

## **Estimación y caracterización del recurso eólico en la República Mexicana.**

Arturo Hernández Rosales, Paloma Tonally Sánchez Sánchez  
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, U. Ticomán, IPN, Distrito Federal, México,  
ahernandezro@ipn.mx

El uso de las energías renovables se ha dado desde el origen del ser humano. Desde la antigüedad, el uso de la energía eólica se remite a su aprovechamiento en diversas actividades que resultarían complejas para el hombre, desde poner en marcha molinos de granos o elevar agua de pozos para un adecuado suministro. Hoy en día, el uso de este recurso es una de las fuentes de energía renovable más utilizada y que mayor desarrollo técnico ha logrado durante las últimas décadas. Actualmente, y debido a los efectos del calentamiento global, el objetivo común se centra en la búsqueda de energías alternas para la sustitución de las fuentes energéticas de origen fósil que resulten, además de ecológicas, económicamente rentables.

### **Ventajas de la energía eólica.**

La energía eólica es un tipo de energía “alternativa” que se considera una forma indirecta de energía solar, puesto que entre el 1 y 2% de la energía proveniente del sol se convierte en viento, debido al movimiento del aire ocasionado por el desigual calentamiento de la superficie terrestre, es decir, a la diferente velocidad de cambio de temperatura del aire en zonas marítimas y continentales, se establecen diferencias de presión, que influyen en la formación de corrientes de masas de aire, entonces, la energía cinética producida por el viento puede ser transformada en energía eléctrica.

A partir de la crisis energética en la década de los 70's surgió una preocupación mundial por buscar nuevas fuentes de energía que no contaminaran y cuyo costo de generación fuera competitivo, dando origen así al interés en energías renovables. Desde entonces, la energía eólica se ha desarrollado a pasos acelerados durante los últimos años, lo que significa que comienza a tener cada vez más un posicionamiento creciente en la producción de energía y el reconocimiento de ser una de las menos contaminantes y seguras en el panorama energético mundial, puesto que es el tipo de energía renovable que menor impacto tiene sobre el medio ambiente, evitando el envío a la atmósfera de miles de toneladas de gases contaminantes como producto de la combustión del carbón y el petróleo.

Otra ventaja para nuestro entorno es que esta energía no tiene un impacto tan agresivo sobre la composición del suelo o su erosionabilidad, ya que no produce algún contaminante que incida sobre éste, vertido e, incluso, ocasionando grandes movimientos de terreno. Es fiable, no la hace amenazar la seguridad energética y es técnicamente capaz de abastecer una proporción significativa de electricidad para la población.

### **Energía Eólica en México.**

Por la distribución de vientos que ofrece la ubicación geográfica de la República Mexicana situada entre el Océano Pacífico y el Golfo de México, la hace poseedora de una posición privilegiada respecto a otros países en cuanto a la disponibilidad de recurso eólico que puede tener y aprovechar.

Con el objetivo de estimar el potencial eólico disponible en sitios específicos de México, se eligió como zona de estudio a los estados de Colima, Jalisco y Michoacán, por su colindancia

inmediata con el Océano Pacífico, que sugiere un continuo flujo de masas de aire desde la porción oceánica a la parte continental; se llevó a cabo un estudio que comprende la elaboración de un mapa de gradientes y caracterización eólica para determinar las zonas de emplazamiento que ofrecerían un mejor aprovechamiento del recurso, acoplando distintas variables meteorológicas que, relacionadas y representadas mediante herramientas tecnológicas, proveen información real y práctica para su uso.

En los estados de Colima, Jalisco y Michoacán existen diversos elementos orográficos; desde sierras, barrancas, valles, llanuras, e incluso mesetas, que entre otras, forman parte de las provincias fisiográficas que incluyen en común estos tres estados: la del Eje Neovolcánico y la de la Sierra Madre del Sur, mientras que Jalisco circunda áreas que corresponden a 4 provincias fisiográficas de México, adicionando las Provincias de la Mesa Central y la Sierra Madre Occidental a las ya mencionadas. La posición estratégica de dichos estados les otorga ventajas en cuanto al aprovechamiento energético se refiera.



