

Potencial de energía eólica en Costa Rica

ANA CECILIA MUÑOZ

Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica,
Cartago, Costa Rica

Walter Fernández, Jorge A. Gutiérrez y Eladio Zárate

**Laboratorio de Investigaciones Atmosféricas y Planetarias,
Escuela de Física y Centro de Investigaciones Geofísicas,
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica**

(Recibido 14 de febrero 2002, aceptado 20 de mayo de 2002)

ABSTRACT

The monthly and hourly distributions of the wind energy potential are analyzed for different regions of Costa Rica, where meteorological stations with wind records are available. The wind potential is estimated at 10 m above the ground.

The hourly average potential allows to group the different locations, according to the maximum hourly values, as follows:

From 0 to <50 W/m ² :	Upala, Santa Clara, Cobal, Limón, Hacienda El Carmen, Pindeco, Palmar Sur, Sabanilla, Puntarenas and Nicoya.
From 50 to <100 W/m ² :	Los Chiles, San José and Santa Cruz.
From 100 to <150 W/m ² :	Tierra Blanca.
From 150 to <200 W/m ² :	Fabio Baudrit and Liberia.
From 200 to <250 W/m ² :	Taboga.
From 250 to <300 W/m ² :	Aeropuerto Juan Santamaría.
From 300 to <550 W/m ² :	La Tejona

The station La Tejona presents the maximum values, reaching 389.3 W/m² in February.

From the results is important to notice that the production of electricity from wind energy is a good complement to the development of hydro-electrical energy. In the Pacific Watershed, the greater production of wind energy is possible during the dry season, when hydro-electrical energy may decrease. In addition, near noon, when the consumption of electricity is greater, the wind speed reaches its maximum values in its diurnal variation, which allows to obtain maximum values of the potential of wind energy.

1. Introducción

El término energía del viento o energía eólica describe el proceso a través del cual el viento es usado para generar energía mecánica o electricidad. Las turbinas de viento convierten la energía cinética del viento, en energía mecánica, la cual puede ser utilizada para triturar granos, para bombear agua ó para convertir esta energía mecánica en electricidad.

El aprovechamiento de la energía del viento se remonta a la historia temprana, ya que fue empleada para mover los barcos, moler los granos y para bombear agua. Existe evidencia de que la energía del viento fue utilizada para propulsar los barcos a lo largo del río Nilo en los 5000 a.C. Además algunos siglos antes de Cristo, los molinos de viento se usaban en China para bombear agua. En E.E.U.U., millones de molinos de viento se desarrollaron al final del siglo IX, muchos de ellos utilizados para bombear agua en fincas y haciendas. En 1900 pequeños sistemas de viento

1 Corresponding author address: Ana Cecilia Muñoz, Escuela de Física,
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
E-mail: cmunoz@itcr.ac.cr

Tabla 1. Valores de presión atmosférica en hPa en las estaciones Puntarenas y Limón.

MES	PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN HPa MEDIDA EN LA ESTACIÓN PUNTARENAS	PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN HPa MEDIDA EN LA ESTACIÓN LIMÓN	VALOR MEDIO DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN HPa
ENERO	1009	1012.9	1010.9
FEBRERO	1010	1013.1	1011.5
MARZO	1009	1012.4	1010.7
ABRIL	1009	1011.7	1010.4
MAYO	1010	1010.8	1010.4
JUNIO	1010	1010.7	1010.4
JULIO	1010	1011.3	1010.6
AGOSTO	1010	1011.0	1010.5
SETIEMBRE	1010	1010.4	1010.2
OCTUBRE	1010	1010.2	1010.1
NOVIEMBRE	1010	1010.8	1010.4
DICIEMBRE	1010	1011.8	1010.9

eléctricos fueron desarrollados para generar corriente directa. En 1910 generadores de turbinas de viento brindaron electricidad en muchas ciudades europeas.

La década de los años 80 se puede caracterizar como la época pre-comercial, con una gran producción de turbinas experimentales, algunos fracasos y la implemetación de las primeras generaciones de turbinas, sobre todo en los Estados Unidos y en menor cantidad en Dinamarca. La década de los 80 establece un gran avance tecnológico y económico.

La energía eólica tiene una ventaja con respecto a la hidráulica: su implementación es más rápida, por no necesitar obras civiles mayores. Un campo eólico de unos 20 MW de potencia instalada (por ejemplo 40 turbinas de 500 KW), se puede implementar en un año. Además, los transformadores de energía son modulares, consistiendo de unidades relativamente pequeñas. Si se presentan problemas o se necesita suministrar mantenimiento, únicamente la máquina afectada se apaga mientras que el resto del campo sigue produciendo. Además, la potencia instalada se puede incrementar paulativamente, aumentando el número de máquinas, si el sitio de emplazamiento así lo permite.

En Costa Rica la principal fuente de energía es la energía hidroeléctrica y aunque la energía eólica no se considera una sustitución o una comparación con el potencial hidroeléctrico con el que tiene el país, ésta puede representar una fuente de energía complementaria.

Aunque se han realizado algunos trabajos que han discutido en forma general la posibilidad de la explotación de la energía eólica en Costa Rica (ICE, 1979, 1980,

1985a,b; DSE, 1982; EES, 1984; Vindas, 1989), éstos utilizaron valores promedio mensual de la velocidad del viento, con registros bastante pequeños y solo para pocos lugares del país. Por este motivo, en este estudio se hace un trabajo más exhaustivo sobre el potencial de energía eólica en Costa Rica, haciendo uso de dos estudios previos sobre la variación estacional y horaria del viento en Costa Rica (Muñoz et al. 2002a, 2002b)

2. Energía eólica

La capacidad de un cuerpo para producir trabajo se llama energía y la energía se puede convertir de una a otra forma al realizar un trabajo.

La energía cinética del viento, energía de un cuerpo en movimiento, depende de su masa y de su velocidad. Al considerar el viento, aire en movimiento, como un flujo laminar con velocidad “v”, perpendicular a la sección transversal de un cilindro de área “A” y longitud “L”, se define su energía cinética como:

$$E = 0.5 m v^2 \quad (1)$$

m : masa de aire contenida en el cilindro de volumen A*L

v: velocidad del viento

Así, al calcular el flujo de energía por unidad de tiempo, se obtiene la siguiente expresión:

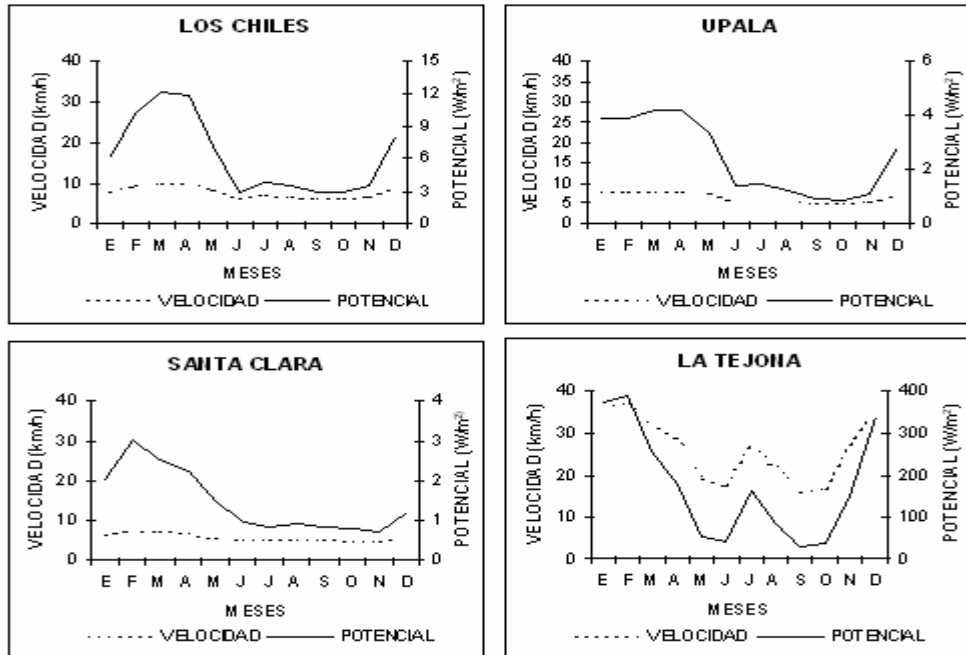


Figura 1: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Los Chiles (1991-93), Upala (1983-87), Santa Clara (1971-93) y La Tejona (1991-97).

$$dE/dt = P = d/dt (0.5 \rho A L V^2) = 0.5 \rho A v^2 (dL/dt)$$

$$P = 0.5 \rho A V^3 \quad (2)$$

A su vez, se define el potencial del viento “P/A”, como el flujo de energía por unidad de tiempo a través de un área A:

$$P/A = 0.5 \rho V^3 \quad (3)$$

- P/A : potencial del viento
- ρ : densidad del aire
- v : velocidad del viento

Es decir, la energía por unidad de tiempo extraída del aire por un sistema eólico, se expresa en términos del flujo de energía cinética que pasa a través del área barrida por la turbina y por lo tanto es proporcional a la densidad del aire y al cubo de la velocidad del viento. (Rohatgi et al., 1994).

