



## TRABAJO TEÓRICO EXPERIMENTAL

# Modelo eolo-energético de la región Playa La Vaca usando estimadores multivariados

## *Wind energy model of the Playa La Vaca region using multivariate estimators*

Eduardo-Terrero Matos<sup>1\*</sup>, Conrado-Moreno Figueredo<sup>2</sup>, Yoalby-Retirado Mediaceja<sup>1</sup>, Arístides Alejandro-Legrá Lobaina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Moa Antonio Núñez Jiménez, Holguín, Cuba.

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, Ciudad Habana, Cuba

\*Autor de correspondencia: [eterrero@ismm.edu.cu](mailto:eterrero@ismm.edu.cu)

Recibido: 2 de julio de 2020

Aprobado: 22 de octubre de 2020

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional 

### RESUMEN/ABSTRACT

A partir de un conjunto de mediciones numéricas de la velocidad  $V$  y de la dirección  $E$  del viento fueron establecidas las definiciones básicas para obtener el modelo eolo-energético en una región geográfica promisoría utilizando los estimadores  $(A, U, \Theta)$  sobre los parámetros  $K$  y  $C$  de una Distribución de Weibull. Basado en un enfoque de optimización combinatoria y usando el Método de Búsqueda Exhaustiva, queda descrito un procedimiento matemático para obtener los parámetros de configuración del estimador lineal UPD con deriva, tal que se obtengan los modelos con menor promedio de los errores de estimación. Los resultados conceptuales y algorítmicos descritos se han aplicado a la región Playa La Vaca de Moa, Holguín, para obtener información satisfactoria sobre su potencial eolo-energético; estos resultados fueron comparados con los obtenidos para esos datos mediante la aplicación informática WAsP y ambos pueden considerarse semejantes.

**Palabras clave:** Distribución de Weibull; Energía; Estimación  $(A, U, \Theta)$ ; Modelación; Viento.

*From a set of numerical measurements of the speed  $V$  and the direction  $E$  of the wind, the basic definitions were established to obtain the wind energy model in a promising geographic region using the estimators  $(A, U, \Theta)$  on the parameters  $K$  and  $C$  of a Weibull Distribution. Based on a combinatorial optimization approach and using the Exhaustive Search Method, a mathematical procedure is determined to obtain the configuration parameters of the UPD linear estimator with drift, such that the models with the lowest average of the estimation errors are obtained. The conceptual and algorithmic results described have been applied to the Playa La Vaca de Moa region, Holguín, to obtain satisfactory information on its eolo-energy potential; These results were compared with those obtained for these data using the WAsP computer application and both can be considered similar.*

**Key words:** Weibull distribution; Energy; Estimate  $(A, U, \Theta)$ ; Modeling; Wind.

### INTRODUCCIÓN

Al obtener el modelo de recursos eolo-energéticos de una región, se garantiza una condición indispensable para diseñar los parques eólicos. En este trabajo los modelos están dados por una malla 3D que representa en cada uno de sus nodos un punto de la atmósfera sobre la región. A la coordenada que identifica a cada nodo, se asocian valores que caracterizan el comportamiento de la velocidad ( $V$ ) y dirección ( $E$ ) del viento, así como la energía que de esta fuente se puede obtener.

Cómo citar este artículo:

Eduardo Terrero Matos, et al. Modelo eolo-energético de la región Playa La Vaca usando estimadores multivariados.

2020, vol. 41, n.3, septiembre/diciembre. ISSN: 1815-5901

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

El problema de la obtención del modelo eolo-energético de una región promisorio [1-3], e incluso, modelar estos recursos para escenarios futuros [4], ha sido resuelto con diversos enfoques y variados niveles de efectividad. Estas soluciones consideran el uso de estimadores, pero no se han encontrado referencias sobre la utilización de los del tipo  $(A,U,\Theta)$ .

Hay varias formas de obtener un modelo eolo-energético de una región [5-7]. Aquí se asume que la información energética del viento en cada nodo P de la malla del modelo (de coordenadas  $X_p$ , e  $Y_p$ ; altura topográfica sobre el nivel del mar:  $Z_{op}$  y altura  $Z_p$  del punto sobre  $Z_{op}$ ) se puede resumir en los parámetros  $K_p$  y  $C_p$  de la distribución de Weibull que se ajusta al histograma de frecuencia obtenido para las mediciones de V durante un año tipo. Para cada punto Q donde se realicen mediciones es fácil obtener  $K_q$  y  $C_q$ , pero donde no se han ejecutaron los muestreos solo queda la opción de estimar de alguna manera los valores de estos parámetros. Hay dos formas básicas de hacer estas estimaciones:

1. A partir de los datos medidos en cada punto de muestreo Q, simular en cada nodo P de la malla el comportamiento temporal del viento ( $S_p$ ) y a partir de cada valor de  $S_p$  ajustar los valores  $K_p$  y  $C_p$ .
2. A partir de los datos medidos en cada punto Q de muestreo ajustar  $K_q$  y  $C_q$ . Ahora con estos valores se estiman los valores faltantes  $K_p$  y  $C_p$  en los puntos P de la malla.

Estos enfoques tienen implementaciones diversas [8], entre las que se destaca la propuesta por [9], en su aplicación WAsP 8.2 (licencia 34544-60828-31022-44457-0-0) donde a partir del estudio de los modelos topográfico, de rugosidad y de obstáculos en el punto de muestreo Q crea un modelo de K y C (denominado Wind Atlas) para la región, el cual permite calcular los parámetros  $K_p$  y  $C_p$  teniendo en cuenta la topografía, la rugosidad y obstáculos de P.

