*Ciencias de la Tierra y el Espacio, enero-junio, 2017, Vol.18, No.1, pp.45-58, ISSN 1729-3790*

# Evaluación del Potencial Eólico a 20 metros de altura en la Isla de la Juventud, Cuba

Edgardo Soler-Torres [(1)], Reinier Borrego-Díaz [(1)], Luís M. Sánchez-Suárez [(1)]

*[(1)] Centro Meteorológico Provincial. Calle 41 # 4625, e/ 46 y 54, Nueva Gerona, Isla de la Juventud, Cuba. CP. 25100. Teléfonos: (46) 324121 y 324618 E-mail: edgardo.soler@ijv.insmet.cu*

| Recibido: octubre 2016 | Aceptado: enero 2017 |
|---|---|

**Resumen**

Con el objetivo de evaluar el potencial eólico a 20 metros de altura en la Isla de la Juventud, se emplearon como entradas al modelo WAsP (Wind Atlas Analisys and Application Program) los registros de dirección y velocidad del viento a ese nivel, la localización y dimensiones de los obstáculos identificados en la proximidad de los mástiles anemométricos y el mapa combinado de cambios de rugosidad y curvas de nivel del terreno a escala 1:25 000. Procesando los ficheros de salidas del WAsP en un Sistema de Información Geográfica (SIG) se obtuvo el mapa con la distribución de la densidad de potencia media anual del viento, con resolución espacial de 100 metros. Este resultado indica que los máximos de potencial eólico (más de 300 W/m$^2$) están en las elevaciones del centro-norte de la Isla, seguidos por una estrecha franja costera del norte y el este (80 a 180 W/m$^2$). Su análisis permitió la identificación de áreas localizadas en paisaje llano sobre el interior de la Isla, con potencial eólico aprovechable dentro de la clasificación Pobre, de las cuales se han seleccionado tres zonas promisorias, dos en el rango de 120 a 140 W/m$^2$ y una entre 100 y 120 W/m$^2$. Se estimó la producción anual de energía en cada sitio seleccionado y se determinó el modelo con mejor acoplamiento entre las curvas de duración de velocidades del viento estimado y la de potencia del aerogenerador.

**Palabras claves:** mapa eólico, potencial eólico, velocidad del viento, WAsP.

# Assessment Wind Potential 20 meters height on the Isle of Youth, Cuba

**Abstract**

In order to evaluate the wind potential at 20 meters height on the Isle of Youth, they were used as inputs to the model WAsP (Wind Atlas Analisys and Application Program) records of direction and wind speed at that level, location and dimensions of the obstacles identified in the vicinity of anemometer masts and combined map changes roughness and contour terrain 1:25 000. Processing WAsP outputs files in a Geographic Information System (GIS) was obtained the map with the density distribution of average annual wind power, with spatial resolution of 100 meters. This result indicates that the maximum wind potential (over 300 W/m$^2$) are at elevations of north-central Island, followed by a narrow coastal strip north and east (80 to 180 W/m$^2$). His detailed analysis also allowed the identification of localized in the flat landscape on the interior of the island, with exploitable wind potential within the Poor rating, of which we have selected three promising areas, two in the range of 120 to 140 areas W/m$^2$ and 100 to 120 W/m$^2$. Using the technical data of small commercial wind turbines annual energy production in each selected site was estimated and the model with better coupling between duration curves estimated wind speeds and wind turbine power was determined.

**Key words:** WAsP, wind map, wind power, wind speed.

## 1. Introducción

Estudios con diversos objetivos sobre el comportamiento del viento en Cuba y en algunas de sus regiones específicas se han llevado a cabo desde principios de la década de los 70´ del pasado Siglo XX hasta la actualidad, como los realizados por **Boytel (1972), Rubiera y Ramírez (1978), Carnesoltas (1986), Rego (1989), Lecha, Paz y Lapinel (1994), Fernández y Pazos (1998), Rivero (2001), Soltura et al (2002), Soler et al (2010), León y Álvarez (2011) y Rodríguez (2011)**. Sin embargo, el primer estudio aplicado a la generación de energía eléctrica que incluye al territorio pinero fue la Evaluación del potencial eólico en Cuba. Aplicaciones del WAsP: Atlas Eólico de la Isla de la Juventud **(Soltura et al, 2004)**, ejecutado en el marco del proyecto internacional SWERA (Solar and Wind Energies Resources Assessment), que brindó como salida un mapa de potencial eólico a 50 metros para la Isla de la Juventud estimado a partir de una serie de cinco años de mediciones a 10 metros. Años después, como resultado del trabajo de un grupo multidisciplinario de diversas instituciones nacionales se publicó la primera edición del Mapa Eólico de Cuba a 50 metros de altura **(Soltura et al, 2009)**, en el cual se identifican zonas geográficas de excepcional potencial eólico, resultado que utilizó series largas de datos a 10 metros de las estaciones meteorológicas. Posteriormente, se elabora el Mapa de Potencial Eólico a 50 metros de altura de la Isla de la Juventud **(Soler et al, 2013)**, resultado obtenido a escala de detalle por un grupo de especialistas del territorio pinero, el cual indica valores de velocidad media anual del viento superiores a 6.4 m/s en las elevaciones del norte de la Isla, mientras que en áreas de paisajes llanos, correspondientes al cuadrante nordeste y a lo largo de una franja estrecha de la costa este, presenta valores de velocidad del viento superiores a 5.2 m/s. Actualmente se dispone además, de la versión web del Atlas Eólico de Cuba en el sitio del Instituto de Meteorología (INSMET), que contiene los mapas a 10, 30, 50 y 100 metros de altura **(Roque et al, 2014)**.

La Isla de la Juventud es la segunda en tamaño del archipiélago Cubano. Situada al sur de la región occidental de Cuba tiene una extensión territorial de 2 205 $km^2$ y está dividida en dos grandes zonas por la Ciénaga de Lanier: llanuras y alturas del norte, es la parte más antigua geológicamente, ocupa el 80.6 % del territorio y es donde se desarrollan la mayoría de las actividades económicas y están enclavados los mayores núcleos poblacionales; la llanura cársica del sur, porción del territorio pinero que se destaca por sus valores de la biodiversidad **(Colectivo de autores, 2002)**. Como territorio geográficamente separado de Cuba, la Isla de la Juventud no está conectada al Sistema Eléctrico Nacional, contando con su propio sistema de generación, transmisión y distribución de electricidad, lo que impone un continuo trasiego marítimo de combustible desde Cuba para garantizar el servicio eléctrico las 24 horas del día, provocando un incremento adicional a los costos de generación eléctrica **(Soler, Sánchez y Borrego, 2015)**. Esta situación ha impulsado a diversos actores políticos, científicos y empresariales a unir esfuerzos en el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía disponibles en este territorio.