La densidad del aire en condiciones estándar (nivel del mar, 0°C) tiene un valor de 1.2929 Kg/m³. Para sitios con altitudes de 500 metros o más sobre el nivel del mar, la densidad del aire puede calcularse por medio de la ecuación barométrica:

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-\rho_0 g h / P_0) \quad (4)$$

- ρ_0 : densidad del aire
- P_0 : presión al nivel del mar
- g : valor de la gravedad

Una turbina no puede extraer toda la energía que posee el viento, razón por la cual la potencia de la turbina se expresa en función de un factor de rendimiento o eficiencia llamado el coeficiente de potencia C_p :

$$P/A = C_p 0.5 \rho V^3 \quad (5)$$

En 1929, A. Betz demostró que un convertidor óptimo de energía del viento, puede extraer un máximo de 16/27 de la energía contenida (EES, 1984), de manera que el potencial máximo que puede producir una turbina ideal de viento es:

$$P/A_{\max} = 0.59 (0.5 \rho V^3) \quad (6)$$

En la práctica, el potencial obtenido por un convertidor real de energía del viento es menor que P_{\max} , y depende del tipo de equipo y de su operación. La eficiencia de los convertidores típicos varía entre 0.15 y 0.5, (EES, 1984).

3. Factores que afectan el potencial del viento

Los factores que pueden limitar la obtención de la energía potencial del viento, se pueden clasificar en técnicos, económicos y otros (EES, 1984).

Los factores técnicos consideran la cantidad máxima de energía que puede ser extraída del flujo de aire, de acuerdo al sistema de conversión utilizado. Además, el funcionamiento de una turbina de viento puede ser afectado

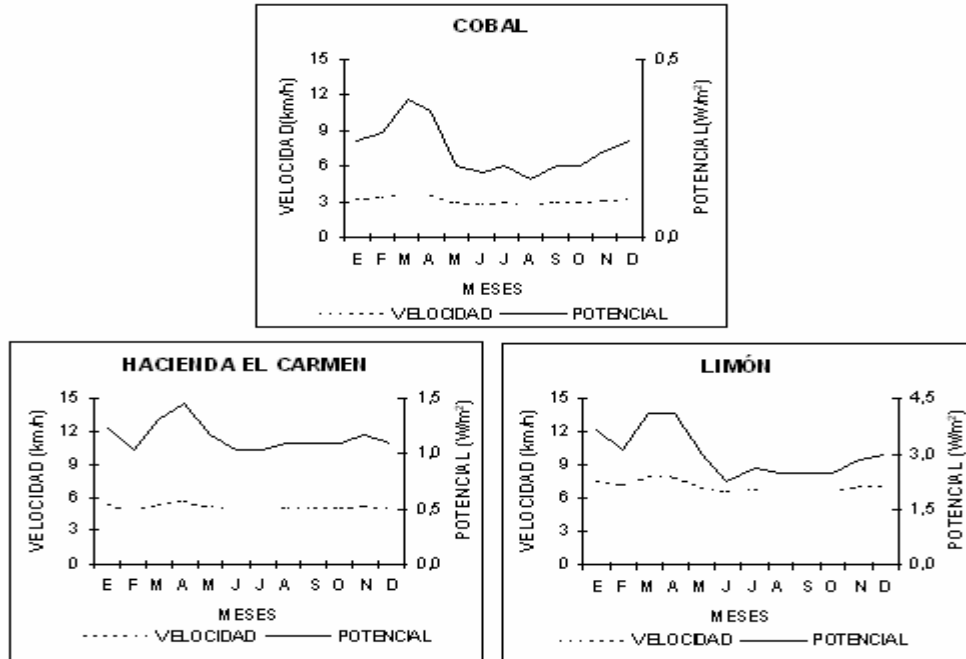


Figura 2: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Cobal (1971-76), El Carmen (1981-96) y Limón (1971-98).

por la frecuencia de ocurrencia de velocidades extremas. Por último, se considera la capacidad de aprovechamiento y almacenamiento de energía e instalaciones de respaldo, en función del potencial de energía útil del viento. Además, es conveniente combinar este método de producción de energía con otro, como el hidroeléctrico, para lograr la mayor efectividad en la producción de electricidad.

Los factores económicos, comunes al desarrollo de otros proyectos de energía, toman en cuenta el costo de la electricidad generada por la energía del viento, así como el financiamiento de la obra. También considera el impacto macro-económico, la competencia con otras fuentes de energía y por supuesto la demanda y oferta de la energía.

Como factores restantes se consideran los problemas de aceptación, la disponibilidad de un terreno, el impacto sobre la agricultura y la oferta de la mano de obra local.

4. Variación de la rapidez con la altura

La rapidez del viento que es de interés para aplicaciones eólicas se ve afectada por la interacción con el terreno y su rugosidad. Esta interacción tiene dos efectos principales: provoca una disminución de la velocidad y es una de las causas de la turbulencia.

Comúnmente, la velocidad del viento se mide a una altura de 10 m sobre el terreno, pero para ciertas estaciones consideradas en este estudio, la velocidad se ha medido a una altura diferente. También es importante tomar en cuenta que la posición del eje de una turbina eólica se instala a una altura de 30 m ó a 50 m sobre el terreno.

Para aproximar la distribución de la velocidad del viento con la altura H y poder obtener un valor de la rapidez a la altura del eje V_H , relacionada con la rapidez medida en

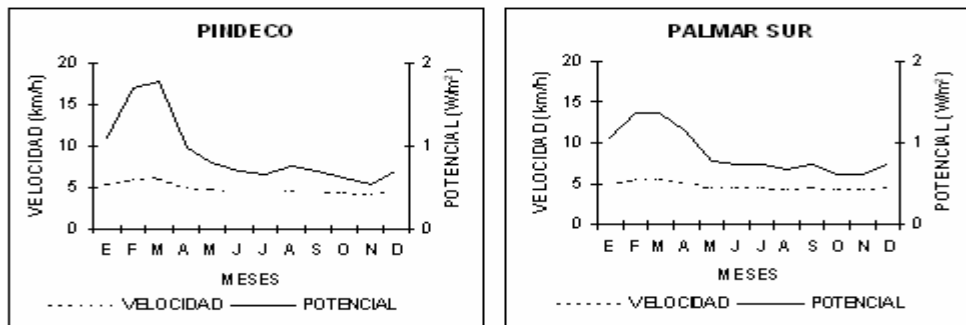


Figura 3: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Pindeco (1971-76) y Palmar Sur (1974-92).

MUÑOZ: Potencial de energía eólica en Costa Rica

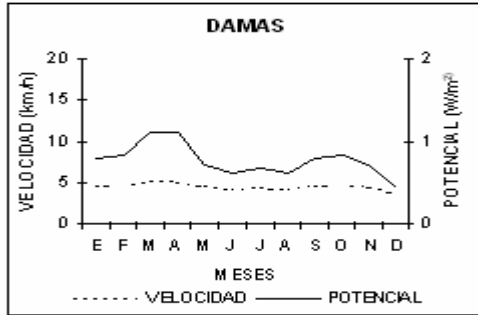


Figura 4: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estación Damas (1983-93).

el nivel de referencia V_{ref} , se utilizan diferentes expresiones analíticas. La más sencilla es:

$$V_H / V_{ref} = (H / H_{ref})^x \quad \text{para } H < 80 \text{ m} \quad (7)$$

El parámetro “x” depende de las condiciones del terreno, sobre todo de su rugosidad. Su valor puede variar desde 0.06 para terrenos abiertos al lado del mar, hasta 0.60 para superficies muy rugosas, como el de una ciudad. Un valor utilizado en estudios genéricos, sin especificar el tipo de terreno, es $x = 1/7$ ó 0.14, (Snell, 1995).

Se supone que la influencia directa de la rugosidad sobre la distribución de la velocidad con la altura, no se extiende más allá de los 60 a 80 m sobre el nivel de referencia. Para elevaciones mayores, la rapidez cambia con la altura pero a consecuencia de la viscosidad del aire y de la turbulencia de escala más grande que la causada por la rugosidad del terreno.

El valor real de “x” para un sitio dado, se determina con la ayuda de mediciones de la rapidez a diferentes alturas. Los valores dados son promediados sobre mucho tiempo, tendiendo a valores válidos para una atmósfera neutralmente estable.

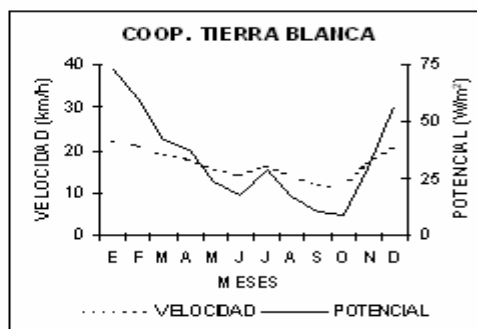
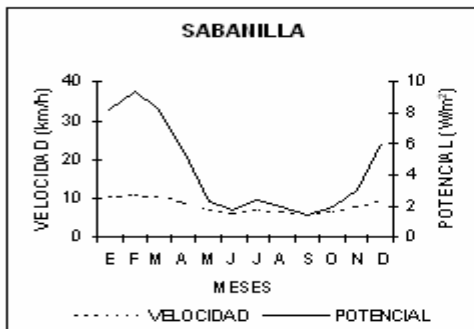
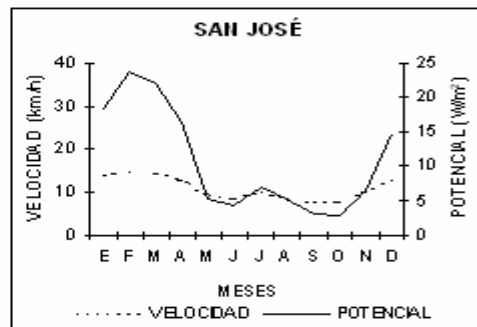
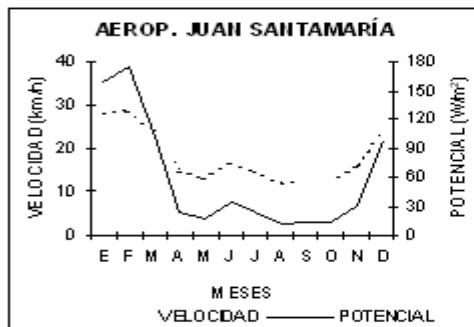
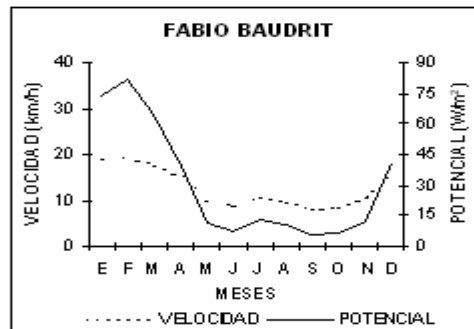


Figura 5: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Fabio Baudrit (1974-93), Aeropuerto Juan Santamaría (1974-97), San José (1971-81) y Sabanilla (1985-93) y Tierra Blanca (1986-90).