*Fig. 1. Representación en imagen satelital de las estaciones meteorológicas principales de Colima, Jalisco y Michoacán para las que se realiza el estudio. GOOGLE EARTH.*

## Datos.

Las mediciones en campo son las fuentes de datos más confiables a la hora de evaluar un terreno para desarrollar una evaluación de recurso eólico y una caracterización edafológica para determinar tablas de rugosidad. Sin embargo, obtener una serie de datos de mediciones con bajo grado de incertidumbre, por un periodo de tiempo apropiado no es trivial, y si no se ejecuta de acuerdo a un correcto análisis estadístico y geomorfológico puede significar un factor de riesgo. Además, las mediciones directas ofrecen la posibilidad de controlar las frecuencias de muestreo para almacenar promedios; su precisión es alta y, aunque las mediciones sólo son válidas en el punto donde se ubica el sensor, puede establecerse un área de representatividad de las mediciones, y los resultados pueden ser extrapoladas a distancias del orden de algunos kilómetros desde el punto de medición. Por ello, la metodología implícita integra aspectos meteorológicos, obtenidos de bases de datos históricas de 11 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), abarcando en promedio 10 años, de la Comisión Federal de Electricidad, convertidos en resúmenes estadísticos de las características del viento por regiones y periodos

determinados de tiempo: mensuales, anuales y estacionales que, mediante tecnología SIG y técnicas analíticas e informáticas permiten su representación por medio de gradientes.

### **El recurso eólico en un Sistema de Información Geográfica.**

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), puede sintetizarse como el resultado de la aplicación de las llamadas Tecnologías de la Información a la gestión de la Información Geográfica. Puesto que ninguna de las rutinas de análisis del GIS utilizado está diseñada específicamente para la evaluación del recurso eólico, la técnica empleada requiere de un extenso análisis que simule métodos de evaluación científica directa del recurso eólico.

Los datos de entrada al SIG son datos de temperatura, humedad y presión con un posicionamiento dado por coordenadas geográficas, asignando así a cada punto del sistema cartográfico información determinada. Con ello, es posible crear un gradiente de temperatura en la altura a partir del dato de medición de la estación: 10 metros de altura (casi al nivel del suelo), mediante la herramienta “*kriging*”, que incluye la autocorrelación, ajustando una función matemática a todos los puntos dentro del radio específico (delimitado por el DEM de los 3 estados), determinando el valor de salida para cada ubicación. Gracias a esto, no solo se produce una superficie de predicción sino que, también, proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones, de acuerdo a la aproximación matemática utilizada en la correlación de los datos, lo que implica un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen: el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y la exploración de la superficie con valores asignados. Este método permite también la correlación con los elementos geomorfológicos y edafológicos de la zona.

El método pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones, por ejemplo a una altura de 2000 m.s.n.m., para la que no se tienen datos de medición puntuales, entonces, la fórmula general se forma a partir de una suma de la siguiente forma:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (1)$$

Dónde:

$Z(s_i)$  = el valor medido en la ubicación  $i$  ;

$\lambda_i$  = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación  $i$  ;

$s_0$  = la ubicación de la predicción y,

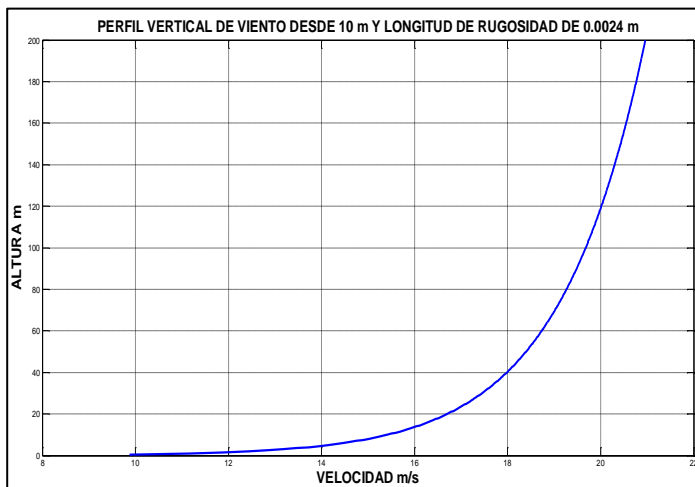
$N$  = la cantidad de valores medidos.

