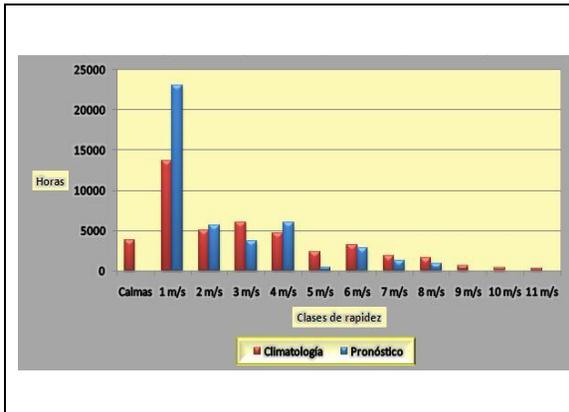


Figura 13. Número de horas por clases de rapidez del viento calculadas a partir de la frecuencia de ocurrencia aportada por la matriz climática y por la matriz pronóstico para el quinquenio 2025 – 2029 en la estación Cabo de San Antonio.

Figura 14. Número de horas por clases de rapidez del viento calculadas a partir de la frecuencia de ocurrencia aportada por la matriz climática y por la matriz pronóstico para el quinquenio 2025 – 2029 en la estación Cabo Cruz.

Para la estación de Cabo Cruz (Figura 14) la situación es muy parecida, aunque el decremento para el pronóstico en el número de casos entre las clases correspondientes a 2 y 3 m/s es muy marcado y hay un aumento discreto con respecto a la climatología para las clases entre 6 y 8 m/s.

La estación de Punta de Maisí (Figura 15) presenta una mayor distribución del número de horas posibles para un quinquenio entre las diferentes clases de rapidez del viento, pero desde el punto de vista del pronóstico, se observa un incremento sustancial de las horas de calma, un decremento de las horas de ocurrencia para vientos entre 1 y 3 m/s y marcado para 5 m/s y un ligero incremento de horas de ocurrencia para las clases de 4, 6, 7 y 8 m/s.

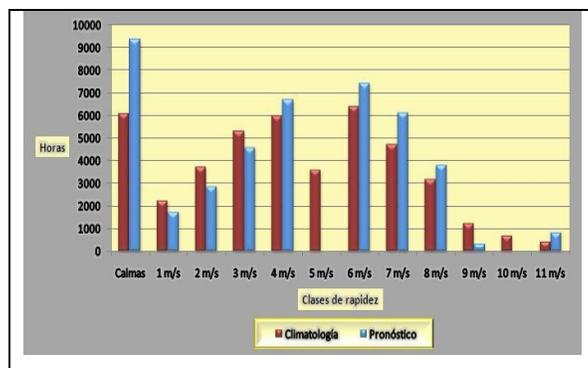


Figura 15. Número de horas por clases de rapidez del viento calculadas a partir de la frecuencia de ocurrencia aportada por la matriz climática y por la matriz pronóstico para el quinquenio 2025 – 2029 en la estación Punta de Maisí.

Visto esto puede deducirse que a pesar de que los vientos predominantes en las estaciones de Cabo de San Antonio y Cabo Cruz son bajos, tienen alta permanencia y los pronósticos basados en el seguimiento de su marcha interanual auguran un crecimiento aún mayor de casos para estas clases y una disminución de los casos de calmas, por lo que puede ser conveniente el establecimiento de aerogeneradores en estas zonas con bajas velocidades de arranque, que permitan el aprovechamiento de este régimen favorable de vientos. Los aerogeneradores así instalados pueden dar servicio puntual a objetivos dentro de estas zonas, muchas veces aisladas, pero con potencial desarrollo del turismo ecológico.

Para la estación de Punta de Maisí no se recomienda el uso de aerogeneradores debido al marcado incremento de las horas de calmas y a lo discreto del crecimiento en número de horas para vientos superiores a 6 m/s.

4. Conclusiones

1. En las estaciones en estudio se observa una preponderancia de vientos de componente N y valores de rapidez entre 1 y 2 m/s.
2. La marcha diaria de la rapidez del viento para las estaciones en estudio presenta en general predominio de valores bajos en horas de la noche, la madrugada y primeras de la mañana y de valores más altos para horas de la tarde.
3. La estación de Punta de Maisí presenta un comportamiento más particular con vientos altos a todas las horas del día y preponderancia de valores de rapidez entre 4 y 6 m/s.

4. El pronóstico para el 2025 arrojó un aumento de entre 3 y 4% de ocurrencia de valores de viento de baja rapidez y dirección entre el NNE y ESE, para las estaciones de Cabo de San Antonio y Cabo Cruz, no así para Punta de Maisí donde hay un incremento de las calmas.
5. Es factible debido a la ocurrencia e incremento de los vientos de entre 1 y 2 m/s, instalar aerogeneradores en las zonas de Cabo de San Antonio y Cabo Cruz, siempre que estos sean de velocidades bajas de arranque.
6. Se recomienda para los estudios de homogeneidad, trabajar series de frecuencia de ocurrencia para pares de variables, en lugar de valores medios, con vistas a determinar los rangos precisos de incremento y decremento de la ocurrencia.
7. Se recomienda extender la metodología aquí referida para el estudio del viento en otras estaciones del país.

5. Referencias

Álvarez, R., 2000. Nueva metodología para el estudio de la variabilidad climática. Rev. Cubana de Meteorología Vol. 7, No. 1. pp 55-61.

Álvarez, R., Álvarez, L., Aenlle, L., 2009(a): Caracterización de las velocidades bajas del viento con vistas a la generación de energía eléctrica. Memorias del V Congreso Cubano de Meteorología. Ciudad Habana, del 30 de noviembre al 4 de diciembre del 2009. Publicación electrónica, ISBN 978-959-7167-20-4.

Álvarez, R., Álvarez, L., Aenlle, L., 2009(b): Metodología para el cálculo del máximo aprovechamiento del potencial eólico. Memorias del V Congreso Cubano de Meteorología. Ciudad Habana, del 30 de noviembre al 4 de diciembre del 2009. Publicación electrónica, ISBN 978-959-7167-20-4.

Soltura, R., Roque, A., Rivero, I., Wallo, A., Báez, R., Vázquez, R., Rivero, R., Ayala, M., Rodríguez, G., Carrasco, H., Curbelo, A., González, A., Herreras, O., Martín, G., Díaz, J., Hernández, G., 2006: Informe del Mapa de Potencial Eólico de Cuba. Informe Científico-Técnico del Instituto de Meteorología.

Álvarez L., Borrajero, I., Álvarez, R., 2008: Análisis de la calidad de la información y la tendencia de la rapidez del viento en algunas estaciones relacionadas con la ubicación de aerogeneradores eólicos. Memorias de la Convención Trópico 2008, Ciudad de la Habana

del 16 al 20 de junio del 2008, ISBN: 978-959-282-079-1, E:\PDF\METEOROLOGIA.pdf, 1390-1402.

Maurin, K., 1972: Methods of Hilbert spaces. Warszawa. Polonia. 553 pp.

Rao, R., 1971: Inverse of Matrices and its applications. John Wiley Sons New York 240 pp.