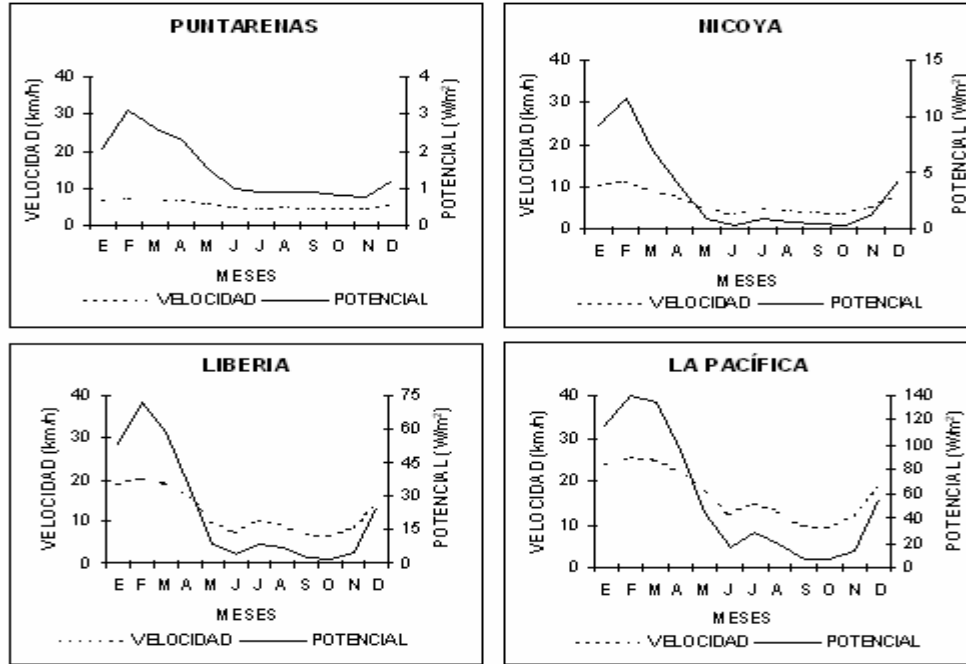


Figura 6: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Puntarenas (1971-93), Nicoya (1971-84), Liberia (1974-94) y La Pacifica (1983-87).

5. Distribución estacional del potencial del viento

En esta sección se analiza la distribución a lo largo del año de la magnitud del potencial del viento a una altura de 10 m sobre el terreno. Las estaciones escogidas para este

estudio son las mismas estaciones mostradas en Muñoz et al. (2002a).

Se presentan los gráficos que muestran la distribución mensual de la rapidez del viento en km/h y la distribución del potencial del viento $(P/A)_{\text{máx}}$ en Watts/m^2 .

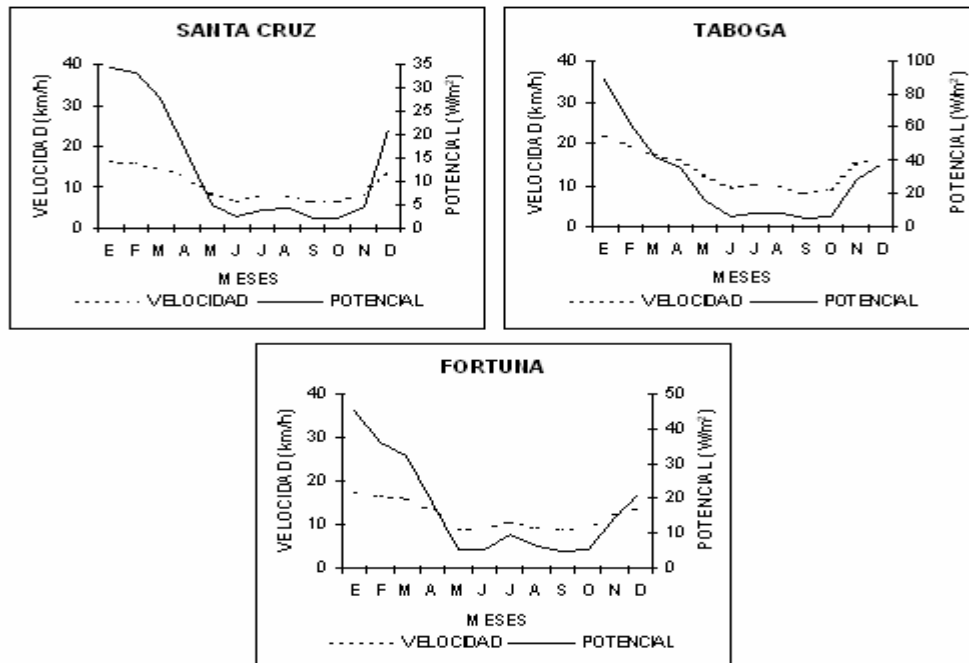


Figura 7: Distribución mensual de la velocidad del viento y del potencial eólico en las estaciones Santa Cruz (1984-93), Taboga (1983-87) y Fortuna (1976-86).

MUÑOZ: Potencial de energía eólica en Costa Rica

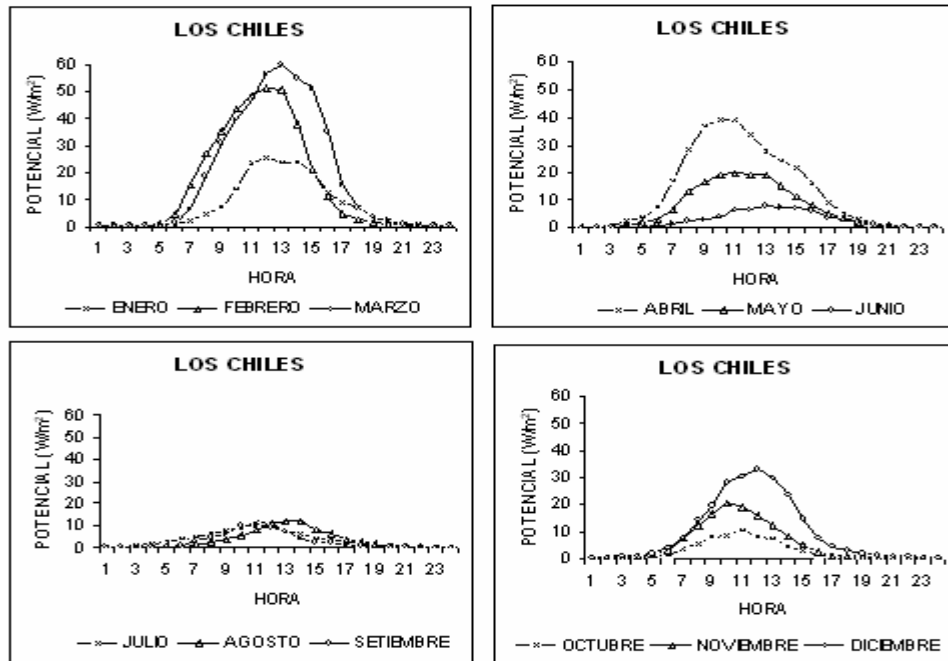


Figura 8: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Los Chiles (1991-94) y para los meses mostrados.

El cálculo del potencial del viento se realizó con el valor de la rapidez media mensual, evaluada en toda la serie disponible para cada estación, con la ecuación (5.5) y considerando $C_p = 0.6$, para todas las estaciones consideradas en esta investigación. Para calcular la densidad del aire a la altura a la cual se mide o se calcula la

rapidez, se utiliza como valor de la presión a nivel del mar, el valor promedio de las presiones medidas de las estaciones de Puntarenas y Limón.

La Tabla 1 muestra los valores de la presión atmosférica para todos los meses del año, en las estaciones Puntarenas y Limón.

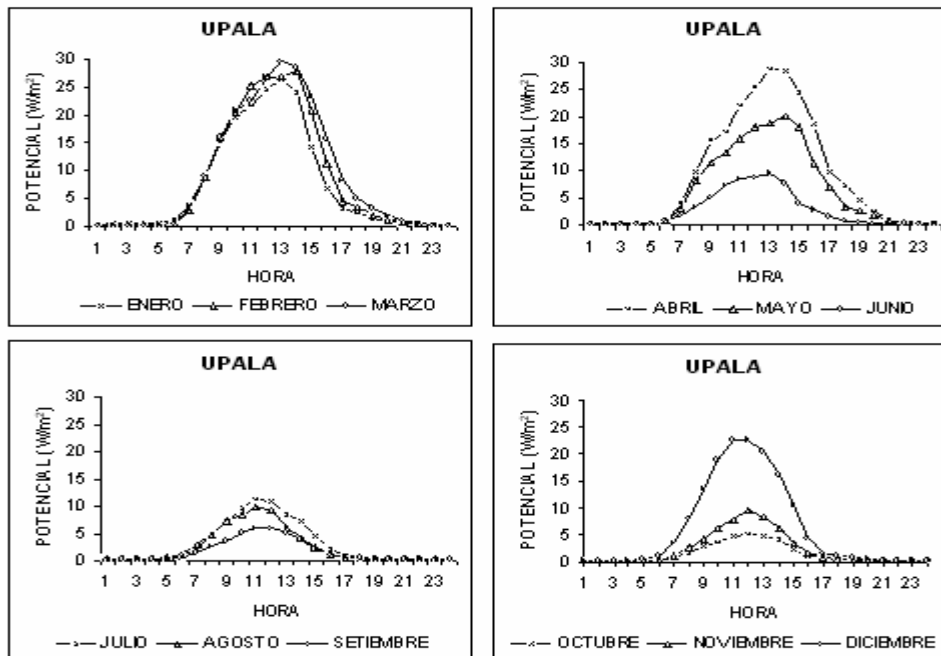


Figura 9: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Upala (1983-87) y para los meses mostrados.