Las ponderaciones  $\lambda_i$  están basadas no solo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de los puntos medidos.

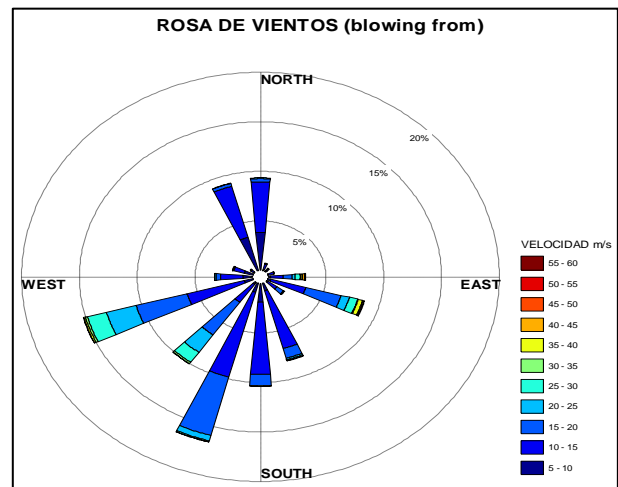
Al considerar los factores que afectan la cantidad de recurso aprovechable en un lugar, son necesarias, además de la velocidad del viento, otras variables que sinérgicamente conforman un sistema, en este caso se utilizan fuentes de datos meteorológicos de presión, temperatura, humedad y velocidad del viento, otorgando la posibilidad de estimar el recurso a niveles superiores, lo cual resulta bastante importante en áreas donde los datos superficiales

representan la posibilidad de obtener perfiles verticales aproximados de la velocidad y potencia del viento a través del modelo computacional en MatLab.

Los perfiles verticales se utilizan para extrapolar la cantidad de recurso eólico a áreas de terreno elevado y para identificar las velocidades del viento que podrían maximizar el aprovechamiento de éste a la altura apropiada; por ejemplo, para una estación en Colima (Fig. 2), permitiendo observar su comportamiento hasta 200m. de altura. A la par y como herramienta auxiliar, se utilizaron rosas de los vientos para representar gráficamente la dirección de los flujos dominantes (Fig. 3), y así establecer características locales.



**Fig. 2.** Perfil vertical de viento desde 10m. hasta 200m. para una EMA de Colima. MATLAB.

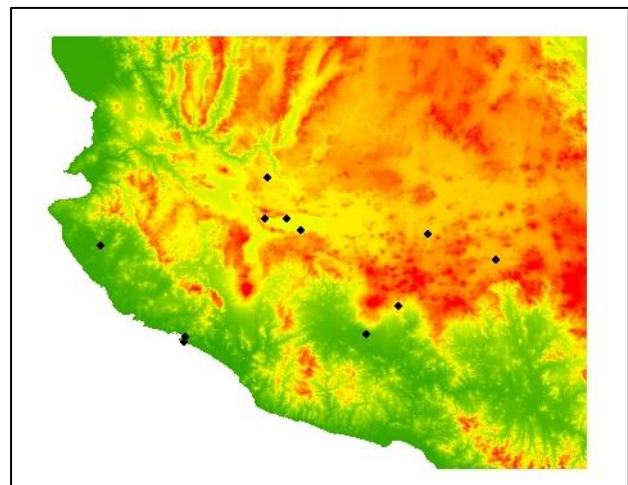


**Fig. 3.** Rosa de los vientos para EMA, Colima. WRPLOT.

La representación del análisis utiliza el software Google Earth para producir la proyección adecuada de las rosas de viento (Fig. 4); introducir información tal como: nombres, ubicaciones de estaciones meteorológicas, figuras poligonales que delimiten las áreas de posible emplazamiento, así como un DEM (Digital Elevation Model), en el mapa digital que sitúe en la elevación correcta dichas estaciones (Fig. 5).