Utilizando los registros de una red de prospección eólica instalada en el territorio fue caracterizada la velocidad media del viento y su densidad de potencia media anual en las localidades donde se ubicaron las estaciones anemométricas **(Soler, Sánchez y Borrego, 2015)**. Sin embargo, la evaluación del potencial eólico supone la determinación de los valores de la velocidad del viento en toda la geografía del territorio o región delimitada, lo que se obtiene mediante un proceso de cálculo llamado simulación **(Mortensen et al, 2007)**. Para satisfacer la demanda de información geográfica sobre las condiciones actuales del terreno se construyó el mapa combinado de las líneas de cambios de rugosidad y curvas de nivel del terreno de la Isla de la Juventud. Consideramos "condiciones del terreno" al conjunto de la superficie del terreno y los elementos dispuestos sobre ella, los cuales conducen a un retardo del viento cerca del suelo, provocando un efecto llamado rugosidad. Por ejemplo, la vegetación y las edificaciones son elementos de rugosidad, debido a que causan un incremento en la turbulencia del flujo de viento. La rugosidad de un área dada está determinada por el tamaño y distribución de los elementos que contiene. Por tal motivo, a cada tipo de terreno se le puede asociar una clase de rugosidad **(Mortensen et al, 2007)**.

En este trabajo las clases de rugosidad asociadas a cada tipo de terreno se obtuvieron a partir de la adecuación de la metodología propuesta para la descripción de la rugosidad en Cuba **(Niebla, Soltura y Roque, 2007)**, la cual constituye otro antecedente importante para este trabajo, permitiendo, sobre esa base científica, incorporar detalles referentes a los elementos que conforman la descripción de cada tipo de paisaje en las condiciones específicas de la Isla de la Juventud y su localización geográfica en el territorio.

Para lograr el objetivo de evaluar el potencial eólico a 20 metros de altura en la Isla de la Juventud, para su aprovechamiento en la obtención de energía eléctrica con baja potencia, fue empleado el modelo de micrometeorología WAsP (Wind Atlas Analisys and Application Program) , elaborado por el Laboratorio Nacional Riso de Dinamarca y con un amplio uso internacional.

## 2. Materiales y métodos

Se emplearon las series de dirección y velocidad del viento a 20 metros de altura, medidos cada 10 minutos en tres localidades de la Isla de la Juventud. Para demostrar la semejanza entre las series de datos se empleó el método de predicciones cruzadas, que puede obtenerse fácilmente con el WAsP, y consiste en utilizar el atlas de viento o la climatología generalizada de una estación, tomada ésta como estación de referencia o predictor, para predecir la velocidad media del viento y/o la densidad de potencia en otro sitio o estación cuyas condiciones climáticas y topográficas pueden ser similares o diferentes a las del sitio usado como predictor, pudiendo localizarse a distancias mayores a 10 km. Este último sitio es considerado el lugar predicho o predictando **(Soltura et al, 2004)**. La ventaja de este método es que estas predicciones son verificables contra el valor medido en la estación predicha.

El editor de mapas WAsP fue operado manteniendo los parámetros técnicos y utilizando los formatos de entradas y salidas que se describen a continuación: resolución de trabajo en la horizontal 2.0 m, en la vertical 0.01 m, en la longitud de rugosidad 0.00005 m y tamaño del píxel de las imágenes de satélites de 30 m. La unidad de longitud utilizada fue el metro (m) y la base cartográfica de los mapas digitales es a escala 1: 25 000. Los formatos de los ficheros de entrada fueron *.dxf y *.map. Los formatos de los ficheros de salida fueron *.map, *.emf y *.dxf. Como información de entrada al programa de cálculos WAsP se utilizaron las series de registros del viento, la información de obstáculos y el mapa combinado de cambios de rugosidad y de curvas de nivel. Se calculó la densidad de potencia media anual del viento a 20 metros de altura, para lo que se diseñó un arreglo de 48 rejillas de 10 x 10 km con 10 000 nodos cada una, lo que implica una resolución espacial de 100 metros. Aplicando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se logró el ensamblaje de las rejillas representativas de los tres mástiles para la confección del mapa de densidad de potencia media anual del viento en formato vectorial.

Se calculó el coeficiente de disponibilidad del viento (CDV) que es un indicador que combina el comportamiento de las velocidades del viento y la curva de potencia de un aerogenerador, concretamente, tiene en cuenta las velocidades de arranque y de parada de un aerogenerador **(Moreno, 2010)**.

Para estimar la producción anual de energía (PAE) fueron utilizados los datos técnicos y curvas de potencia de cuatro modelos de aerogeneradores comerciales de baja potencia seleccionados a partir de los disponibles en el mercado: tres de la marca Bornay (1.5, 3.0 y 6.0 kW) y uno Windspot (7.5 kW); a los que se le determinó el factor de capacidad (FC), índice definido por **Moreno (2009)** como la relación entre la energía generada por un aerogenerador durante un período dado y la que se hubiera producido si durante ese período si hubiese estado funcionando continuamente a potencia nominal.

## 3. Discusión de resultados

### Predicciones cruzadas entre estaciones

Se emplearon las series de datos registrados a 20 metros de altura cada 10 minutos en tres localidades de la Isla de la Juventud, las que se normalizaron a una longitud temporal de 365 días (52 560 registros en cada uno de los mástiles). El 100 % de las mediciones de velocidades medias registradas, transmitidas y almacenadas fue gestionada en la base de datos estructurada en Microsoft Access (Eólica IJ versión 2.07) que contiene una tabla con todos los casos arreglados en campos definidos a partir de los ficheros originales *.csv, brindando salidas como: consultas tabuladas, gráficos dinámicos, e informes del comportamiento de la velocidad y dirección del viento. Una caracterización que contiene los estadísticos descriptivos, el coeficiente de determinación, el comportamiento anual, el ciclo diario, la rosa de los vientos, la intensidad media de la turbulencia y un ajuste de la distribución de frecuencias con la función de Weibull fue publicada por **Soler, Sánchez y Borrego (2015)**.

Cada una de las estaciones de la red de prospección eólica local es representativa de una región climática determinada dentro del territorio. Por lo que para enfrentar la construcción de un mapa que exprese la distribución

espacial de una variable, en este caso la densidad de potencia media anual del viento, sobre todo el territorio, las series temporales de datos deben tener cierto grado de semejanza.

Se presentan las predicciones cruzadas y autopredicciones, de la velocidad media del viento y la densidad de potencia media realizadas entre estaciones anemométricas **(Tabla I)**. También se muestra el valor real medido en cada estación y las desviaciones de la velocidad media del viento pronosticada entre la velocidad medida en por ciento. Además, informa el valor de longitud de rugosidad ($L_o$) estimado para cada estación.

Los cálculos demuestran que la mayor desviación porcentual de los pronósticos de velocidad del viento alcanza 10.9 %, obtenida entre las estaciones de Columbia y San Pedro, que están separadas a una distancia de 26 kilómetros y son representativas de dos regiones climáticas bien diferentes, costa e interior respectivamente. Mientras, el valor de la desviación porcentual promedio de todas las predicciones cruzadas es de 5 %. Lo anterior puede entenderse como que las series de datos que utilizaremos en los cálculos de densidad de potencia del viento son semejantes.