En el presente trabajo se sigue el segundo enfoque incorporando por primera vez un estimador del tipo  $(A,U,\Theta)$  tal como lo describen Terrero y Legrá [10]. Su objetivo es obtener el modelo eolo-energético de la región promisorio Playa La Vaca (provincia Holguín, Cuba) y argumentar la validez de los resultados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales primarios disponibles son los datos del muestreo diezminutal durante periodos de 2 a 3 años en tres torres de medición denominadas Unidad Militar (UM), Colina 2 (C2) y Colina 4 (C4) donde se realizaron muestreos a 10 m, 30 m y 50 m de altura sobre la topografía de cada punto, de manera que se tienen 9 fuentes de información de igual categoría. A partir de los datos disponibles se aplicó la Ley de Hellman [11], para simular mediciones diezminutales de velocidad en cada torre a 70 m, 90 m y 110 m sobre la topografía y de esta manera se agregaron otras 9 fuentes de información y ahora, en términos generales, se dispone de 18 estaciones meteorológicas (EM).

Para cada EM se obtuvieron los histogramas correspondientes de V y se ajustó la distribución de Weibull correspondiente. Tal como han establecido algunos autores [12], para obtener el ajuste se probaron varios métodos:

1. Método de los Momentos  $V_m$  y  $d_m$  [11-13].
2. Método Máxima Verosimilitud modificado [13].
3. Método de Ajuste por Mínimos Cuadrados [14].
4. Método de Momentos Ponderados de Probabilidad [15].
5. Método de Momentos Ponderados de Probabilidad y aproximación iterativa (método anterior perfeccionado por los autores). Permite encontrar K y C tal que el promedio del error absoluto relativo entre las probabilidades experimentales y las del modelo que se ajusta sea tan pequeño como sea necesario y posible.
6. Método de Estimación Vertical [16].
7. Método del factor de patrón de energía [17].
8. Método de los momentos  $(V^2)_m$  y  $(V_m)^2$  [18].
9. Método por Sectores del WAsP 8.2 [18].

Para obtener los resultados de K, C y  $V_m$  que se muestran en la tabla 1, se usó el Método por Sectores ya que es una forma directa de tener en cuenta la influencia de los datos en las direcciones del viento de mayor frecuencia. Además, se muestran los valores de longitud de rugosidad  $L_r$  [11].

**Tabla 1.** Datos para obtener el modelo eolo-energético en la región de estudio

Nombre EM	Este-Oeste	Sur-Norte	Z	K	C	Zo	Lr	V <sub>m</sub>
UM	695770,252	225503,133	10	2,0777	4,4897	11,921957	0,000772	3,9768
UM			30	1,9794	5,7738			5,1180
UM			50	1,9459	6,3563			5,6365
UM			70	1,9115	6,8053			6,0377
UM			90	1,8777	7,1217			6,3221
UM			110	1,8491	7,2752			6,4621
C4	694011,269	223867,099	10	2,2192	4,4605	124,488249	0,000772	3,9505
C4			30	2,2355	5,7715			5,1118
C4			50	2,2582	6,5045			5,7614
C4			70	2,2617	7,0549			6,2490
C4			90	2,2420	7,4745			6,6203
C4			110	2,2132	7,7937			6,9025
C2	693772,668	224069,631	10	2,1082	4,7368	129,614005	0,000772	4,1953
C2			30	2,0628	6,4672			5,7289
C2			50	2,1702	6,7791			6,0036
C2			70	2,2135	7,0228			6,2197
C2			90	2,2014	7,1910			6,3686
C2			110	2,1723	7,2789			6,4462

### Características del Estimador

Los principios generales para estimar los valores de K y C en cualquier nodo de la malla 3D son los siguientes:

- Los valores estimados de K<sub>p</sub> y C<sub>p</sub> en P<sub>e</sub> dependen de los valores de K<sub>i</sub> y C<sub>i</sub> en los datos Q<sub>i</sub>=(X<sub>i</sub>,Y<sub>i</sub>,Z<sub>i</sub>) y estas relaciones pueden modelarse en función de las distancias entre todos estos puntos. Esta es una importante idea totalmente aceptada, que según en la literatura revisada fundamenta el uso de estimadores basados en información puntual tomada de muestras [10].
- La variabilidad de los parámetros K y C influye en la variabilidad de las estimaciones. Esta es una idea extrapolada de la teoría geoestadística del estimador Kriging, uno de los estimadores del tipo (A.U,θ) más conocidos [19].
- K y C están interrelacionados de manera compleja [20], y la influencia de esta relación será expresada mediante la estimación simultánea de ambos parámetros.
- Los valores de las cotas de superficie Z<sub>o</sub> y de la longitud de rugosidad L<sub>r</sub> influyen en el proceso de estimación de K y C. Esta influencia está determinada por los comportamientos que tengan estas variables en los datos y esta se manifiesta en la deriva del modelo.

Sobre los conceptos y algoritmos de los métodos para obtener los valores de K y C en todos los puntos P de una malla se ha argumentado en el trabajo de [10]. Las formulaciones para estimar K<sub>e</sub> y C<sub>e</sub> en la presente investigación son: vea ecuación (1):

$$\begin{bmatrix} K_e \\ C_e \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n [\bar{\Theta}_{ei}] [\bar{L}_i] + \sum_{i=1}^t [\bar{\theta}_{ie}] [\bar{b}_i] \quad (1)$$

Donde n es el número de datos utilizado en la estimación y t=2 es el número de componentes de la deriva. En este trabajo, para realizar cada estimación en el nodo P<sub>e</sub> se toman los n=9 datos P<sub>i</sub> más cercanos a P<sub>e</sub> según un sistema de coordenadas convenientemente escalado.

El valor de  $d_{ji}^p$  se calcula como la potencia p de la distancia euclidiana suavizada entre los puntos P<sub>i</sub> y P<sub>j</sub>:

$d_{ji} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2 + s^2}$  donde s es el factor de suavización. Cuando la escala vertical es notoriamente diferente a las escalas horizontales es conveniente *escalar* todos los ejes de manera que sean iguales las distancias entre los extremos de la vertical Z y los extremos en el plano XY.

Esto se logra multiplicando a  $(X_i - X_j)$ ,  $(Y_i - Y_j)$  y  $(Z_i - Z_j)$  por factores adecuados.