**Fig. 4.** Rosa de los vientos estación Manzanillo, Colima. MATLAB.



**Fig. 5.** Modelo Digital de Elevaciones de Colima, Jalisco y Michoacán con la ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas. ARCGIS.

Los datos DEM generados con el SIG pueden utilizarse para observar un mapa de elevación en una imagen tridimensional de la distribución de la potencia del viento respecto a la temperatura o la humedad en la región analizada y así caracterizar una zona de interés.

### Gradientes de parámetros meteorológicos.

El viento, la altura, la humedad y la temperatura están vinculados de forma dinámica. Un cambio significativo en uno de ellos produce una aleatoriedad en el sistema. El estudio de las relaciones entre el viento geostrofico, el campo de temperaturas y el viento térmico nos permite apreciar el grado de interconexión que enlaza las variables atmosféricas mediante gradientes. Los gradientes de temperatura, por ejemplo, determinan gradientes de presión; estos, a su vez, dan impulso al campo de vientos y el viento causa la advección horizontal de las masas de aire frío o caliente. Las diferencias de temperatura crean gradientes horizontales de presión que se pueden expresar como gradientes de altura de las superficies isobáricas. En la atmósfera, los gradientes de presión provocan la aceleración del aire desde las regiones de alta presión hacia regiones de baja presión, es decir, diferencias de presión, que determinan las condiciones atmosféricas locales, como la humedad en superficie.

Para este estudio, se consideró la relación entre el gradiente altitudinal y el gradiente de temperatura, dando como resultado información con mayor fiabilidad. El método consiste en determinar los nuevos valores de temperatura a una altitud determinada usando el gradiente altitudinal calculado a partir de una relación gráfica, para luego interpolar los datos de temperatura a una altura determinada (2000m.s.n.n.m.), aunque considerando la altitud de un modelo de elevación digital (Fig.6). Esta nueva temperatura determinada se calculó mediante la siguiente formulación matemática:

$$T_{Det} = T_{mensual} + [\Gamma(Z_{Det} - Z_{est})] \quad (2)$$

Dónde:

$T_{Det}$  = Temperatura determinada que se busca encontrar a cierta altura,

$\Gamma$  = Gradiente altitudinal,

$Z_{Det}$  = Altura a la que se calculará la temperatura y,

$Z_{est}$  = Altura o elevación de la estación meteorológica.

Esta aplicación puede utilizarse con datos de radiación solar, índices UV, humedad relativa y presión barométrica. Representando el grado de correlación entre la altitud y la variable atmosférica, en este caso la temperatura, que aunque puede inferirse, podría no cumplir el mismo patrón si se correlacionara la altitud y la humedad, por ejemplo. El objetivo es llevar el valor puntual en superficie de cada variable a la altura deseada y observar su comportamiento.

Entonces el DEM se utiliza para volver a establecer la distribución vertical de temperatura determinada para cada píxel mediante la inversión de la ecuación (2), obteniendo la siguiente:

$$T_{x,y} = T_{Det} + [\Gamma(Z_{x,y}^{DEM} - Z_{Det})] \quad (3)$$

Dónde:

$T_{x,y}$  = Temperatura determinada en su elevación original y,

$Z_{x,y}^{DEM}$  = Altura dada por el modelo de elevación digital.

## **Turbulencia y rugosidad del terreno.**

La turbulencia se refiere a los movimientos desordenados del viento compuestos por pequeños remolinos que se trasladan en las corrientes de aire. Puede ser de origen mecánica; debida a la fricción o de origen térmico, debido al gradiente de temperatura y depende de la naturaleza del suelo, es decir, la rugosidad o cizalladura del relieve.