**Tabla I.** Valores obtenidos con las predicciones cruzadas entre mástiles.

| **Estaciones pronosticadas** | **Magnitudes pronosticadas** | **Estaciones predictoras** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Desviación de la velocidad** | **CB** | **SP** | **LD** | **Valor medido** | **Longitud de rugosidad** |
| Columbia (CB) | Velocidad media (m/s) | 3.73 | 3.42 | 3.61 | 3.8 | 0.25 |
| | Densidad de Potencia (W/m$^2$) | 56 | 45 | 53 | 59 | |
| | Desviación de la velocidad pronosticada/medida (%) | -1.8 | -10.0 | -5.0 | | |
| San Pedro (SP) | Velocidad media (m/s) | 3.78 | 3.44 | 3.68 | 3.41 | 0.40 |
| | Densidad de Potencia (W/m$^2$) | 58 | 47 | 56 | 45 | |
| | Desviación de la velocidad pronosticada/medida (%) | 10.9 | 0.9 | 7.9 | | |
| La Demajagua (LD) | Velocidad media (m/s) | 3.89 | 3.57 | 3.74 | 3.73 | 0.25 |
| | Densidad de Potencia (W/m$^2$) | 65 | 52 | 60 | 59 | |
| | Desviación de la velocidad pronosticada/medida (%) | 4.3 | -4.3 | 0.3 | | |

**Determinación de obstáculos**

El efecto de refugio de los obstáculos puede ser identificado y sus características obtenidas de un mapa detallado, fotografía aérea y/o durante una visita al sitio. La posición de un obstáculo se especifica en un sistema local de coordenadas polares. Los obstáculos son únicamente los que se especifican para el sitio de interés, no estando vinculados directamente con el mapa del terreno.

El programa WAsP proporciona el siguiente criterio guía para decidir si un elemento del terreno debe incluirse como obstáculo o quedar formando parte de la rugosidad **(Mortensen et al, 2007)**:

- Si el punto de interés (estación anemométrica) está a menos de 50 veces la altura del obstáculo y más bajo que tres veces la altura del obstáculo sobre el suelo, probablemente, el objeto deba ser incluido como un obstáculo. En este caso, el obstáculo no debe, al mismo tiempo ser considerado como un elemento de rugosidad.
- Si el punto de interés está más lejos que 50 veces la altura del obstáculo o una altura superior a tres obstáculos, el objeto muy probablemente debe ser incluido en la descripción de rugosidad.

Para la determinación de los obstáculos respecto a las mediciones a 20 m de altura se aplicó el criterio guía descrito anteriormente en esta sección durante las visitas realizadas a las estaciones anemométricas, tabulando y analizando las magnitudes descritas a continuación:

$A_1$: Ángulo respecto al norte de la primera esquina [º].
$R_1$: Distancia a la primera esquina [m].
$A_2$: Ángulo respecto al norte de la segunda esquina [º].
$R_2$: Distancia a la segunda esquina [m].
h: Altura del obstáculo [m].
d: Ancho del obstáculo [m].
P: Porosidad estimada.

Los valores de estas magnitudes medidos para cada uno de los elementos de rugosidad del terreno identificados en las cercanías de los mástiles se relacionan para Columbia, San Pedro y La Demajagua **(Tabla II)**. Para la variable Porosidad se utilizaron sus valores característicos (fracción 0 a 1) descritos por **Mortensen et al (2007)**.

**Tabla II.** Elementos analizados como posibles obstáculos en cada mástil.

| **Mástil** | **No** | **$A_1$** | **$R_1$** | **$A_2$** | **$R_2$** | **h** | **d** | **P** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Columbia | 1 | 135 | 300 | 248 | 542 | 8 | 300 | 0.5 |
| San Pedro | 1 | 337 | 134 | 340 | 131 | 2.8 | 10 | 0 |
| | 2 | 342 | 129 | 345 | 127 | 3.3 | 10 | 0 |
| | 3 | 31 | 133 | 34 | 138 | 4.6 | 11 | 0 |
| | 4 | 47 | 207 | 49 | 214 | 2.5 | 6 | 0 |
| | 5 | 49 | 204 | 52 | 209 | 2.3 | 4 | 0 |
| | 6 | 54 | 211 | 56 | 221 | 4.5 | 18 | 0 |
| | 7 | 66 | 160 | 69 | 156 | 3.5 | 8 | 0 |
| | 8 | 72 | 175 | 75 | 171 | 3.2 | 8 | 0 |
| La Demajagua | 1 | 316 | 160 | 322 | 176 | 3.6 | 21 | 0 |
| | 2 | 310 | 105 | 320 | 121 | 3.3 | 16 | 0 |
| | 3 | 294 | 107 | 305 | 114 | 2.9 | 10 | 0 |
| | 4 | 285 | 122 | 288 | 124 | 2.9 | 11 | 0 |
| | 5 | 287 | 147 | 292 | 151 | 2.5 | 14 | 0 |
| | 6 | 296 | 190 | 298 | 196 | 2.5 | 8 | 0 |
| | 7 | 53 | 122 | 55 | 125 | 2.3 | 11 | 0 |

Se determinó que el bosque de eucaliptos con alrededor de 8 metros de altura, localizado unos 200 metros al sur del mástil de Columbia, constituye el único obstáculo de todos los elementos analizados para las mediciones a 20 metros de altura. Por lo que fue caracterizado e introducido al WAsP **(Fig. 1)**. Mientras los restantes elementos analizados quedan formando parte del fondo de rugosidad.

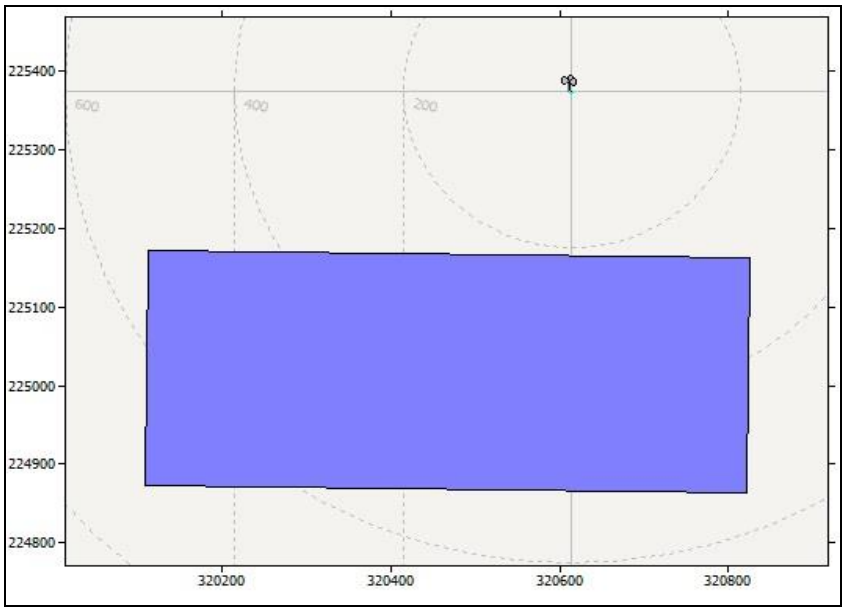



**Fig. 1.** Localización geográfica del obstáculo determinado en Columbia

**Construcción del mapa de potencial eólico**

Para determinar la densidad de potencia media anual del viento se programaron en el WAsP tres proyectos de cálculos con 48 rejillas cada uno, las que abarcan en conjunto el área de la Isla de la Juventud y parte de sus mares adyacentes, ya que según las recomendaciones de **Mortensen et al (2007)** las zonas de interés deben quedar a más de 5 km de distancia del borde del dominio de cálculo. Utilizando como información de entrada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) los ficheros *.grd que constituyen salidas del WAsP con los resultados del cálculo de la distribución espacial de la densidad de potencia media anual se elaboró el Mapa de Potencial Eólico a 20 metros de altura de la Isla de la Juventud, en formato vectorial con base cartográfica 1:25 000 **(Fig. 2)**. La graduación de clases de energía utilizada para la confección del mapa fue elaborada tomando en cuenta las clases de energía del viento propuesta por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en su Nota Técnica No. 175 de 1981, citada por **Roque, Niebla y Reyes (2010)**, lo que permite las comparaciones del resultado obtenido en este estudio con cualquier otra investigación realizada a 20 m de altura bajo esa clasificación internacional.