Las funciones que componen la Deriva son  $[\bar{\theta}_e] = \begin{bmatrix} [\bar{\theta}_{1e}] \\ [\bar{\theta}_{2e}] \end{bmatrix}$ . En particular:  $[\bar{\theta}_{1e}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  y además:

$$[\bar{\theta}_{2e}] = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_o(\mathbf{X}_e, \mathbf{Y}_e) + \mathbf{L}_r(\mathbf{X}_e, \mathbf{Y}_e) & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_o(\mathbf{X}_e, \mathbf{Y}_e) + \mathbf{L}_r(\mathbf{X}_e, \mathbf{Y}_e) \end{bmatrix}.$$

Los valores de  $[\bar{L}_i] = \begin{bmatrix} L_{iK} \\ L_{iC} \end{bmatrix}$ ,  $i=1, \dots, n$  y de  $[\bar{b}_i] = \begin{bmatrix} b_{jK} \\ b_{jC} \end{bmatrix}$ ,  $i=1, 2$  se obtienen de resolver el sistema de ecuaciones lineales

matriciales: ecuación(2).

$$\begin{bmatrix} [\bar{A}_{nn}] & [\bar{\theta}_{nt}] \\ [\bar{\theta}_{tn}] & [\bar{0}_{tt}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\bar{L}_n] \\ [\bar{b}_t] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\bar{U}_w] \\ [\bar{0}_t] \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} [\bar{A}_{nn}] & [\bar{\theta}_{nt}] \\ [\bar{\theta}_{tn}] & [\bar{0}_{tt}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\bar{\theta}_{11}] & \dots & [\bar{\theta}_{1n}] & [\bar{\theta}_{11}] & [\bar{\theta}_{12}] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [\bar{\theta}_{n1}] & \dots & [\bar{\theta}_{nn}] & [\bar{\theta}_{n1}] & [\bar{\theta}_{n2}] \\ [\bar{\theta}_{11}] & \dots & [\bar{\theta}_{1n}] & [\bar{0}_{11}] & [\bar{0}_{12}] \\ [\bar{\theta}_{21}] & \dots & [\bar{\theta}_{2n}] & [\bar{0}_{21}] & [\bar{0}_{22}] \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} [\bar{L}_n] \\ [\bar{b}_t] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\bar{L}_1] \\ \dots \\ [\bar{L}_n] \\ [\bar{b}_1] \\ [\bar{b}_2] \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} [\bar{U}_w] \\ [\bar{0}_t] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\bar{U}_{w1}] \\ \dots \\ [\bar{U}_{wn}] \\ [\bar{0}_1] \\ [\bar{0}_2] \end{bmatrix} \quad [\bar{U}_{wi}] = \begin{bmatrix} K_i \\ C_i \end{bmatrix}$$

El error para cada estimación se calcula mediante la ecuación (3).

$$[\alpha_{Ke}, \alpha_{Ce}] = [e_{Ke}, e_{Ce}] = \left[ \sum_{i=1}^n |\lambda_{iK}| |K_i - K_e|, \sum_{i=1}^n |\lambda_{iC}| |C_i - C_e| \right] \quad (3)$$

Donde  $\lambda_{iK}$  y  $\lambda_{iC}$  se calculan tal como explican [10], a partir del enfoque dual del estimador.

Nótese que la formalización (algoritmos y ecuaciones) de este estimador:

1. Asegura el uso de todos los datos de entrada (topografía, rugosidad y muestreos).
2. Permite evaluar su sensibilidad para asegurar que a pequeños cambios de los datos de entrada solo se producen pequeños cambios en los resultados [21].
3. Su formalización es sencilla ya que cada estimación se basa en un producto escalar de vectores cuyos elementos son matrices (1).
4. Las matrices  $[\bar{L}_i]$  y  $[\bar{b}_i]$  se obtienen resolviendo un sistema matricial de ecuaciones lineales (2). Este proceso es viable y eficiente al aplicar el método de Gauss-Jordán.
5. La eficacia del estimador (o sea, la calidad de los resultados) puede ser evaluada explícitamente mediante los coeficientes

$$\text{de variación de cada estimación: } [CV_{Ke}, CV_{Ce}] = \left[ \frac{100 eK_e}{K}, \frac{100 eC_e}{C} \right].$$

### Optimizando el Estimador

El estimador propuesto está condicionado por los valores de los parámetros de su función núcleo, es decir, la potencia  $p$  y el factor de suavización  $s$ . En un enfoque optimizador, la idea que se propone es encontrar valores de  $p$  y  $s$  tales que los resultados sean los más adecuados.

La primera cuestión es lograr que las ecuaciones de enlace del problema de optimización aseguren modelos factibles donde los resultados de las estimaciones  $K_e$  y  $C_e$  estén suficientemente cercanos a los valores de los datos  $K_i$  y  $C_i$ . Se propone que se

consideren valores factibles de  $p$  y  $s$  aquellos donde se cumpla que:  $Q_1 = \frac{|C_{\min M} - C_{\min}|}{|C_{\min}|} \leq \delta_B$ ;  $Q_2 = \frac{|C_{\max M} - C_{\max}|}{|C_{\max}|} \leq \delta_R$  ;

$Q_3 = \frac{|K_{\min M} - K_{\min}|}{|K_{\min}|} \leq \delta_B$ ; y  $Q_4 = \frac{|K_{\max M} - K_{\max}|}{|K_{\max}|} \leq \delta_R$ , donde:  $C_{\min}$  y  $C_{\max}$  son los valores extremos de  $C$  en los datos;  $K_{\min}$  y

$K_{max}$  son los valores extremos de K en los datos;  $C_{minM}$  y  $C_{maxM}$  son los valores extremos de C en el modelo; y  $K_{minM}$  y  $K_{maxM}$  son los valores extremos de K en el modelo. Los parámetros  $\delta_R$  y  $\delta_B$ , entre 0 y 1, son las cotas permisibles de diferencias entre datos y modelos y en este trabajo se han tomado ambas igual a 0,1.