La rugosidad del suelo expresa tanto las elevaciones superficiales del mismo, como los obstáculos que, al interactuar con el viento, pueden conducir a un retardo de su libre flujo cerca del suelo. El factor de rugosidad actúa en función de la clase de objetos que se encuentren al paso del viento y que puedan influir en su trayecto o velocidad, lo que acelera la erosión eólica a la que el terreno se ve sometido. Es así como los valores del recurso eólico son estimados, basados en la rugosidad de la superficie. Es decir, mientras más pronunciada sea la rugosidad del terreno, mayor será la disminución que experimente el viento al entrar en contacto con éste.

La humedad en superficie de un ecosistema y su relación con el gradiente de temperatura resulta crucial en la asignación de valores numéricos como índices de rugosidad para la zona a caracterizar.

Específicamente para México no existe una tabla definida con valores de rugosidad de acuerdo a sus características edafológicas y geomorfológicas, es por ello que para caracterizar los lugares donde se sitúan las estaciones meteorológicas, que son de específico interés, y por la necesidad de introducir un coeficiente de rugosidad en el programa de MatLab, se utilizó la tabla de rugosidad del proyecto SWERA (Tabla 1), respetando su clasificación, la cual tuvo como guía en su confección la descripción de rugosidad propuesta en el Atlas Eólico Europeo, junto a otras descripciones del terreno y la tabla de valores de rugosidad de la nota técnica No. 175 (OMM, 1984).

Como ejemplo práctico, se tomó una rugosidad de 0.0024m. tomada de dicha tabla, considerando las características similares con el paisaje circundante a la zona de la estación meteorológica, parámetro que fue introducido en el programa para calcular el perfil vertical de vientos (Fig. 2).

Los módulos de ajuste de potencia en el programa pueden activarse, mediante el coeficiente de rugosidad, para tomar en cuenta el bloqueo del flujo ambiental por terreno, la elevación relativa de ciertas regiones en particular, la aceleración y áreas mejoradas de flujo eólico, proximidad a lagos, océanos u otros cuerpos de agua extensos, o cualquier combinación de los anteriores, con la aportación dada por las descripciones topográficas generales clasificadas como terreno complejo (cerros y cordilleras), terreno complejo con grandes superficies planas, o zonas designadas como planas.

## **Resultados.**

El desarrollo del análisis del recurso eólico en Colima, Michoacán y Jalisco muestran áreas suficientes que, de acuerdo a lo que se estima, cuentan con recursos eólicos buenos a excelentes (clases de potencia del viento 4 a 7, donde 7 es el valor máximo aprovechable). Las mejores áreas de recurso eólico en Colima, por seguir con el ejemplo tomado, se concentran en la región costera del estado, principalmente en Manzanillo (Fig. 4), donde la mayor aportación oceánica de masas de aire se da desde la región Sur-Oeste, por la configuración prevaleciente de vientos. La estación meteorológica se encuentra en el centro del aeropuerto, lo que otorga la característica de una superficie libre de efectos orogénicos o topográficos. Como obstáculos podrían señalarse, por su cercanía, una cadena montañosa ubicada en dirección Este-Noreste,

con distancia mínima de 3 km por el extremo Este y variando hasta 6 km por el lado Norte, con alturas que varían desde los 100 hasta los 150m., respectivamente, mientras que en el extremo Sur, a una distancia de 200m. comienza el desarrollo de una superficie totalmente abierta, en presencia del océano, cuestión que le favorece.

Longitud de rugosidad, (m)	Tipo de paisaje
0,0002	Superficie de agua (mar abierto, lago, presa), con apariencia abierta de varios kilómetros.
0,0024	Terreno completamente abierto con una superficie lisa (por ejemplo: pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.); tierra desnuda, arena de costa (playas), vegetación de costa rocosa con alturas entre 0,5 y 1 m.
0,03	Área agrícola abierta sin cercados ni arbustos y con edificaciones muy dispersas. Solo colinas suavemente redondeadas. Vegetación de costa arenosa, herbazal de ciénaga, sabanas seminaturales y antrópicas.
0,055	Terreno agrícola con algunas casas y arbustos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 1 250 m. Vegetación de mogotes.
0,1	Terreno agrícola moderadamente abierto con algunas casas y arbustos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 500 m.
0,15	Cultivos bajos (caña de azúcar, tabaco, etc.); matorrales (marabú); plantaciones forestales jóvenes menores de 4 m (pinos, eucaliptos, majagua, etc.).
0,2	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 250 m. Bosque degradado 3-4 m de altura, bosque de galería y frutales.
0,3-0,35	Bosque semideciduo y bosque de mangles (mangle prieto, mangle rojo, llana y patabán).
0,4	Pueblos, ciudades pequeñas, suburbios, terreno agrícola con muchos o altos setos resguardantes, bosques de pinos y terreno accidentado y muy desigual.
0,5-0,9	Bosque pluvial y bosque siempre verde (ubicados en macizos montañosos).
1-2	Grandes ciudades con edificios muy altos.