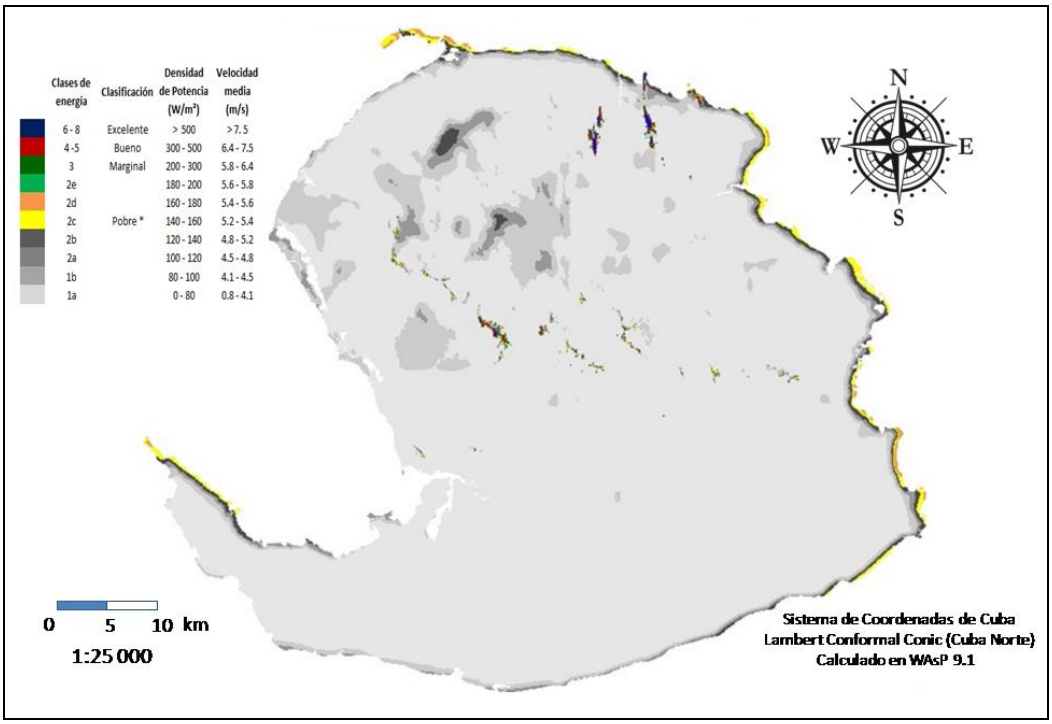



**Fig. 2.** Mapa de Potencial Eólico a 20 metros de altura de la Isla de la Juventud

El resultado obtenido muestra que los máximos de potencial del viento están localizados en tres regiones: las elevaciones del centro-norte de la Isla con potencial clasificado de Bueno (más de 300 W/m$^2$), una estrecha franja costera del norte y el este, así como un segmento del litoral norte en Punta Francés con la categoría de potencial Pobre (80 a 180 W/m$^2$) y un grupo de áreas dispersas localizadas en paisaje llano sobre el interior de la mitad norte de la Isla, con potencial Pobre (80 a 140 W/m$^2$). En el resto del territorio predomina la clasificación energética Pobre (< 80 W/m$^2$), localizándose los mínimos en zonas llanas cercanas a las elevaciones y en el extremo suroeste de la llanura Sur. La regionalización de los máximos de potencial del viento descrita anteriormente es similar a la obtenida en los antecedentes **(Soltura et al, 2004; Soltura et al, 2009 y Soler et al, 2013)** para 50 metros de altura; sin embargo, dada su cercanía a la superficie terrestre, en la distribución espacial de la densidad de potencia del viento a 20 metros es evidente una marcada dependencia de los máximos del interior de la Isla respecto a los cambios de rugosidad del terreno, los que se asocian principalmente al efecto acelerador de: las colinas, considerado en el modelo orográfico del WAsP; y de los embalses, estos últimos clasificados como superficies homogéneas con el valor mínimo de rugosidad.

## Identificación detallada de zonas promisorias

Teniendo en cuenta la distribución espacial de los valores de potencial eólico obtenidos a 20 metros de altura, los resultados de investigaciones anteriores **Soltura et al (2004)** y **Soler et al (2013)** que estudiaron las elevaciones del norte y la franja costera en forma detallada respectivamente, la localización de los principales núcleos poblacionales y de la mayoría de las actividades agropecuarias se decidió esta vez profundizar en el estudio del interior de la Isla.