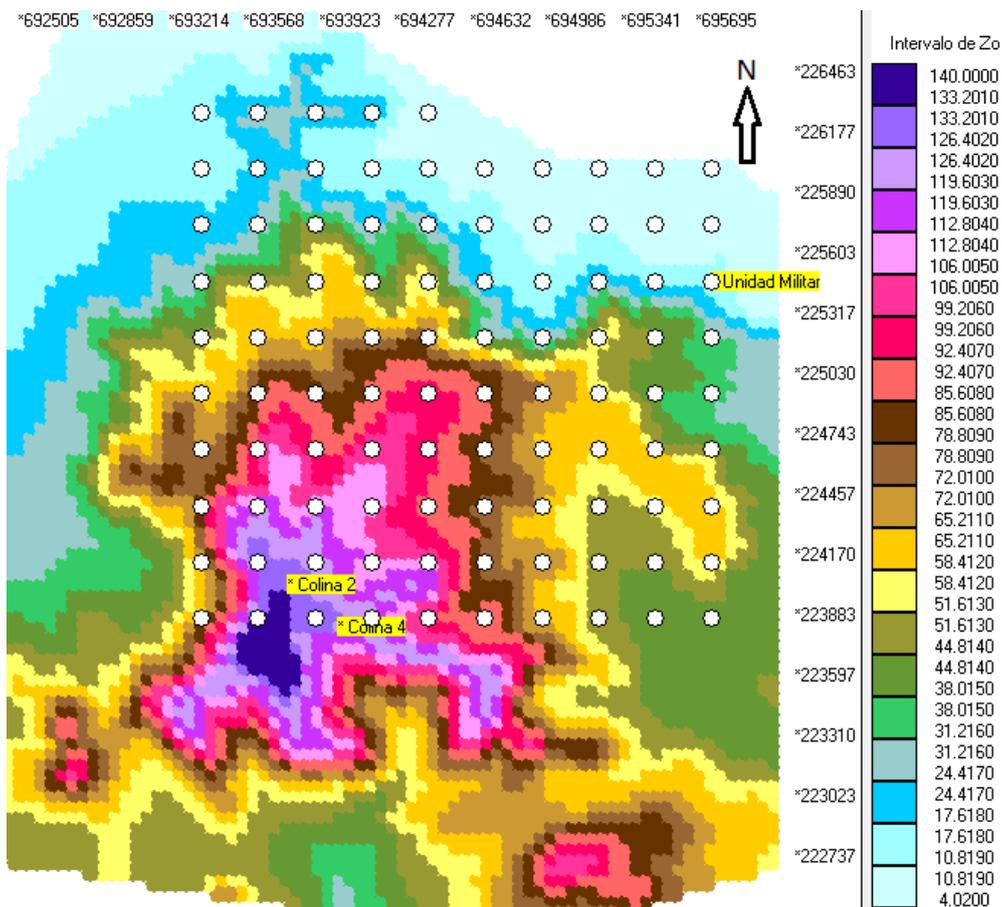
Se asume que la función objetivo es el promedio  $PMACV_{KC}$  de las dos medias aritméticas de los coeficientes de variación  $CV_K=100\frac{eK_e}{K_e}$  y  $CV_C=100\frac{eC_e}{C_e}$  obtenidos al estimar respectivamente K y C en cada uno de los puntos de la malla; en este trabajo la optimización consiste en minimizar esa función objetivo o sea: encontrar valores de p y s tal que  $PMACV_{KC}$  sea mínimo.

Queda aún por dilucidar el método de búsqueda de los mejores valores de p y s. En este trabajo se propone que estos parámetros p y s se consideren discretos de manera que se estudien los modelos obtenidos a partir de cada una de las 10201 combinaciones de los 101 valores de p: 0,40; 0,41; 0,42; ...; 1,40 y de los 101 valores de s: 0,0; 0,5; 1,0; ...; 50. De esta manera la búsqueda de los mejores valores de p y s se convierte en un problema de Optimización Combinatoria que se resuelve mediante una Búsqueda Exhaustiva [22]. La elección de los rangos y número de cortes de cada discretización se realizó heurísticamente.

## RESULTADOS

La malla 3D sobre cuyos nodos se estiman los valores de K y C (ver figura 1), se tomará con 95 puntos y sus parámetros se dan en la tabla 2. Los cálculos se implementan computacionalmente [23].

Variable	Mínimo	Máximo	Total de puntos en esa dirección
Este-Oeste	693372	695775	10
Sur-Norte	223857	226260	10
Altura	10	110	6



**Fig. 1.** Ubicación 2D de las torres de muestreo y proyección plana de la red 3D de la malla del modelo seleccionado. Se eliminaron 5 puntos cuyas coordenadas estaban fuera de la frontera de la región promisoria.

Después de probar todas las combinaciones posibles de la discretización propuesta se obtuvieron 8759 modelos factibles y de ellos se tomó como óptimo el de menor valor de PMACVKC=5,78% (promedio entre MACVK=4,797% y MACVC=6,76%); este modelo se obtiene de tomar:  $p=0,4$  y  $s=0,5$ . Deben mencionarse los valores que aseguraron la factibilidad del modelo:  $O1=0,0025074268236$ ,  $O2=0,044522928499$ ,  $O3=0,0040509392783$  y  $O4=0,025045062391$ . Como resultados prácticos tecnológicos se muestran a continuación algunos valores del modelo a la altura de 90m. Figuras 2,3 y 4.