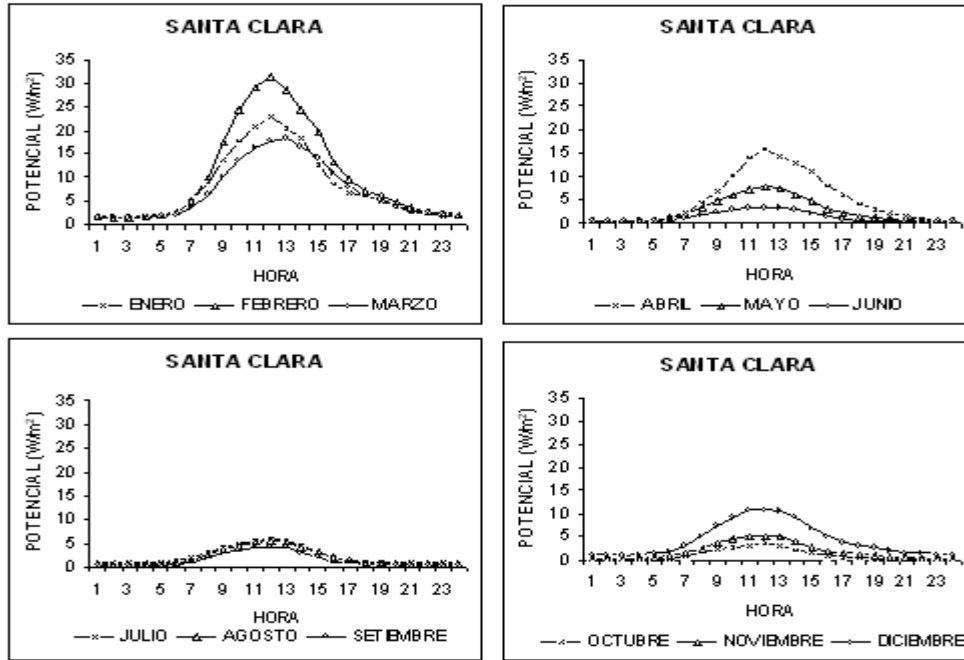


Figura 10: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Santa Clara (1983-97) y para los meses mostrados.

Es importante señalar que los gráficos no muestran la distribución mensual del valor promedio del potencial del viento, ya que ello implicaría que la velocidad promedio mensual del viento, se mantiene constante durante todo el mes.

Las estaciones se han agrupado de acuerdo a la

clasificación de las regiones del país presentadas en Muñoz et al. (2002a).

Zona Norte

La distribución mensual del potencial del viento en las

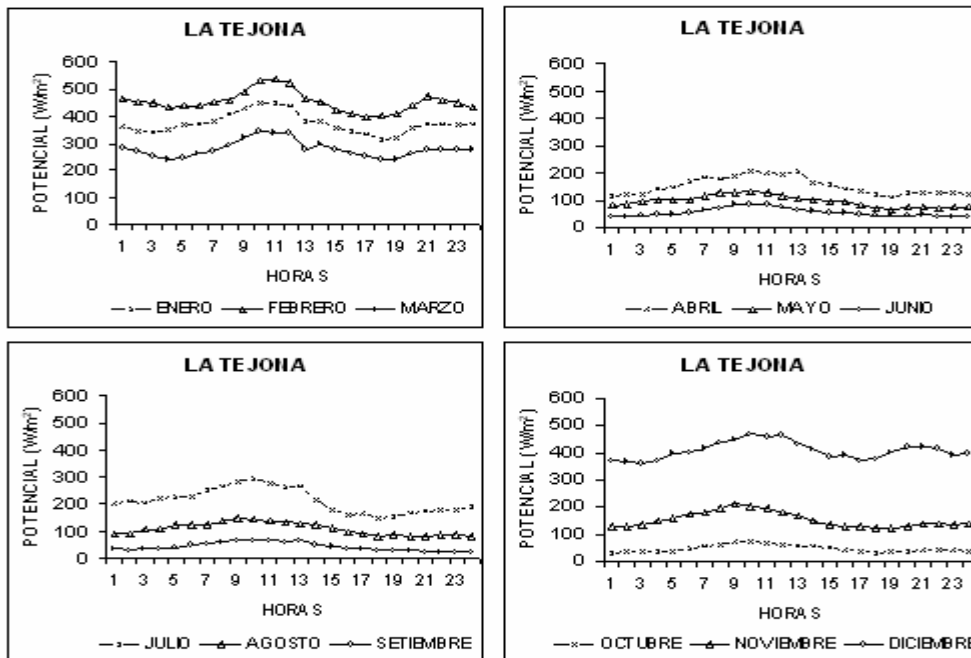


Figura 11: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación La Tejona (1991-97) y para los meses mostrados.

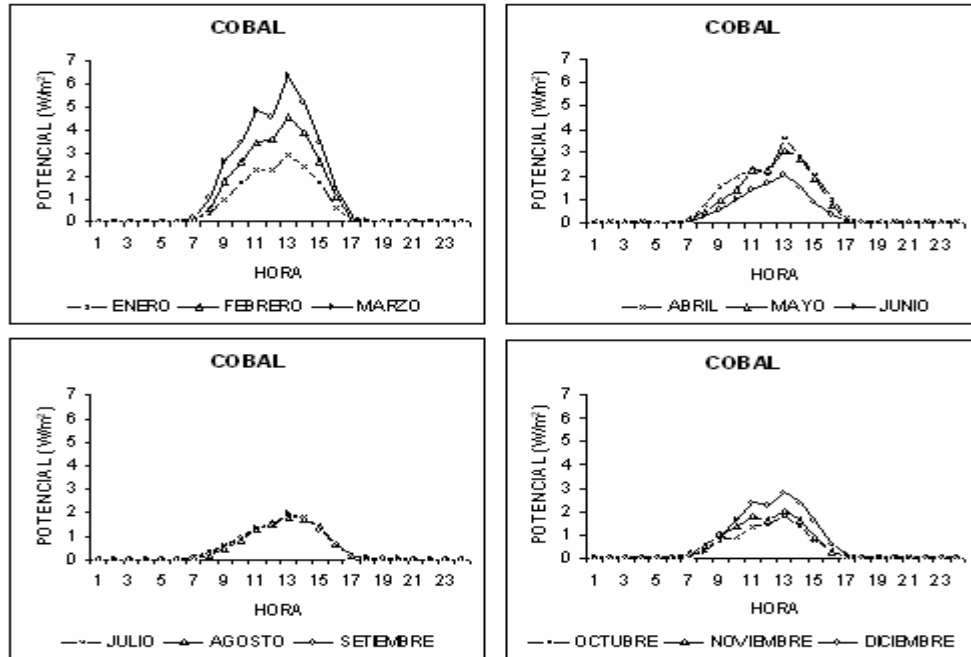


Figura 12: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Cobal (1971-76) y para los meses mostrados.

estaciones Los Chiles, Upala, Santa Clara y La Tejona se presentan en la Figura 1. Las tres estaciones muestran distribuciones muy parecidas entre sí y se puede notar cómo un pequeño aumento en la velocidad del viento, produce un gran aumento en el valor del potencial, debido a la dependencia del potencial del viento con el cubo de la rapidez.

Los valores máximos del potencial ocurren de diciembre a abril y varían entre 3.0 W/m^2 en Santa Clara y 389.3 W/m^2 en La Tejona.

Región Caribe

Las estaciones Cobal, El Carmen y Limón, ubicadas en la Región Caribe, presentan también distribuciones anuales del potencial del viento muy parecidas entre sí (Figura 2).

Los valores máximos del potencial del viento se presentan entre los meses de febrero y abril. La estación Limón, posee los valores más altos del potencial con un máximo de 4.1 W/m^2 y la estación Cobal muestra los valores más bajos, con un máximo de 0.4 W/m^2 .

Pacífico Sur

La distribución del potencial del viento mensual en las estaciones Pindeco y Palmar Sur, ubicadas en la región del Pacífico Sur, se caracteriza por presentar los valores máximos durante los meses de febrero y marzo (Figura 3). Ambas estaciones generan valores del potencial del viento, menores a 2.0 W/m^2 .

Pacífico Central

La estación Damas, ubicada en la región Pacífico Central, muestra una distribución mensual del potencial del viento, similar a la de las estaciones ubicadas en la región del Pacífico Sur (Figura 4). Los valores máximos de alrededor de 1.1 W/m^2 , se observan durante los meses de marzo y abril.

Valle Central

Las estaciones Fabio Baudrit, Aerop. Juan Santamaría, San José, Sabanilla y Tierra Blanca, presentan una distribución del potencial del viento mensual, con valores altos en diciembre y los primeros meses del año (Figura 5).

La estación Sabanilla muestra un aumento en el potencial, en el mes de abril, mientras que las otras estaciones, en el mes de junio. Los valores máximos para este grupo de estaciones varían entre 9.3 W/m^2 en Sabanilla y 173.4 W/m^2 en la estación del Aeropuerto Juan Santamaría.