**Tabla III.** Características de las zonas promisorias identificadas en paisaje llano sobre el interior de la Isla.

| No | Nombres de las zonas promisorias identificadas | Coordenadas (X, Y) de un sitio significativo en el área | | Región de la Isla donde se localiza el área identificada | Velocidad media anual del viento (m/s) | Densidad de potencia media anual ($W/m^2$) | Área ($km^2$) | Altura sobre el nivel medio del mar (m) | Distancia mínima aproximada a la costa y el rumbo especifico (km) | Recorrido libre máximo del viento predominante sobre el embalse especificando el rumbo (km) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Coordenada X (m) | Coordenada Y (m) | | | | | | | |
| 1 | Aeropuerto-Embalse La Guanabana | 315331 | 225653 | Nordeste | 4.1-4.5 | 80-100 | 2.39 | 13-22 | 6/NE | 0.9/NE |
| 2 | El Cantío | 314415 | 216450 | Centro-norte | 4.1-4.5 | 80-100 | 3.09 | 28-35 | 12/NE | 1.5/NE |
| 3 | El Guayabo | 324878 | 216300 | Este | 4.1-4.5 | 80-100 | 1.75 | 10-28 | 4/NNE | - |
| 4 | Embalse Casas II | 310171 | 223278 | Nordeste | 4.1-4.5 | 80-100 | 0.61 | 18-25 | 10/NNE | 1.2/ENE |
| 5 | Embalse Del Medio-Las Nuevas | 298322 | 225909 | Centro-norte | 4.1-4.5 | 80-100 | 9.46 | 5-20 | 7/NW | 6.6/NE |
| | | | | | 4.5-4.8 | 100-120 | 2.95 | 10-15 | 7/NW | 6.6/NE |
| | | | | | 4.8-5.2 | 120-140 | 0.6 | 13-15 | 6/NW | 6.1/NE |
| 6 | Embalse La Fe | 316851 | 217076 | Centro-este | 4.1-4.5 | 80-100 | 0.52 | 18-22 | 10/ENE | 1.7/ENE |
| 7 | Embalse Mal País I | 313575 | 218666 | Centro-este | 4.1-4.5 | 80-100 | 0.9 | 25-32 | 12/ENE | 1.2/ENE |
| 8 | Embalse Mal País II | 317886 | 221816 | Centro-este | 4.1-4.5 | 80-100 | 0.48 | 10-15 | 7/ENE | 1/E |
| 9 | Embalses Viet-Nam Heroico y El Enlace | 303403 | 220457 | Centro | 4.1-4.5 | 80-100 | 29.29 | 20-25 | 16/N | 4/NE |
| | | | | | 4.5-4.8 | 100-120 | 4.21 | 20-25 | 16/N | 3/NE |
| | | | | | 4.8-5.2 | 120-140 | 0.28 | 20-25 | 14/N | 3/E |
| 10 | ESBEC 15 | 309223 | 216571 | Centro | 4.1-4.5 | 80-100 | 1.13 | 43-60 | 17/ENE | - |
| 11 | Granja Patria | 307271 | 223146 | Centro-norte | 4.5-4.8 | 100-120 | 0.57 | 38-45 | 12/N | - |
| 12 | La arenera Buenavista | 288865 | 221591 | Extremo oeste | 4.1-4.5 | 80-100 | 16.04 | 0-10 | 4/NW | - |
| 13 | Mina de Oro | 290985 | 216049 | Oeste | 4.1-4.5 | 80-100 | 3.66 | 8-25 | 4/SW | - |
| 14 | Embalse Los Indios | 296662 | 212232 | Oeste | 4.1-4.5 | 80-100 | 19.24 | 3-32 | 6/SW | 1.8/NE |
| | | | | | 4.5-4.8 | 100-120 | 0.22 | 20-25 | 7/SW | 1.4/NE |
| 15 | Embalse Cristal | 295095 | 220605 | Oeste | 4.1-4.5 | 80-100 | 13.53 | 8-60 | 7/NW | 1.8/NE |
| | | 295521 | 219991 | | 4.5-4.8 | 100-120 | 3.19 | 30-50 | 10/NW | 1.9/NE |
| 16 | Rancho Paraíso | 316143 | 210928 | Centro-este | 4.1-4.5 | 80-100 | 1.05 | 40-60 | 14/NE | 0.9/E |

En general las zonas promisorias identificadas en paisaje llano sobre el interior de la Isla **(Tabla III)** están caracterizadas por densidades de potencias entre 80 y 140 $W/m^2$ y abarcan una superficie de 117 $km^2$, fueron localizadas principalmente en zonas próximas al litoral oeste de los embalses, debido al predominio de los vientos de región este, y en cotas altas de la región central.

**Estimación de la producción anual de energía**

De las 16 zonas identificadas fueron seleccionadas tres zonas promisorias **(Fig. 3)** para la estimación de la producción anual de energía, localizadas en paisaje llano sobre el interior de la Isla con potencial eólico aprovechable a 20 metros de altura dentro de la clasificación "Pobre", dos en el rango de 120 a 140 W/m$^2$ y una entre 100 y 120 W/m$^2$ que se describen a continuación:

Zona No 5 (x=298322, Y=225909): adyacente al oeste del embalse Del Medio - Las Nuevas, se localiza a 6 km de la costa noroeste con una altura sobre el nivel del mar entre 13 y 17 m. El valor de potencia media anual estimado está entre 120 y 140 W/m$^2$ en alrededor de 0.60 km$^2$, localizado en el extremo oeste del embalse Del Medio - Las Nuevas, que permite un recorrido libre del viento de hasta 6.1 km a los vientos predominantes del nordeste.

Zona No 9 (x=303403, y=220457): adyacente al oeste del embalse Viet - Nam Heroico, se localiza a unos 14 km de la costa norte, casi en el centro de la Isla de la Juventud, donde la altura sobre el nivel del mar oscila entre 20 y 25 m. El valor de potencia media anual estimado está entre 120 y 140 W/m$^2$ en alrededor de 0.28 km$^2$, localizado al oeste del embalse Viet - Nam Heroico, que permite un recorrido libre del viento predominante del este de hasta 3 km de distancia.

Zona No 11(x=307271, y=223146): zona alta perteneciente a la Granja Patria, localizada al nordeste de la ESBEC # 44 Rodolfo Carballosa a unos 12 km de la costa norte y con una altura sobre el nivel del mar entre 38 y 45 m. El valor de potencia media anual estimado está entre 100 y 120 W/m$^2$ en un área de alrededor de 0.57 km$^2$.

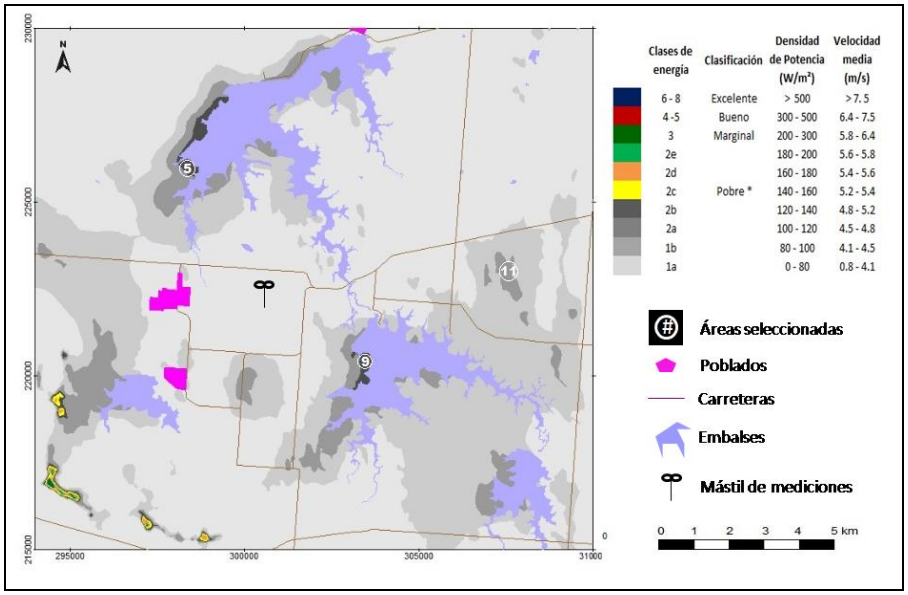



**Fig. 3.** Ampliación sobre el centro – oeste de la Isla de la Juventud en el mapa de potencial eólico a 20 metros de altura con la localización de las tres zonas promisorias seleccionadas

A partir de la serie de datos registrados por el mástil localizado en La Demajagua y mediante un proceso de simulación realizado con el programa WAsP, se determinaron los valores de frecuencias medias para cada clase de velocidad del viento, expresadas en cantidad de horas anuales, con las que se determinó el coeficiente de disponibilidad del viento en cada zona **(Tabla IV)**, correspondiendo el valor máximo a Viet - Nam Heroico con 70.3 % para velocidades superiores a 3 m/s.