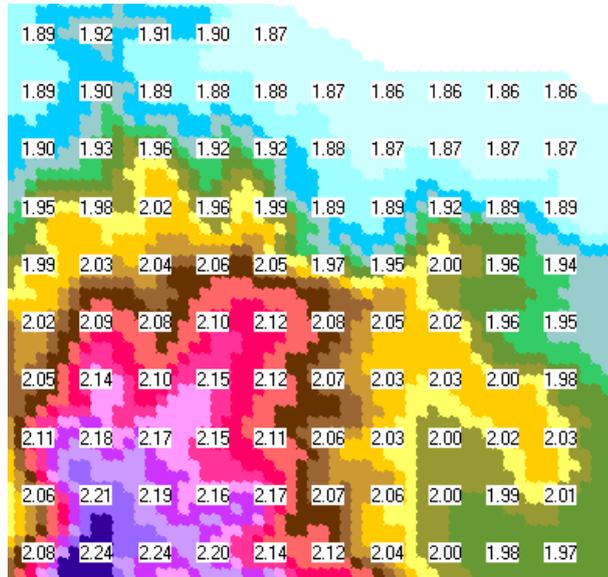
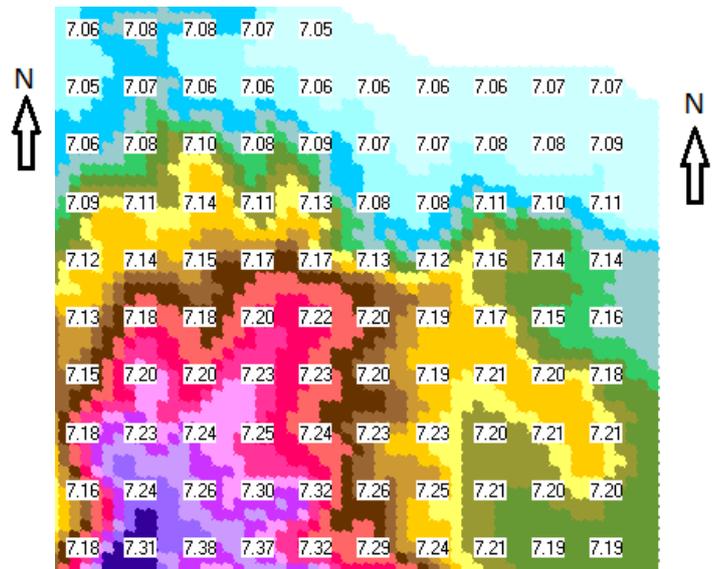


Fig. 2. a) Valores estimados de K a 90m de altura



b) Valores estimados de C a 90m de altura

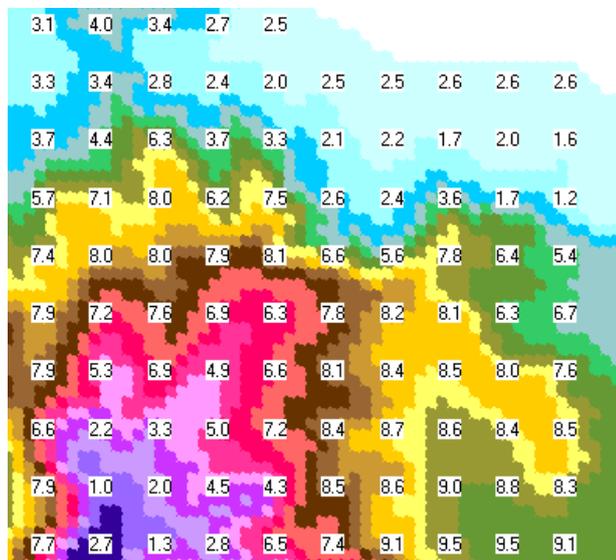
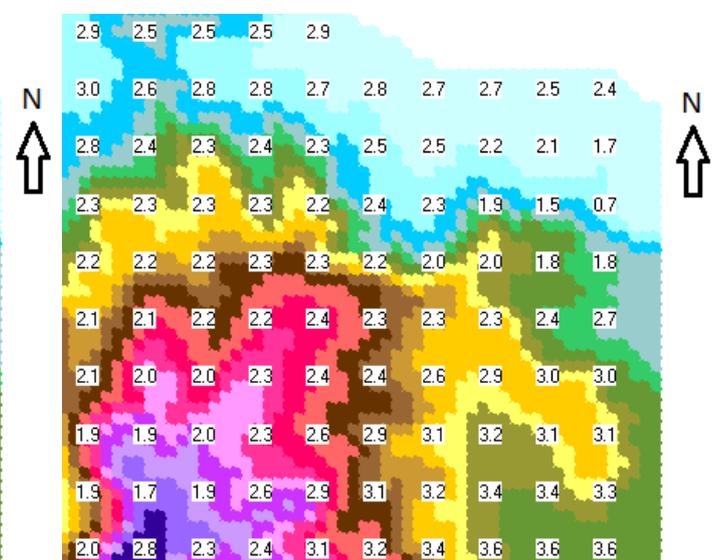