Tabla 1. Tabla de rugosidad del proyecto SWERA.

En lo que respecta al método de interpolación de temperatura por el método de “Kriging”, la distribución de la información se realizó considerando los datos de los puntos cercanos (Fig.6), que mediante el gradiente altitudinal da como resultado información con mayor fiabilidad especialmente para regiones montañosas, donde existen contrastes de elevación muy marcados. No obstante este método no es recomendable para precipitación, evapotranspiración, velocidad del viento, o cualquier variable que no sea dependiente.

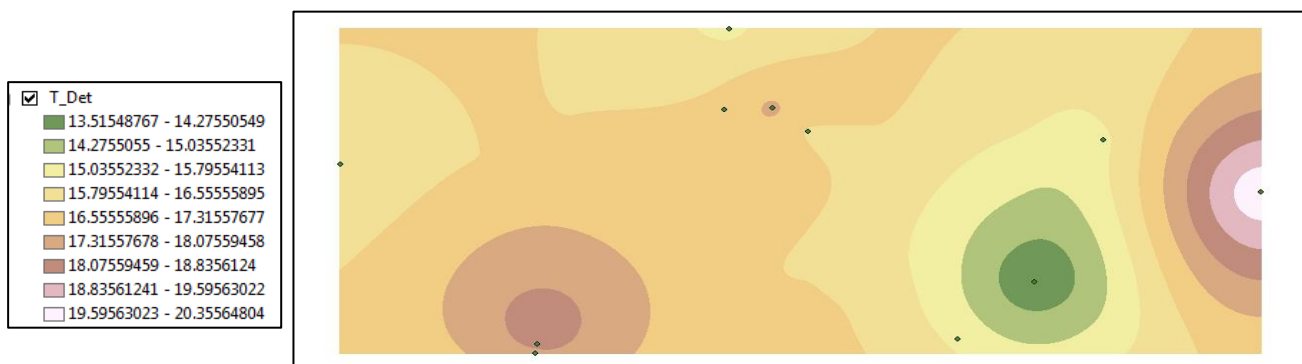
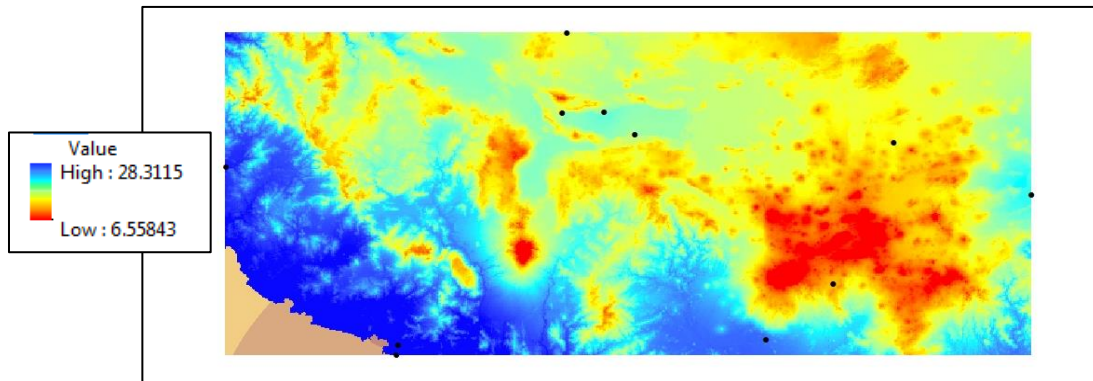


Fig. 6. Interpolación de la Temperatura para una EMA de Colima mediante el método "kriging". ARCGIS.