**Tabla IV.** Coeficiente de disponibilidad del viento a 20 metros de altura.

| Disponibilidad del Viento | Unidad | Mástil | Zonas promisorias | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | La Demajagua | No 11 | No 9 | No 5 |
| Suma anual de cantidad de horas ≥ 3 m/s | horas | 6169 | 5957 | 6158 | 6124 |
| Coeficiente disponibilidad del viento | % | 70.5 | 68.0 | 70.3 | 69.9 |

Con las distribuciones de frecuencias de la velocidad del viento se construyeron las curvas de duración anual de velocidades para cada zona seleccionada **(Fig. 4)**, donde el área bajo cada curva debe entenderse como la cantidad de horas que la turbina trabajaría con cada valor de velocidad de viento al año. Es decir, mientras más tiempo (horas) bajo la línea correspondan a valores mayores de velocidad, mayor potencia del viento habrá disponible en ese sitio para la generación de electricidad. En este caso, para velocidades mayores a 7 m/s las frecuencias más altas se obtuvieron en la zona No 9 (oeste del embalse Viet - Nam Heroico), mientras que, las frecuencias más bajas corresponden al área No 11 (Granja Patria). Este comportamiento se invierte para velocidades entre 1 y 6 m/s.

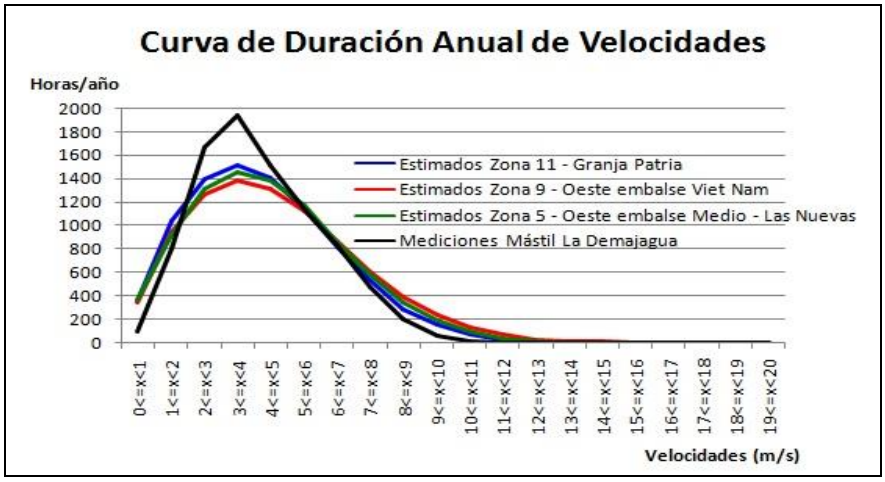



**Fig. 4.** Curvas de duración anual de velocidades del viento a 20 metros de altura

La revisión bibliográfica de características técnicas y sus curvas de potencia brindadas por los fabricantes permitió seleccionar cuatro modelos de pequeños aerogeneradores disponibles en el mercado: tres de la marca Bornay (1.5, 3.0 y 6.0 kW) y uno Windspot (7.5 kW), cuyos datos se relacionan **(Tabla V)** con sus correspondientes curvas de potencia **(Fig. 5)**.

**Tabla V.** Datos técnicos de los modelos de aerogeneradores de pequeña potencia empleados.

| Elementos de funcionamiento | Unidad | Datos | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Modelo del aerogenerador | - | Bornay | | | Windspot |
| Potencia nominal | kW | 1.5 | 3.0 | 6.0 | 7.5 |
| Número de hélices | U | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Diámetro del área de barrido | m | 2.86 | 4 | 4 | 6.3 |
| Velocidad de arranque | m/s | 3.5 | | | 3 |
| Velocidad de potencia nominal | | 12 | | | |
| Velocidad de freno automático | | 14 | | | |

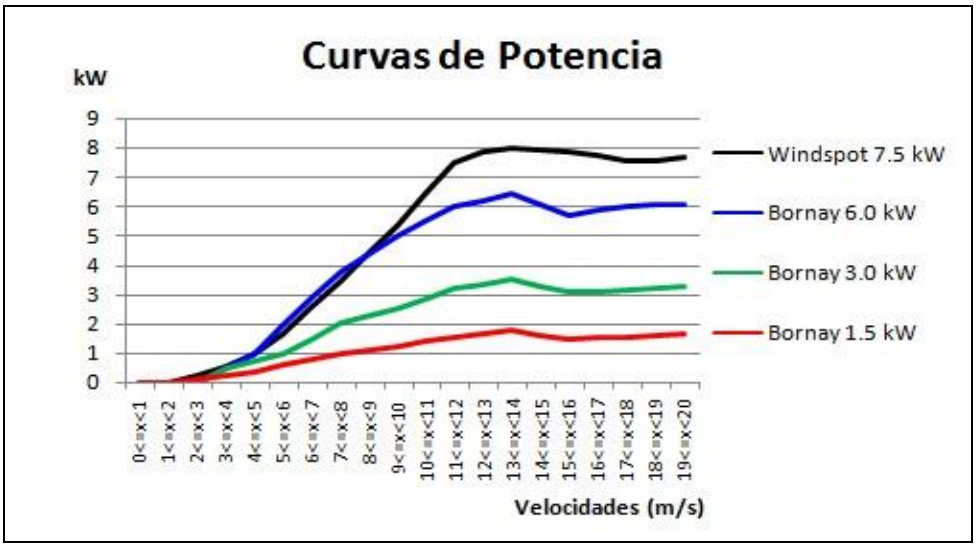



**Fig. 5.** Curvas de potencia de cada modelo de aerogenerador brindadas por los fabricantes

Utilizando la curva de duración anual de velocidades del viento en el sitio y la curva de potencia del aerogenerador se calculó la potencia media, el factor de capacidad y la producción anual de energía generada por cada uno de los modelos de aerogeneradores, simulando su emplazamiento en las zonas promisorias seleccionadas **(Tabla VI)**. Como resultado se obtuvo que de las tres zonas seleccionadas en paisaje llano sobre el interior de la Isla con potencial eólico aprovechable a 20 metros de altura, las mejores condiciones para la generación de electricidad con aerogeneradores de pequeña potencia se encuentran en la zona No 9, oeste del embalse Viet - Nam Heroico, seguido del sitio localizado en la zona No 5, oeste del embalse Del Medio - Las Nuevas, y en tercer lugar la No 11 en terreno perteneciente a la Granja Patria.