Fig. 3. a) Valores de CVK a 90m de altura



b) Valores estimados de CVC a 90m de altura

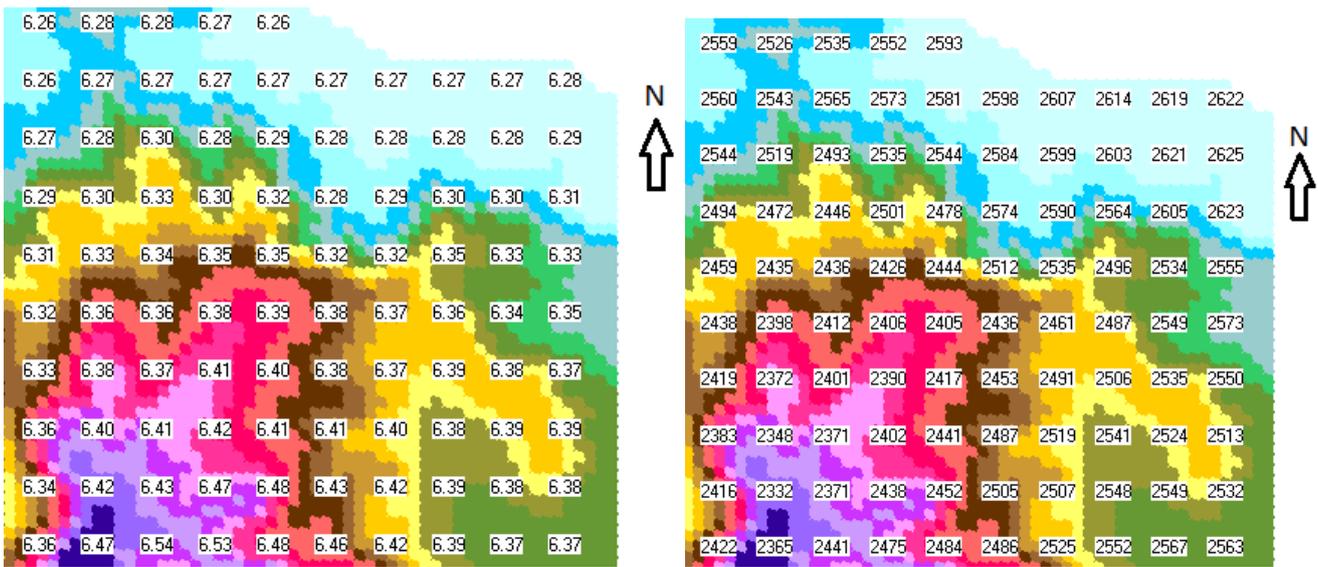


Fig. 4. a) Velocidad media (m/s) a 90m de altura

b) Energía anual (kWh/m2) a 90m de altura

Considerando la información de la base de datos del software WAsP 8.2 [9], se analizó la capacidad del aerogenerador NEG-Micon 1650/82 IECIII (1650 kW) para aprovechar la energía del viento en cada punto de la malla a 90m. Para ello se calculó el factor de capacidad FC, obtenido como el cociente de la energía generada durante el año (por el aerogenerador) entre la energía que se generaría durante un año a potencia nominal del aerogenerador [11]. Las características de FC según el modelo 3D obtenido se muestra en la figura 5.

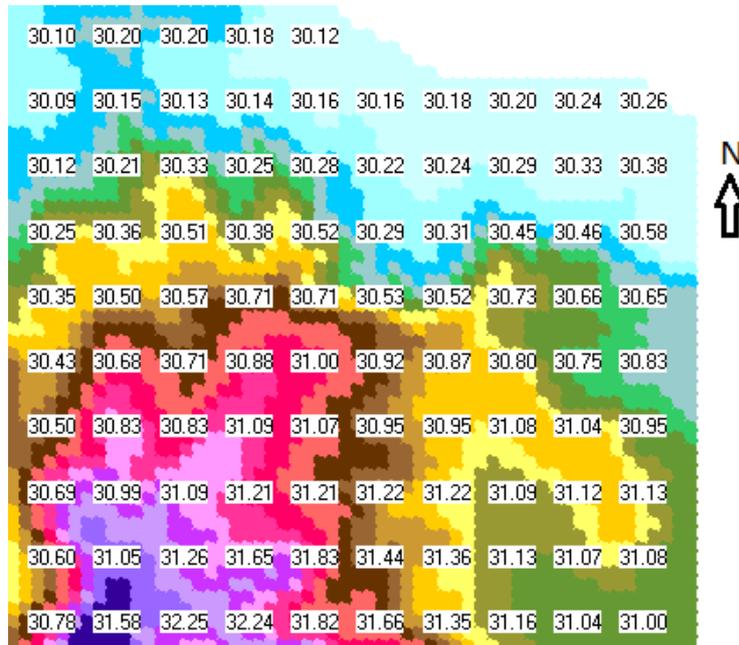


Fig. 5. Factor de Capacidad a 90m de altura para el aerogenerador NEG-Micon 1650/82 IECIII (1650 kW).

## DISCUSIÓN

Los resultados que se muestran en las figuras 2, 4 y 5, indican que la modelación tiene valores que pueden esperarse. Los valores de la figura 3, indican que a los 90m los errores de estimación son pequeños para los parámetros  $s$  y  $p$  seleccionados. Una manera más de avalar los resultados de esta modelación es compararla con otras modelaciones semejantes. Para ello se obtiene con la aplicación informática WAsP 8.2 [24-25], un modelo de la malla 3D a 90 m usando (como es usual) una de las fuentes de información, en este caso es Colina 2 a 50m. Los resultados se muestran en las figuras 6 y 7.

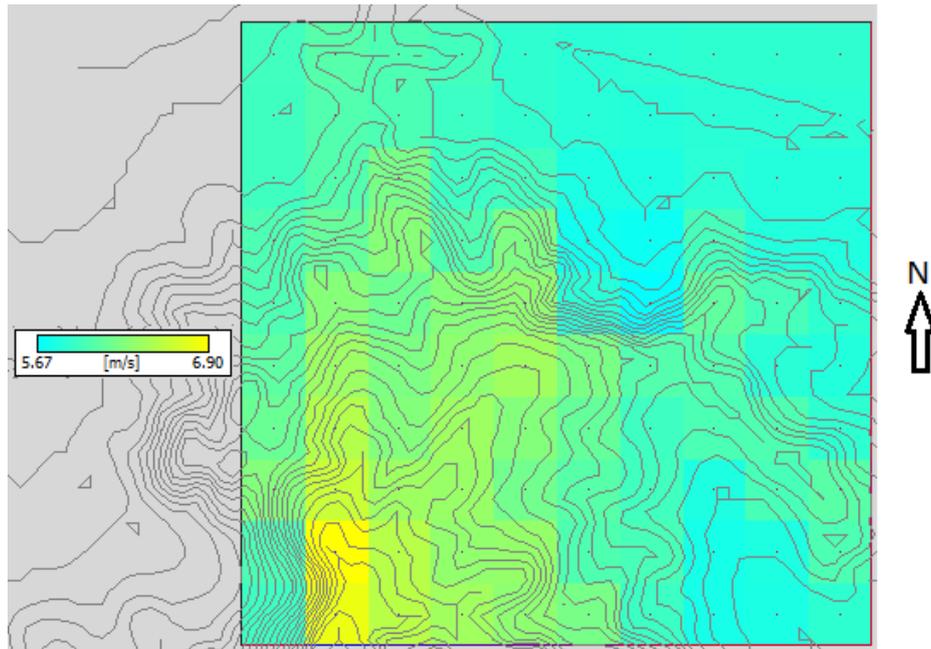


Fig. 6. Modelo de Vm a 90 m según WASP 8.2 calculando con los datos de Colina 2 a 50m.