Dicha correlación, cargada sobre un ráster (DEM para Colima, Jalisco y Michoacán), puede usarse como un gradiente que permite integrar el territorio total y, a su vez, el factor multiplicador: la altitud (en este caso), para poder considerar el gradiente del mapa de calor, llevando la medición puntual de temperatura desde su posición original hasta los 2000m.s.n.m. y así, observar su comportamiento, mediante un coeficiente de relación dado por la gráfica de la variable con respecto a la altitud (Fig. 7).



**Fig. 7.** Comportamiento de la temperatura a una altura de 2000 m.s.n.m. sobre un modelo digital de elevaciones de Colima, Jalisco y Michoacán. ARCGIS.

## Conclusiones.

El desconocimiento del potencial energético y del recurso eólico en México, así como de una caracterización adecuada de rugosidad del terreno para el país, resultan obstáculos que limitan el aprovechamiento de la energía eólica, dando lugar a la posibilidad de que este hecho nos margine a una somera aproximación del potencial del recurso, por lo cual, para determinar instalaciones óptimas, es necesario llevar a cabo un trabajo de investigación exhaustivo e interdisciplinario entre profesionales de las diversas áreas de las Ciencias de la Tierra que en conjunto, analicen y caractericen mediante mapas o tablas los coeficientes de rugosidad para el territorio mexicano. Dichos mapas podrían generarse mediante la combinación de un modelo de elevación digital y una clasificación de la cubierta terrestre que proporcione la cubierta total vegetal y la presencia de obstáculos, en relación, por pixel, logrando así una correlación muy próxima, casi exacta, que permita delimitar zonas de óptimo aprovechamiento eólico.

Aunque las imágenes del recurso eólico obtenidas y el resto de la información provista por este trabajo ayudará a identificar aquellas áreas prospectivas para aplicaciones de energía eólica, se recomienda de manera vehemente que se lleven a cabo campañas de medición del viento para validar los estimados de recurso y los métodos de evaluación en el resto de la República Mexicana, lo que dará la oportunidad de obtener un mapa eólico de todo el país, de igual manera, dará la oportunidad de obtener bases de datos fiables y completas que, a su vez, podrían validarse con imágenes satelitales y en conjunto ser una herramienta práctica, ya que los resultados obtenidos *in situ* de las campañas revelarán una clara diferenciación entre las imágenes satelitales y la realidad. En parte provocado por los efectos de la dinámica de los fenómenos meteorológicos de mesoescala que influyen directamente en la cobertura del suelo, difiriendo continuamente.



Conclusamente, si se considerara la posibilidad del incremento en la proporción aprovechable de energía eólica en nuestro país, como uso de energía alternativa, sería predecible alcanzar una serie de mejoras en la red eléctrica local, y también medio-ambiental, tomando en cuenta que el índice de contaminante que produce la energía eólica es mínimo, lo que se traduce como ventajas económicas, sociales y ambientales.

### **Bibliografía.**

- Holttinen, Meibom, Orths, Frans Van Hulle, Ensslin, Hofmann, Pierik, Tande, Estanqueiro, Söder, Strbac, Parsons, Smith, Lemström: ***Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power, first results of IEA collaboration.***
- Reg Platt, Oscar Fitch-Roy and Paul Gardner: ***Beyond the bluster; why wind power is an effective technology.*** August 2012.
- Andreas Friesa, Rütger Rollenbeckb, Thomas Naußc, Thorsten Petersd and Jörg Bendixb: ***Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization.*** Volume 152, 15 January 2012.
- OMM. ***Tabla de valores de rugosidad. Aspectos metodológicos de la utilización del viento como fuente de energía.*** Ginebra: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Nota técnica No. 175, 1984. p. 150.