Pacífico Norte

Las estaciones Puntarenas, Nicoya, Liberia y La Pacífica, ubicadas en el Pacífico Norte, presentan distribuciones del potencial eólico muy parecidas entre sí, con valores altos en los primeros meses del año. (Figura 6). Los máximos se observan en el mes de febrero alcanzando valores entre 3.1 W/m^2 en Puntarenas y 140.5 W/m^2 en La

Pacífica.

En la región del Pacífico Norte también se localizan las estaciones Santa Cruz, Taboga y Fortuna. Estas estaciones poseen una distribución similar a las estaciones anteriores (Figura 7), pero presentan una disminución del potencial a partir del mes de enero. En ellas encontramos valores máximos entre y 34.4 W/m^2 en Santa Cruz y 88.4 W/m^2 en Taboga.

6. Distribución horaria del potencial de energía eólica

En esta sección se analiza la distribución horaria de la magnitud del potencial del viento a una altura de 10 m sobre el terreno, para las mismas estaciones analizadas en la sección anterior.

La magnitud del potencial del viento depende directamente del cubo de la magnitud de la velocidad. Es así como la distribución horaria del potencial eólico tiene una forma semejante con la de la rapidez del viento, pero es importante hacer notar que para un cambio moderado en la magnitud de la velocidad del viento se obtiene un aumento apreciable en el valor del potencial eólico.

Este análisis permite observar con mayor detalle las variaciones del potencial eólico en función de las diferencias en la magnitud de la velocidad, hora a hora.

Los gráficos que se presentan a continuación, muestran la variación del potencial eólico promedio horario en W/m^2 , utilizando el valor promedio horario de la rapidez a 10 metros de altura. A su vez, no muestran la distribución

horaria del valor promedio del potencial del viento, ya que la velocidad del viento no se mantiene constante durante toda la hora.

El potencial eólico se calculó con la ecuación (5.5) y considerando $C_p = 0.6$.

Zona Norte

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Los Chiles se presenta en la Figura 8.

Los valores máximos se presentan entre las 10 y las 14 horas, variando entre 7.99 W/m^2 en junio y 60.1 W/m^2 en marzo y los valores mínimos, durante la noche y la madrugada varían entre 0.18 W/m^2 en agosto y 0.49 W/m^2 en diciembre.

En la Figura 9 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Upala. Los valores máximos, variando entre 5.2 W/m^2 en octubre y 29.5 W/m^2 en marzo, ocurren entre las 11 y las 14 horas. Los valores mínimos se presentan en las horas de la noche y la madrugada y varían entre 0.1 W/m^2 en agosto y 0.3 W/m^2 en diciembre.

La Figura 10 muestra la distribución del potencial horario promedio para todas las horas del día en la estación Santa Clara. Los valores máximos se presentan entre las 11 y las 13 horas, variando entre 3.2 W/m^2 en octubre y 31.4 W/m^2 en febrero. Los valores mínimos varían entre 0.2 W/m^2 en setiembre y octubre y 1.6 W/m^2 en febrero y se aprecian en las horas de la noche y la madrugada.

La distribución horaria del potencial del viento en la

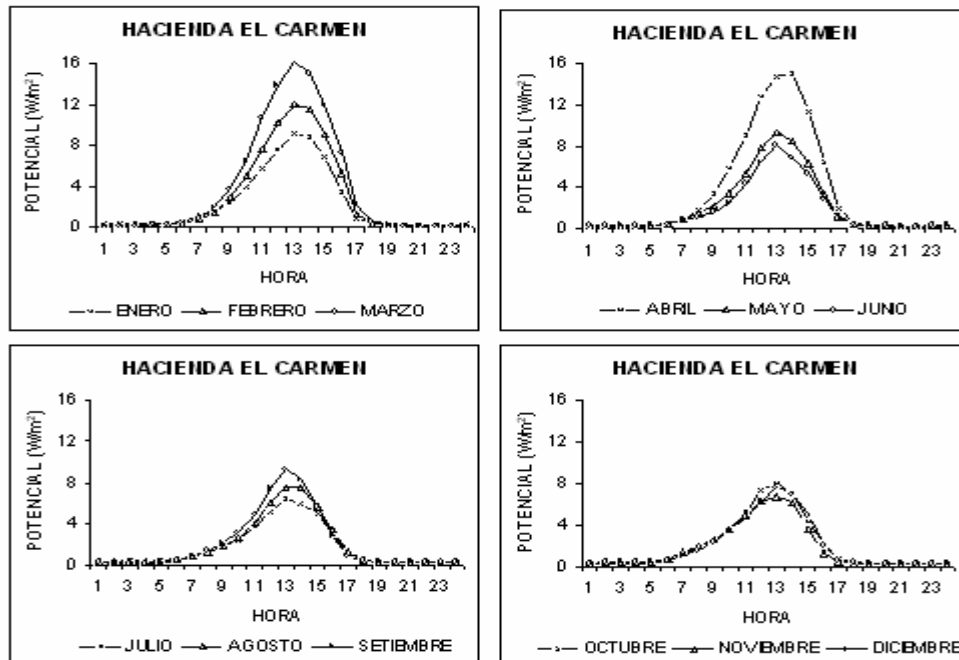


Figura 13: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Hacienda El Carmen (1982-98) y para los meses mostrados.

MUÑOZ: Potencial de energía eólica en Costa Rica

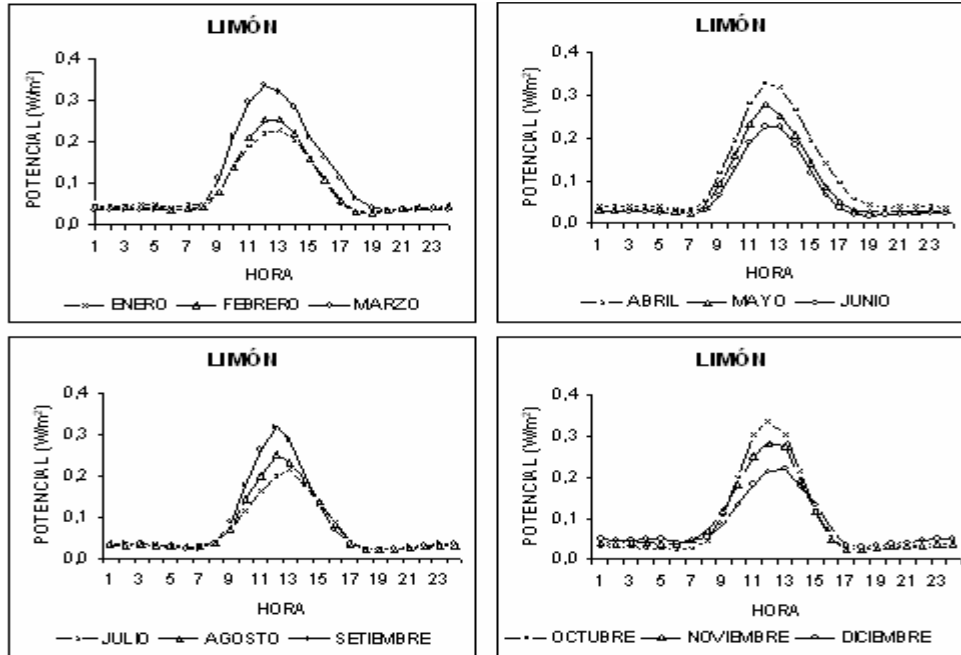


Figura 14: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Limón (1970-96) y para los meses mostrados.

estación La Tejona se observa en la Figura 11. Los valores máximos se presentan entre las 8 y las 11 horas, variando entre 69.6 W/m^2 en setiembre y 537 W/m^2 en febrero. Los valores mínimos varían entre 41.0 W/m^2 en junio y 397.1 W/m^2 en febrero y se presentan en las horas de la tarde y de la noche.

Región Caribe

La estación Cobal (Figura 12) presenta una distribución horaria del potencial del viento con las siguientes características. En el mes de febrero se observa un valor máximo de 6.4 W/m^2 y en los meses de agosto y

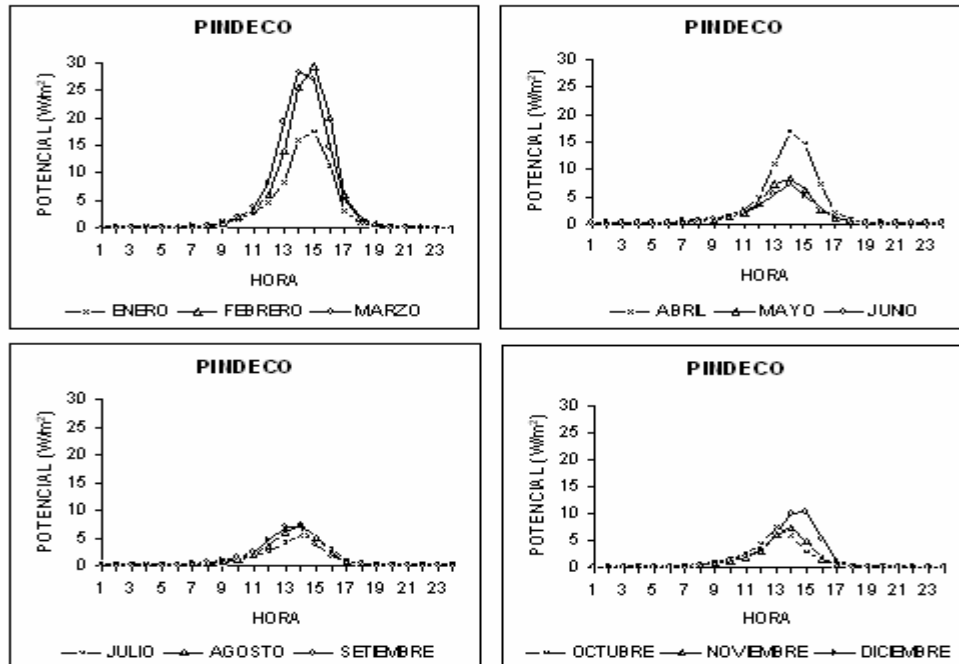


Figura 15: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Pindeco (1985-96) y para los meses mostrados.