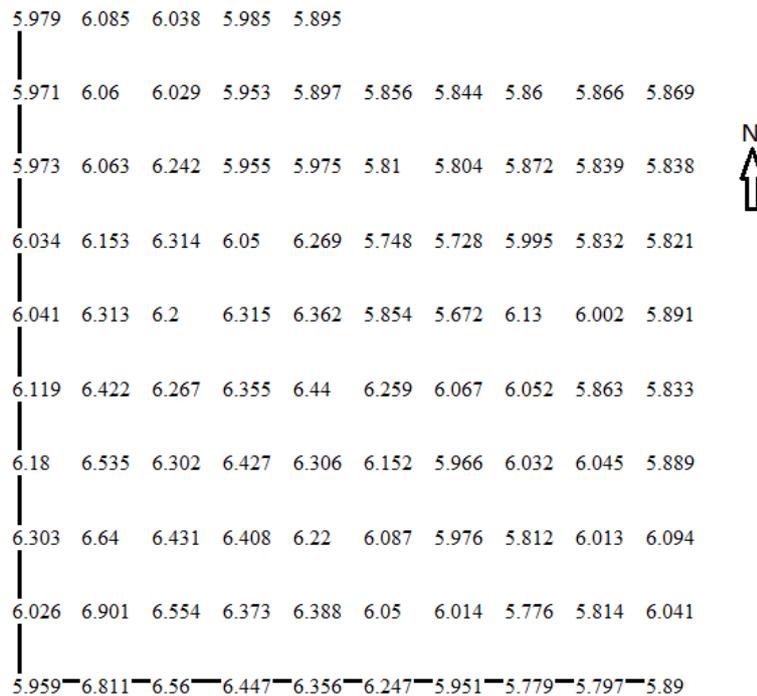


Fig. 7. Valores de Vm a 90 m según WASP 8.2 modelando desde los datos de Colina 2 a 50m

Bajo el supuesto que los resultados obtenidos por WASP 8.2 son correctos y calculando el error absoluto relativo porcentual entre cada pareja de resultados obtenidos por la aplicación europea y por el método que se propone en este trabajo (ver figuras 4a y 7), se obtiene que el resultado Mínimo = 0,16%, Máximo = 11,35%, Media Aritmética = 4,87% y Desviación Estándar = 2,98%, puede considerarse entonces que ambos modelos son aceptablemente semejantes.

### CONCLUSIONES

1. Se establecieron los principios y definiciones básicas para obtener el modelo eolo-energético en una región geográfica utilizando los estimadores multivariantes (A,U,Θ). Su formalización (algoritmos y ecuaciones) garantiza, entre otras ventajas, el uso de todos los datos disponibles y la evaluación de la calidad de las estimaciones.

2. Bajo el enfoque de una optimización combinatoria, y usando el Método de Búsqueda Exhaustiva, se describió un procedimiento para obtener los parámetros de configuración del estimador seleccionado UPD que definen los modelos de malla 3D de menor valor promedio de los coeficientes de variación de los errores de estimación.
3. Se aplicaron los procedimientos en la región Playa La Vaca de Moa, y se corroboró su condición de región promisoría respecto a su potencial eolo-energético; en particular se destaca que a la altura de 90 m el factor de capacidad para el aerogenerador NEG-Micon 1650/82 IECIII de 1650 kW oscila entre 30 y 33 %.
4. Mediante la aplicación informática Eolica 1, a partir de los datos disponibles, se obtuvieron los valores de la velocidad media  $V_m$  a 90 m. De manera similar fue estimada  $V_m$  con la aplicación informática WAsP 8.2, usando los datos de Colina 2 a 50 m. Se calcularon los errores absolutos relativos porcentuales entre cada pareja de resultados y el promedio de estos no excedió el 4,9 %, lo cual argumenta la similitud entre ambos resultados.

## REFERENCIAS

- [1] TORRES DURÁN, Armando y MORENO FIGUEREDO, Conrado. “Evaluación del potencial eólico en el Consejo Popular de Cojímar”. Revista Cubana de Meteorología, v.24, n.3, p. 256-267, 2018, ISSN. 0864-151X. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/download/432/520>
- [2] SESSAREGO, Matias; *et al.* “CFD Simulations of Flows in a Wind Farm in Complex Terrain and Comparisons to Measurements”. Appl. Sci. 2018, v. 8, n. 5, p. 788 .[ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app8050788>
- [3] MEDRANO HERNÁNDEZ, José Augusto, *et al.* “Estudio de prefactibilidad técnica del aprovechamiento del viento como recurso energético en zonas pre-montañas”. Ingeniería Energética, v. 40, n. 3, p. 223-233, 2019 .[ Consultado enero 2020]. Disponible en: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/573/pdf>
- [4] ALONSO DÍAZ, Yoandy; *et al.* “Wind resource assessment of Cuba in future climate scenarios”. Wind Engineering, v. 43, n. 3, p. 311-326, 2018. .[ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0309524X18780399>
- [5] OYARZO PÉREZ, Humberto. “Modelización matemática para evaluar energías para sistemas eólicos e híbridos eólico-diésel”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Madrid 2008, p. 307. .[ Consultado enero 2020]. Disponible en: [http://oa.upm.es/1855/1/HUMBERTO\\_OYARZO\\_PEREZ.pdf](http://oa.upm.es/1855/1/HUMBERTO_OYARZO_PEREZ.pdf)
- [6] GONZÁLEZ-LONGATT, Francisco; *et al.* “Spatial interpolation and orographic correction to estimate wind energy resource in Venezuela”. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015, v. 48, p. 1-16. .[ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.042>
- [7] IBARGÜENGOYTIA GONZÁLEZ, P. H.; *et al.* “Predicción de potencia eólica utilizando técnicas modernas de Inteligencia Artificial”. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología. v. 19, n. 4, octubre-diciembre 2018, p. 1-11. ISSN 2594-0732 FI-UNAM .[ Consultado enero 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n4.033>
- [8] ROQUE, A. “Estimación y pronóstico del recurso eólico en Cuba”. Centro de Física de la Atmósfera (CFA), Instituto de Meteorología. Trabajo presentado en el Taller CUBAEOLICA 2019, Hotel Meliá Habana, Cuba. 10 al 12 de julio de 2019. .[ Consultado enero 2020]. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/532/0>
- [9] RISØ NATIONAL LABORATORY. “WAsP 8 Help Facility and On-line Documentation”. Versión 8.2, Denmark, 2005. .[ Consultado enero 2020]. Disponible en: [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/116323084/WAsP\\_8\\_Help\\_Facility\\_and\\_On\\_line\\_Documentation.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/116323084/WAsP_8_Help_Facility_and_On_line_Documentation.pdf)
- [10] TERRERO MATOS. E. y LEGRÁ LOBAINA, A. A.: “Estimación por método UPD multivariable de un modelo óptimo 3D de recursos eoloenergéticos”. Revista Minería y Geología 36(1) p. 16-32, 2020. ISSN 1993 8012. .[ Consultado enero 2020]. Disponible en: [https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/download/art2\\_No1\\_2020/1481](https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/download/art2_No1_2020/1481)
- [11] MORENO FIGUEREDO, C. *et al.* “Doce preguntas y respuestas sobre energía eólica”. Grupo de trabajo para el impulso de la energía eólica. Editorial Cubasolar, La Habana, 2017, p. 603. ISBN. 978-959-7113-51-5 .[ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://isbn.cloud/en/9789597113515/doce-preguntas-y-respuestas-sobre-energia-eolica/>
- [12] AUKITINO, Tiaon; KHAN, M.G.M. y RAFIUDDIN AHMED, M. “Wind energy resource assessment for Kiribati with a comparison of different methods of determining Weibull parameters”. Energy Conversion and Management, v. 151, p. 641-660, 2017. ISSN 0196-8904. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890417308403>
- [13] DONGBUM, Kang; KYUNGNAM, Ko y JONGCHUL, Huh. “Comparative Study of Different Methods for Estimating Weibull Parameters: A Case Study on Jeju Island, South Korea”. Energies 2018, v. 11, n. 2, p. 356. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en11020356>
- [14] FALCES DE ANDRÉS, Alberto. “Planificación de parques eólicos mediante sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad de la Rioja, España, 2015. .[ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/tesis/46569.pdf>