**Tabla VI.** Parámetros energéticos estimados en las zonas promisorias seleccionadas con cada modelo de aerogenerador de pequeña potencia.

| **Aerogenerador** | **Parámetros energéticos estimados** | **Unidad** | **Zonas promisorias** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | **No 11** | **No 9** | **No 5** |
| Bornay 1.5 kW | Producción Anual de Energía | kWh/a | 3 618.0 | 4 061.9 | 3 848.8 |
| | Potencia media | kW/h | 0.4 | 0.5 | 0.4 |
| | Factor de Capacidad | % | 27.5 | 30.0 | 29.3 |
| Bornay 3.0 kW | Producción Anual de Energía | kWh/a | 6 594.7 | 7 521.0 | 7 070.0 |
| | Potencia media | kW/h | 0.7 | 0.9 | 0.8 |
| | Factor de Capacidad | % | 25.1 | 28.6 | 26.9 |
| Bornay 6.0 kW | Producción Anual de Energía | kWh/a | 11 486.8 | 13 389.1 | 12 450.2 |
| | Potencia media | kW/h | 1.3 | 1.5 | 1.4 |
| | Factor de Capacidad | % | 21.9 | 25.5 | 23.7 |
| Windspot 7.5 kW | Producción Anual de Energía | kWh/a | 11 371.9 | 13 408.3 | 12 340.5 |
| | Potencia media | kW/h | 1.3 | 1.5 | 1.4 |
| | Factor de Capacidad | % | 17.3 | 20.4 | 18.8 |

Los valores máximos del factor de capacidad obtenidos fueron de 30.0, 29.3 y 27.5 %, en las zonas No 9, 5 y 11 respectivamente, es decir, que la mejor relación entre la energía generada y la que se hubiera producido durante el año de estudio si hubiese estado funcionando el aerogenerador continuamente a potencia nominal fue lograda en las tres zonas con la máquina Bornay 1.5 kW, la de menor potencia nominal de las empleadas en la simulación. Teniendo en cuenta lo anterior, se elaboraron gráficos que relacionan la curva de distribución de frecuencias de la velocidad del viento con la curva de potencia del aerogenerador, para la producción anual de energía estimada en cada zona seleccionada, correspondiendo el mejor acoplamiento a la zona No 9 con el aerogenerador Bornay 1.5 kW **(Fig. 6)**.

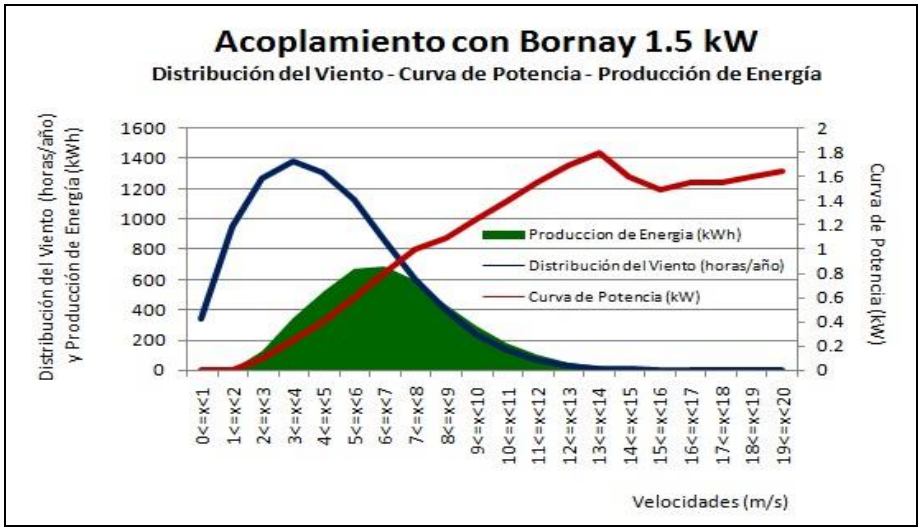



**Fig. 6.** Acoplamiento entre la curva de distribución de frecuencias de la velocidad del viento (línea azul) y la curva de potencia del aerogenerador modelo Bornay 1.5 kW (línea roja) para la producción anual de energía estimada (área verde) en la zona promisoria No 9, localizada al oeste del Embalse Viet - Nam Heroico

En general para las tres zonas promisorias se obtuvo similar resultado, el mejor acoplamiento con el modelo de menor potencia (Bornay 1.5 kW) y el peor acoplamiento con la máquina de mayor potencia (Windspot 7.5 kW). Esta tendencia está determinada por los valores de la velocidad media del viento y sus distribuciones de frecuencias estimados en las zonas estudiadas. Por lo que sugerimos tenerla en cuenta al seleccionar modelos de pequeños aerogeneradores para la generación de energía eléctrica a pequeña escala en la Isla de la Juventud, pues en cierto modo **(Windpower, 2003)**, existe la posibilidad de obtener una producción de potencia relativamente estable con un alto factor de capacidad, o bien una alta producción de energía (que fluctuará) con un bajo factor de capacidad.

## Conclusiones

Se demostró la semejanza de las series de datos de velocidad media del viento con un valor de 5 % para la desviación porcentual promedio de todas las predicciones cruzadas y autopredicciones realizadas.

Fue determinado el único elemento de rugosidad que clasifica como obstáculo al viento para las mediciones a 20 metros de altura en las cercanías del mástil anemométrico de Columbia.

Se construyó el Mapa de Potencial Eólico a 20 metros de altura de la Isla de la Juventud, que presenta la distribución espacial de la densidad de potencia media anual del viento, con los valores máximos localizados en tres regiones: las elevaciones del centro-norte de la Isla con potencial clasificado de Bueno (más de 300 W/m$^2$), una estrecha franja costera del norte y el este, así como un segmento del litoral norte en Punta Francés con la categoría de potencial Pobre (80 a 180 W/m$^2$) y un grupo de áreas dispersas localizadas en paisaje llano sobre el interior de la mitad norte de la Isla con potencial Pobre (80 a 140 W/m$^2$). En el resto del territorio predomina la clasificación

energética Pobre (< 80 W/m$^2$), localizándose los mínimos en zonas llanas cercanas a las elevaciones y en el extremo suroeste de la llanura Sur.

Fueron identificadas las zonas promisorias para el aprovechamiento del potencial eólico en la obtención de energía eléctrica con baja potencia. De ellas fueron seleccionadas tres en paisaje llano sobre el interior del territorio con potencial aprovechable dentro de la clasificación Pobre a 20 metros de altura, dos en el rango de 120 a 140 W/m$^2$ y una entre 100 y 120 W/m$^2$.

Se estimó la producción anual de energía y otros parámetros energéticos en las tres zonas seleccionadas en el interior de la Isla, determinándose que las mejores condiciones para la generación de electricidad con pequeña potencia a 20 metros de altura se encuentran en la zona No 9 al oeste del embalse Viet - Nam Heroico, seguida por la No 5 al oeste del embalse Del Medio - Las Nuevas y en tercer lugar la No 11 en la Granja Patria.

**Recomendación**

Incorporar los resultados de este estudio a la información disponible para consultar por los tomadores de decisiones, en cuanto a la ampliación de capacidades de generación eléctrica con pequeña potencia a partir de fuentes renovables de energía en la Isla de la Juventud.

**Referencias**

Boytel, F. 1972**.** Geografía Eólica de Oriente. Ed. Ciencia y Técnica, Instituto de Planificación Física, Santiago de Cuba, Cuba. 251 pp.

Carnesoltas, M. 1986**.** La circulación local de la brisa en Cuba. Tesis presentada en opción al grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias Físico – Matemáticas. Instituto de Meteorología. La Habana. 96 pp.

Colectivo de autores 2002**.** Monografía Pinera: La Colonia, La Neocolonia y la Revolución en el poder. [digital]. CMP IJ. Isla de la Juventud.

Fernández, A. J. y C. Pazos 1998**.** *Pronóstico trihorario del viento en la provincia de Ciego de Ávila*. Editorial Academia, La Habana. 33 pp.

Lecha, E. L., L. Paz, B. Lapinel 1994**.** *El clima de Cuba*. Editorial Academia. La Habana. 186 pp.