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

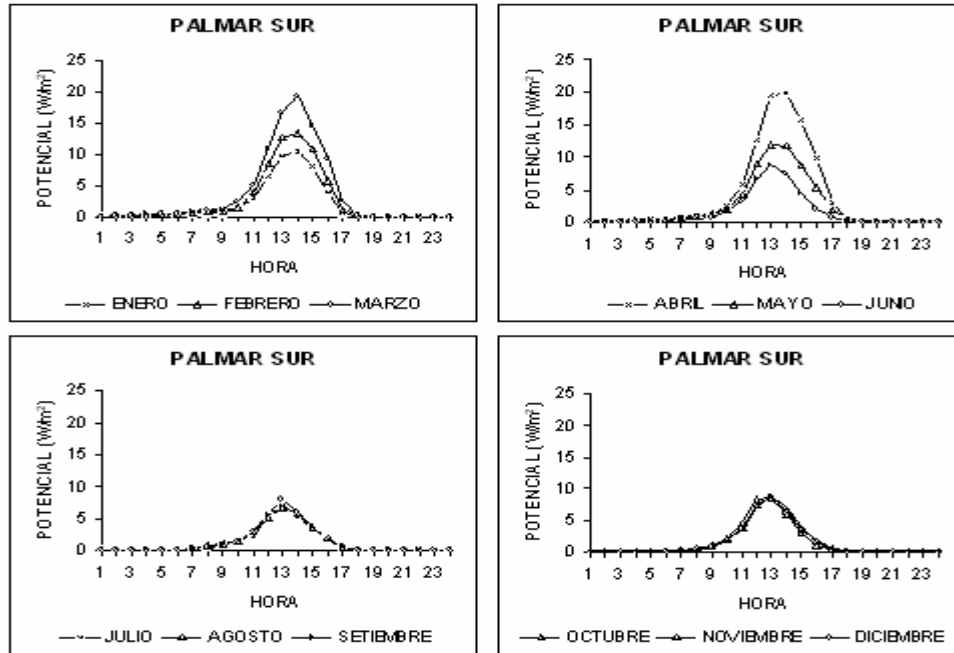


Figura 16: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Palmar Sur (1973-93) y para los meses mostrados.

octubre los valores altos apenas alcanzan 1.8 W/m^2 , produciéndose todos a las 13 horas. Los valores mínimos, cercanos a 0.1 W/m^2 , están presentes en las horas de la noche y de la madrugada de todo el año.

La distribución horaria del potencial del viento en la

estación El Carmen, se expone en la Figura 13. Los valores máximos se presentan entre las 13 y las 14 horas, variando entre 6.5 W/m^2 en julio y 16.2 W/m^2 en marzo y los valores mínimos, durante la noche y la madrugada varían entre 0.2 y 0.3 W/m^2 .

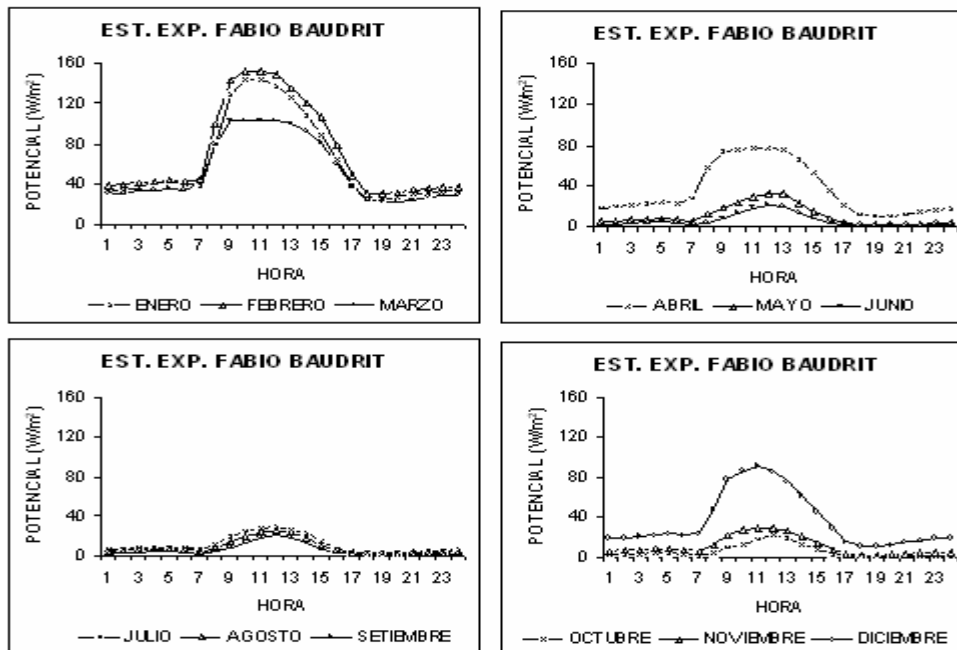


Figura 17: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la Estación Experimental Fabio Baudrit (1973-94) y para los meses mostrados.

MUÑOZ: Potencial de energía eólica en Costa Rica

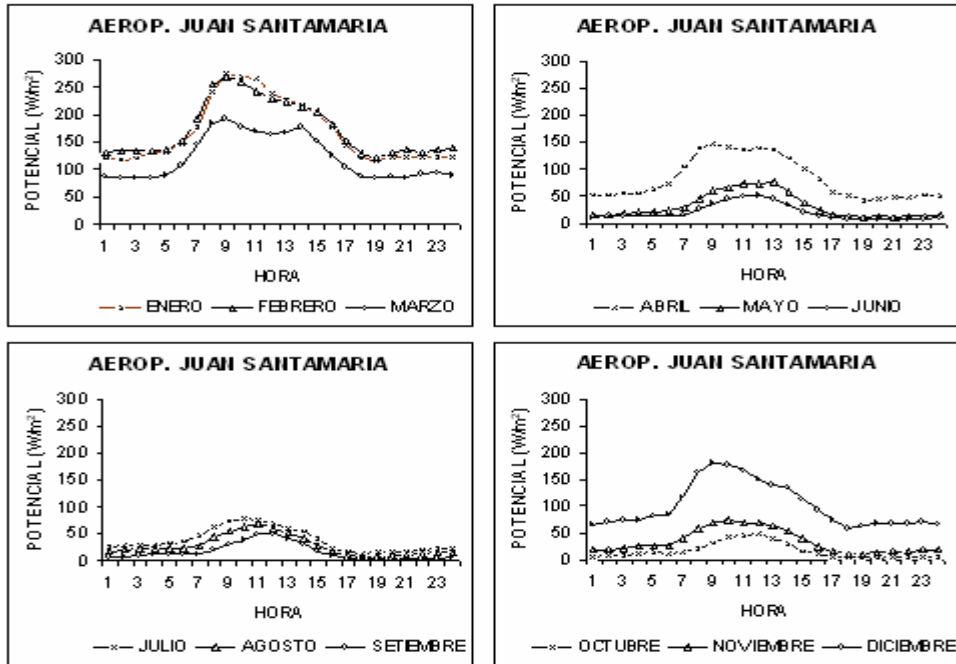


Figura 18: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Aeropuerto Juan Santamaría (1972-98) y para los meses mostrados.

En la Figura 14 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Limón. Los valores del potencial para todas las horas del día a través de todo el año

son muy parecidos y varían entre 0.0 y 0.3 W/m². Los valores máximos se efectúan entre las 11 y las 15 horas.

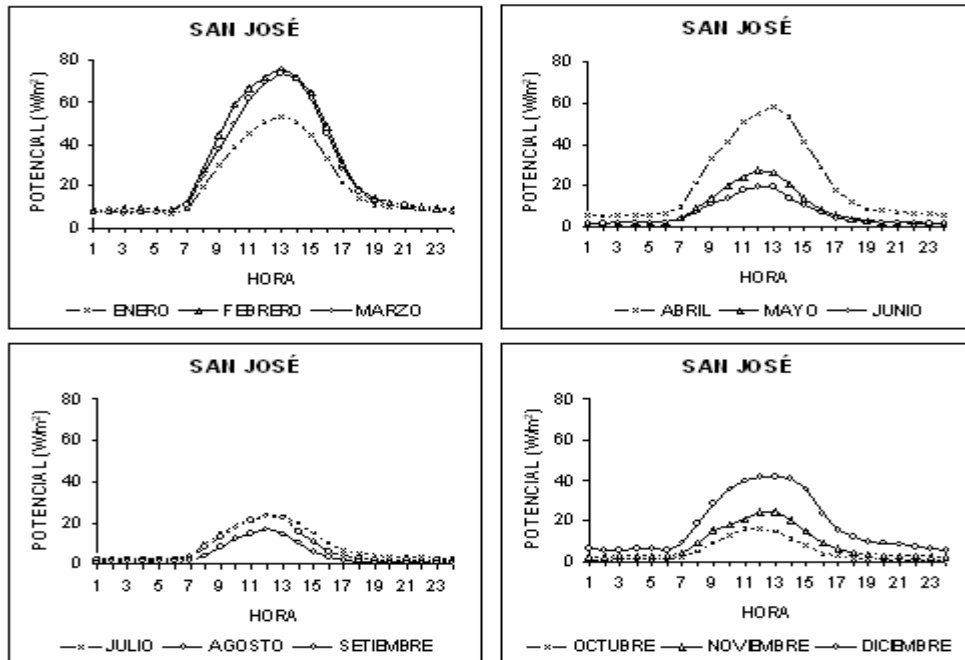


Figura 19: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación San José (1970-80) y para los meses mostrados.