- [15] PÉREZ, I; SÁNCHEZ M. L. y GARCÍA, M. A.: “Weibull wind speed distribution: Numerical considerations and use with sodar data”. *Journal of Geophysical Research*, v. 112, D20112, 2007. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2006JD008278>
- [16] MORENO FIGUEREDO, C. *et al.* “Diez preguntas y respuestas sobre energía eólica”. Grupo de trabajo para el impulso de la energía eólica. Editorial Cubasolar, La Habana, 2006. p. 211. ISBN 959-7113-[ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/92200369/Diez-Preguntas-y-Respuestas-Sobre-Energia-Eolica>
- [17] WERAPUN, W.; TIRAWANICHAKUL, Y. y WAEWSAK, J.: “Comparative Study of Five Methods to Estimate Weibull Parameters for Wind Speed on Phangan Island, Thailand”. 2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies. *Energy Procedia*. 2015, v. 79, p. 976 – 981. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.596>
- [18] TROEN, I., & LUNDTANG PETERSEN, E. 1990. “El Atlas Eólico Europeo”. Roskilde: Risø National Laboratory. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: [http://orbit.dtu.dk/files/113794558/El\\_Atlas\\_Eolico\\_Europeo.pdf](http://orbit.dtu.dk/files/113794558/El_Atlas_Eolico_Europeo.pdf)
- [19] OLIVER, M. “The Variogram and Kriging” in *Handbook of Applied Spatial Analysis*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 319-352. ISBN: 978-3-642-03647-7. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-03647-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03647-7_17)
- [20] VALDÉS, J.M., VINAGRE, C. “Modelos de previsiones del viento”. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2012. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/viento/index.html>
- [21] LEGRÁ LOBAINA, Aristides A. “Sensibilidad de los estimadores (A,U,Θ)”. *Revista HOLOS*, v. 36, n. 1, p. 1-18. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.15628/holos.2020.7282>
- [22] LEGRÁ LOBAINA, A. A., LAMORÚ REYES, A. y CALA HINOJOSA, A.: “Evaluación de modelos 2D de variables geo-tecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano. Quinta parte: Optimización combinatoria del método UPD”. *Revista Minería y Geología*. 2016, v. 32, n. 4, p. 33-48. ISSN 1993 8012. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: [https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/download/art3\\_No4\\_2016/735](https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/download/art3_No4_2016/735)
- [23] PEPPER, Darrell W. y GONZÁLEZ, María Ramos. “A Localized Meshless Technique for Generating 3-D Wind Fields”. *Computation* 2018, v. 6, n. 1, p. 17. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/computation6010017>
- [24] RODRIGUES DA SILVA, Jeandson; *et al.* “Análise de potencial eólico utilizando o software WAsP e dados de medição de anemômetro de torres meteorológicas”. In book: *A Aplicação do Conhecimento Científico nas Engenharias 2*, p.128-134 (Atena Editora), 2019. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.22533/at.ed.45619040414>
- [25] KOŞAR, Onur y ÖZGÜR, Mustafa Arif. “Wind energy resource assessment of Kütahya, Turkey using WAsP and layout optimization”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2020. [ Consultado enero 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0957650920936030>

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Eduardo Terrero Matos:** <https://orcid.org/0000-0002-0686-3566>

Realiza la revisión bibliográfica; diseña y escribe el artículo propuesto. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Conrado Moreno Figueredo:** <https://orcid.org/0000-0001-8986-3205>

Realiza la revisión bibliográfica y escribe el artículo. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Yoalby Retirado Mediaceja:** <https://orcid.org/0000-0002-5098-5675>

Realiza la revisión bibliográfica y escribe el artículo. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Aristides Alejandro Legrá Lobaina:** <https://orcid.org/0000-0002-4793-4754>

Desarrolla aplicación informática y escribe el artículo. Participó en el análisis de los resultados, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.