León D. y L. Álvarez 2011**.** Estudio de la marcha interanual del viento con vista a la prospección eólica en tres lugares diferentes de Cuba. VI Congreso Cubana de Meteorología. La Habana. 17 pp.

Niebla, Y., R. Soltura y A. Roque 2007. Propuesta de una metodología para la descripción de la rugosidad en Cuba. [online]. Disponible en: *http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar27/HTML/articulo02.htm* [Consulta: 22 marzo 2012].

Mortensen, N., D. Heathfield, L. Millerup, L. Landberg y O. Rathmann 2007**.** Wind Atlas Analisys and Application Program: WAsP 9 Help Facility. Riso National Laboratory, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark. 353 topics. ISBN 978-87-550-3607-9.

Moreno, C. 2009**.** ¿Qué es el factor de capacidad?. Disponible en: *http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia48/HTML/articulo03.htm* [Consulta: 15 abril 2014].

Moreno, C. 2010**.** Indicadores de funcionamiento de un aerogenerador. Disponible en: *http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia49/HTML/Articulo04.htm* [Consulta: 15 abril 2014].

Rego, J. S. 1989**.** *Nuevo Atlas Nacional de Cuba. Mapas de campo de presión y viento para enero y julio*. Edit. Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba - Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía. RHEA, Consultores S.A., España. VI.2.3 pp.

Rivero, R. 2001**.** "Influencia del viento durante la temporada seca del año en la Isla de la Juventud". Informe de Resultado. Unidad de Ciencia y Tecnología, Delegación CITMA, Isla de la Juventud.

Rodríguez, D., M. Carrasco, A. Roque 2011**.** Representación espacial del potencial eólico en el municipio Los Palacios. VI Congreso Cubana de Meteorología. La Habana. 14 pp.

Roque, A., Y. Niebla y P. Reyes 2010. Perfil vertical del viento sobre Cuba en los primeros 100 m de altura sobre la superficie. Su importancia en la toma de decisión de los emplazamientos eólicos. VI Congreso de Meteorología. La Habana.

Roque, A., Y Wei, Y Alonso, A. Calzadilla, I. Borrajero, A. Bezanilla, O. González, Y. Martinez y L. Chardon 2014**.** *Atlas Eólico de Cuba*, Informe Científico Técnico, Instituto de Meteorología, La Habana. 48 pp.

Rubiera, J. y M. Ramírez 1978**.** "Estudio estadístico del viento nocturno en Nueva Gerona, Isla de Pinos, durante los meses de noviembre a abril". CMITIJ. Nueva Gerona, Isla de la Juventud.

Soler, E., A. Cardoso, I. Arencibia, Y. Cardero, y N. Campanioni 2010**.** Estudio del Viento Trihorario en la Temporada Lluviosa. Rev. Isla, Ciencia y Tecnología [en línea]. Año VII, Vol. 1, No 1, enero - abril 2010. 5 pp. ISSN 1813-6141. Disponible en: *http://www.gerona.inf.cu/modules.php?name=revista*

Soler, E., R. Rivero, Y. Rosales y J. Izquierdo 2013**.** Estudio de prospección eólica con fines energéticos en la Isla de la Juventud. *Rev. Eco Solar* [en línea], Vol. 44, art. 02, abril – junio 2013. 7 pp. Disponible en: *http://www.cubasolar.cu/Biblioteca/ecosolar/revista44*

Soler, E., L. Sánchez y R. Borrego 2015**.** Caracterización del viento para evaluar su potencial energético en la Isla de la Juventud. Rev. Ciencias de la Tierra y el Espacio, julio-diciembre, 2015, Vol.16, No.2, pp.164-175, ISSN 1729-3790164. Disponible en: *http://www.iga.cu/publicaciones/revista/assets/04.caracterizacion-viento.i.j.pdf*

Soltura, R., R. J. Vázquez, S. I. Mon y G. Rodríguez 2002. Aplicaciones del bombeo eólico a la ganadería en Cuba. Anais de Congressos Brasileiros de Meteorología 1980–2006 [en línea]. 5 pp. Disponible en: *http://www.cbmet.com/cbm-files/13-b952196203bc4efe537bce7007de146a.pdf.* [Consulta: 19 junio 2013].

Soltura, R., G. Martín, J. C. Díaz, G. Rodríguez, L. Ayala, R. Vázquez, R. Rivero 2004. Evaluación del potencial eólico en Cuba. Aplicaciones del WASP: Atlas Eólico de la Isla de la Juventud. INSMET. La Habana, 36 pp.

Soltura, R., A. Roque, I. Rivero, A. Wallo, R. Báez, R. Vázquez, R. Rivero, L. Ayala, G. Rodríguez, H. Carrasco, A. Curbelo, A. González, O. Herrera, G. Martín y J. C. Díaz 2009. Primera edición del Mapa de Potencial Eólico de Cuba. *Rev. Eco Solar* [en línea], Vol. 21, art. 06, julio - septiembre 2007. 18 pp. Disponible en: *http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar21/HTML/articulo06.htm* [Consulta: 24 junio 2014].

Windpower 2003**.** Asociación Danesa de la Industria Eólica. Visita Guiada. Disponible en: *http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/index.htm* [Consulta: 11septiembre 2014].

**Acerca de los autores**:

**Edgardo Soler Torres:** Graduado de Licenciatura en Física en la Universidad de Oriente en 1993, es Master en Ciencias y Profesor Instructor. Cuenta con más de 20 años de experiencia en la actividad científica. Ha dirigido proyectos de investigación en ciencias meteorológicas aplicados en la vida económica y social de la Isla de la Juventud, con resultados publicados. Como Especialista en Meteorología del Grupo de Pronósticos del Tiempo destaca su contribución al estudio de los huracanes que afectaron el territorio pinero, así como a los peligros, vulnerabilidades y riesgos para la protección de la población y la economía. Dirigió el Estudio de Potencial Eólico.

**Reinier Borrego Díaz:** Graduado en el año 2006 de Licenciatura en Geografía. Inicia su vida laboral en la Dirección Municipal de Planificación Física asumiendo la tarea de determinar la vulnerabilidad del fondo habitacional en el Municipio, para estimar el riesgo de desastre por afectación de huracanes intensos y sobre elevación del nivel del mar asociado al Cambio Climático. En 2011 ingresó al Servicio Meteorológico Nacional como Especialista en Meteorología del Grupo de Pronósticos del Tiempo en la Isla de la Juventud, donde ha contribuido al Estudio de Potencial Eólico mediante los análisis espaciales en un Sistema de Información Geográfica.

**Luis Manuel Sánchez Suárez:** Graduado en el año 1994 de Licenciatura en Educación, en la especialidad de Física y Astronomía. Ingresó al Servicio Meteorológico Nacional en el año 2000. Ha investigado sobre la influencia de las condiciones meteorológicas locales en las infecciones respiratorias agudas y ha desarrollado un meritorio trabajo en la implementación de servicios especializados como el pronóstico hidrometeorológico para el transporte marítimo en el golfo de Batabanó y el pronóstico de viento para diversas aplicaciones. Actualmente es el Especialista Principal del Grupo de Pronósticos del Tiempo y se responsabilizó con el análisis de los datos en el Estudio de Potencial Eólico.