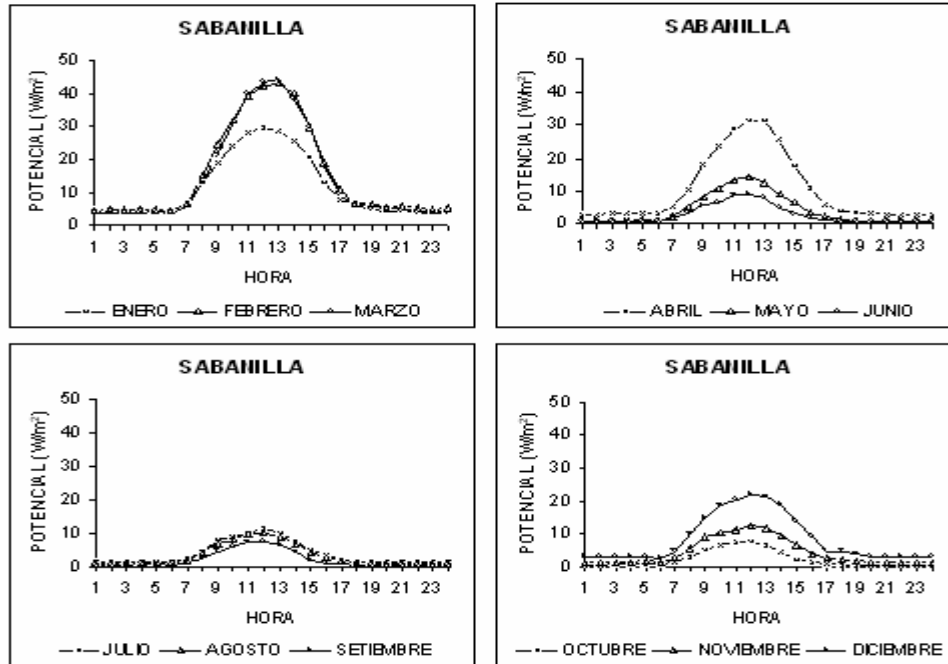


Figura 20: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Sabanilla (1982-95) y para los meses mostrados.

Pacífico Sur

En la Figura 15 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Pindeco. Los valores

máximos, variando entre 5.5 W/m^2 en julio y 29.5 W/m^2 en febrero, se presentan entre las 13 y las 15 horas y los mínimos, alrededor de 0.1 W/m^2 , ocurren en las horas de la noche y la madrugada.

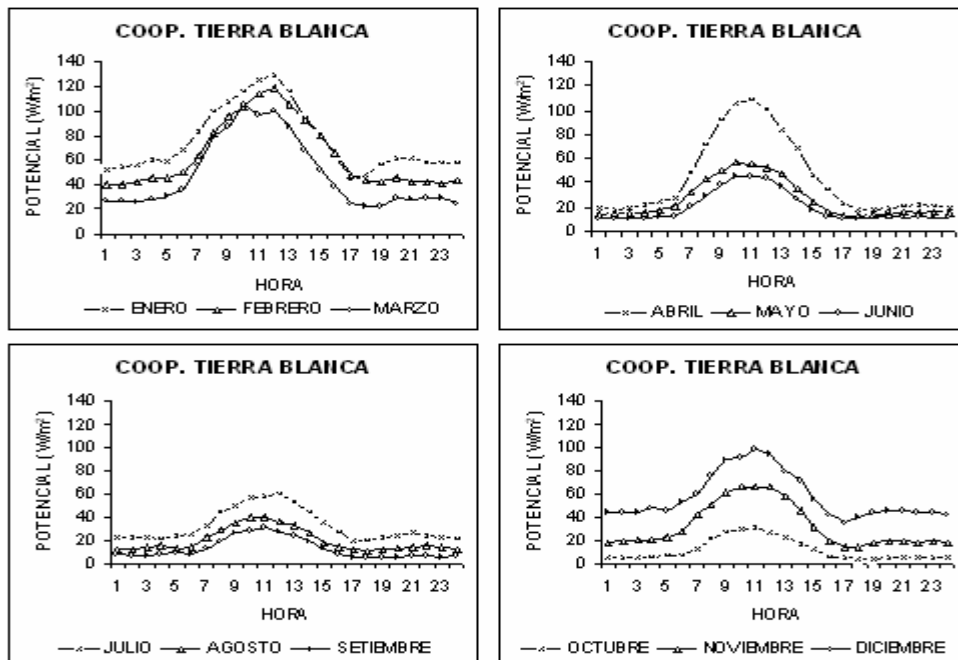


Figura 21: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Coop. Tierra Blanca (1986-90) y para los meses mostrados.

MUÑOZ: Potencial de energía eólica en Costa Rica

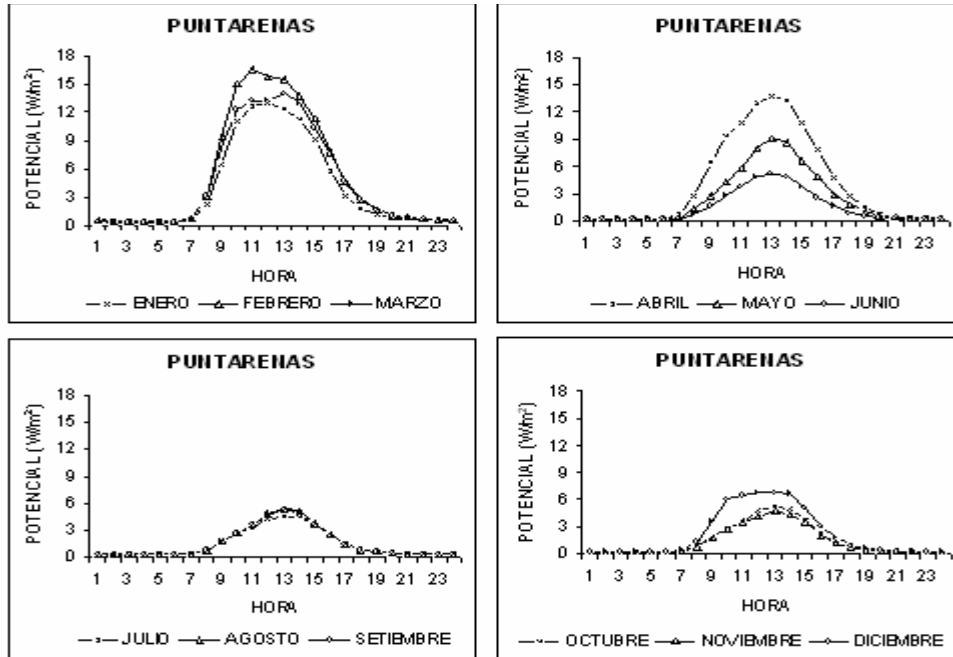


Figura 22: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Puntarenas (1971-94) y para los meses mostrados.

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Palmar Sur se muestra en la Figura 16. La distribución posee las siguientes características. Se observa que los valores máximos se dan entre las 13 y 14 horas y varían entre 6.8 W/m^2 en el mes de agosto y 19.8 W/m^2 en abril. Los valores mínimos, cercanos a 0.1 W/m^2 , están

presentes en las horas de la noche y de la madrugada de todo el año.

Valle Central

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Fabio Baudrit se expone en la Figura 17. Los

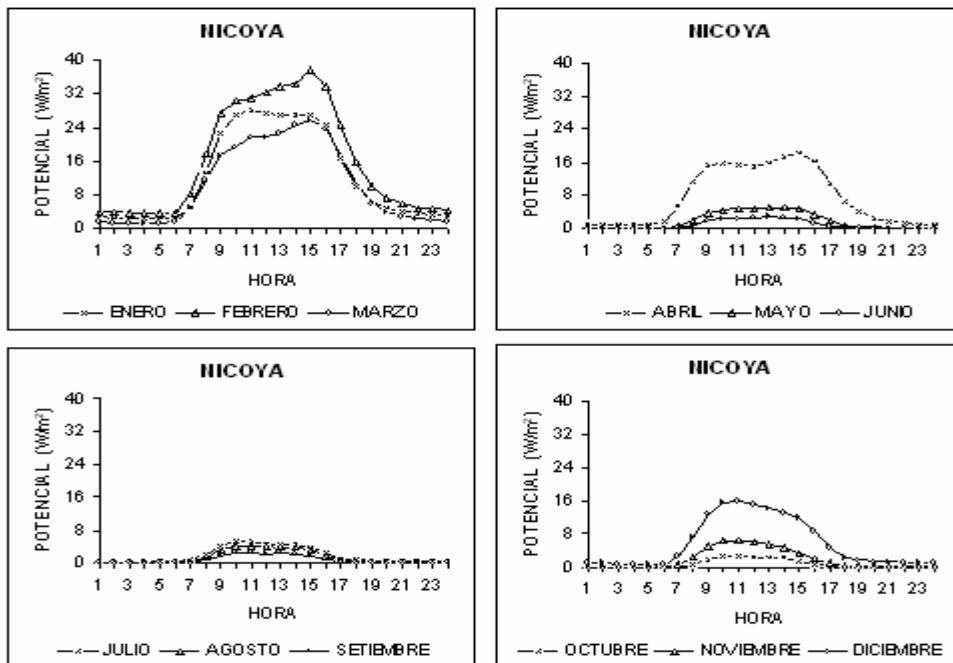


Figura 23: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Nicoya (1971-83) y para los meses mostrados.

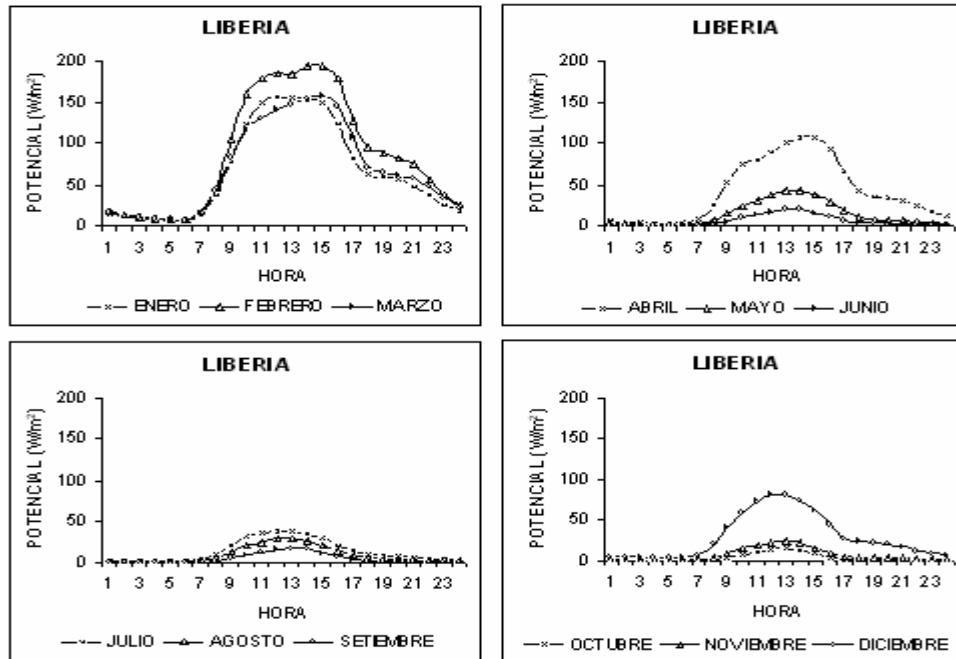


Figura 24: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Liberia (1974-99) y para los meses mostrados.

valores máximos se presentan entre las 10 y las 12 horas, variando entre 20.8 W/m² en setiembre y 151.1 W/m² en febrero y los valores mínimos, durante la noche y la madrugada varían entre 1.0 W/m² entre junio y octubre y 25.1 W/m² en enero.

En la Figura 18 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Aeropuerto Juan Santamaría. Los valores máximos, variando entre 47.2 W/m² en octubre y 273.3 W/m² en enero, se presentan entre las 9 y las 13 horas. Los valores mínimos perduran con mayor frecuencia en las horas de la noche y varían entre 3.8 W/m² en octubre y 127.5 W/m² en febrero.

La Figura 19 muestra la distribución del potencial horario promedio para todas las horas del día en la estación San José. Los valores máximos se observan entre las 11 y las 13 horas, variando entre 17.1 W/m² en setiembre y 75.7 W/m² en febrero. Los valores mínimos varían entre 0.8 W/m² en setiembre y octubre y 8.5 W/m² en febrero y se presentan en las horas de la noche y la madrugada.

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Sabanilla se observa en la Figura 20. Esta distribución presenta las siguientes características. Los valores máximos, que varían entre 7.6 W/m² en setiembre y 44.4 W/m² en el mes de marzo, ocurren entre las 12 y las 13 horas y los valores mínimos, presentes en las horas de la noche y de la madrugada, varían entre 0.3 W/m² en setiembre y 4.2 W/m² en los meses de enero y febrero.

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Coop. Tierra Blanca, se muestra en la Figura 21. Los valores máximos se presentan entre las 10 y las 12

horas, variando entre 30.4 W/m² en setiembre y 126.6 W/m² en enero y los valores mínimos, durante la noche y la madrugada varían entre 3.7 W/m² en octubre y 45.2 W/m² en enero.

Pacífico Norte

En la Figura 22 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Puntarenas. Los valores máximos se presentan entre las 11 y las 13 horas y varían entre 4.6 W/m² en julio y 16.6 W/m² en febrero. Los valores mínimos, durante las horas de la noche y la madrugada varían entre 0.2 y 0.4 W/m².

En la Figura 23 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Nicoya. Los valores máximos, variando entre 2.3 W/m² en setiembre y 37.6 W/m² en febrero, se presentan entre las 11 y las 15 horas. Los valores mínimos, alrededor de 0.1 W/m² y hasta 3.7 W/m² en febrero, son notorios en las horas de la noche y la madrugada.

La estación Liberia (Figura 24) presenta las siguientes características en su distribución horaria del potencial del viento. Se observa que los valores máximos se dan entre las 12 y 15 horas y varían entre 14.8 W/m² en el mes de octubre y 192.3 W/m² en febrero. Los valores mínimos, variando entre 0.3 W/m² en setiembre y octubre y 8.8 W/m² en febrero, están visibles en las horas de la noche y de la madrugada.

La distribución horaria del potencial del viento en la estación Santa Cruz se muestra en la Figura 25. Los valores

MUÑOZ: Potencial de energía eólica en Costa Rica

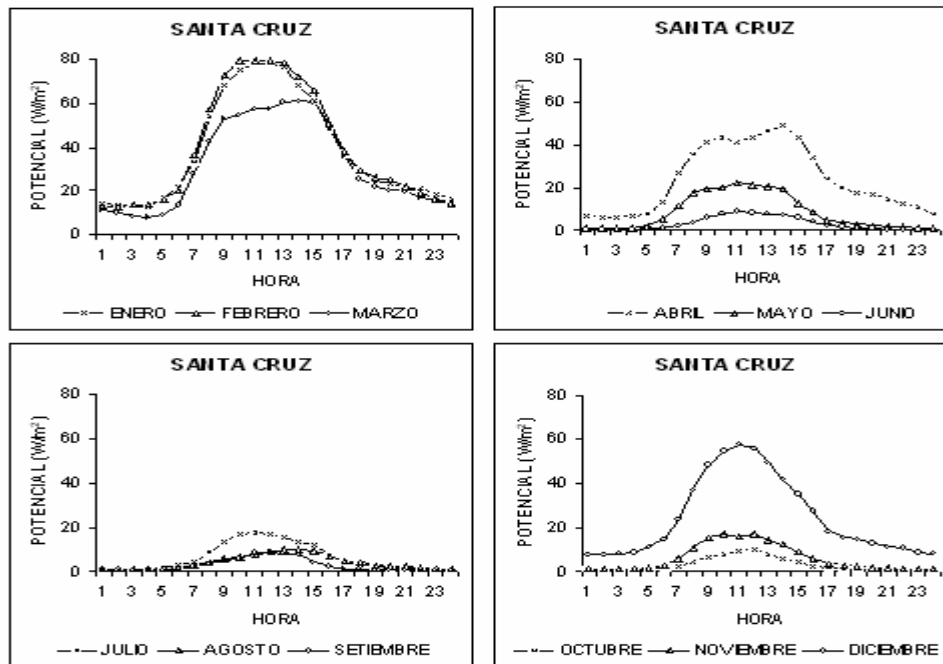


Figura 25: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Santa Cruz (1984-96) y para los meses mostrados.

máximos se presentan entre las 10 y las 14 horas, variando entre 9.0 W/m^2 en setiembre y 76.9 W/m^2 en febrero y los valores mínimos, durante la noche y la madrugada varían entre 0.5 W/m^2 entre setiembre y octubre y 12.2 W/m^2 en enero y febrero.

En la Figura 26 se muestra la distribución horaria del potencial del viento en la estación Taboga. Los valores máximos, variando entre 14.7 W/m^2 en setiembre y 228.0 W/m^2 en febrero, se presentan entre las 10 y las 13 horas. Los valores mínimos ocurren en las horas de la noche y la madrugada y varían entre 0.6 W/m^2 en octubre y 19.9 W/m^2 en febrero.

7. Conclusiones

El potencial de la energía del viento depende del cubo de la magnitud de la velocidad del viento, y para pequeñas variaciones en ella, se obtienen grandes variaciones en el potencial ya que depende directamente del comportamiento de la velocidad del viento.

El cálculo del potencial eólico promedio horario, permite agrupar las estaciones, según el valor máximo horario alcanzado, de la siguiente manera:

De 0 a $<50 \text{ W/m}^2$: Upala, Santa Clara, Cobal, Limón, Hacienda El Carmen, Pindeco, Palmar Sur, Sabanilla, Puntarenas y Nicoya.

De 50 a $<100 \text{ W/m}^2$: Los Chiles, San José y Santa

Cruz.

De 100 a $<150 \text{ W/m}^2$: Tierra Blanca.

De 150 a $<200 \text{ W/m}^2$: Fabio Baudrit y Liberia.

De 200 a $<250 \text{ W/m}^2$: Taboga.

De 250 a $<300 \text{ W/m}^2$: Aeropuerto Juan Santamaría.

De 500 a $<550 \text{ W/m}^2$: La Tejona

De acuerdo a la distribución mensual y horaria de la velocidad del viento en nuestro país, es importante recalcar que la producción de electricidad a partir de la energía del viento, representa un buen complemento al desarrollo de la energía hidroeléctrica. En la Vertiente del Pacífico, la mayor producción de energía eólica es posible durante los meses correspondientes a la época seca, cuando la energía hidroeléctrica podría disminuir. Además, alrededor del medio día, cuando el consumo de electricidad es mayor, la velocidad del viento adquiere los valores máximos en su variación diurna, permitiendo obtener los máximos valores del potencial de la energía eólica.

Agradecimientos

Los autores están agradecidos con Rafael Enrique Chacón por sus valiosos comentarios y sugerencias. También, expresan su agradecimiento al Instituto Meteorológico Nacional y al Instituto Costarricense de Electricidad por haber proporcionado los datos utilizados en este trabajo.

TOPICOS METEOROLOGICOS Y OCEANOGRAFICOS

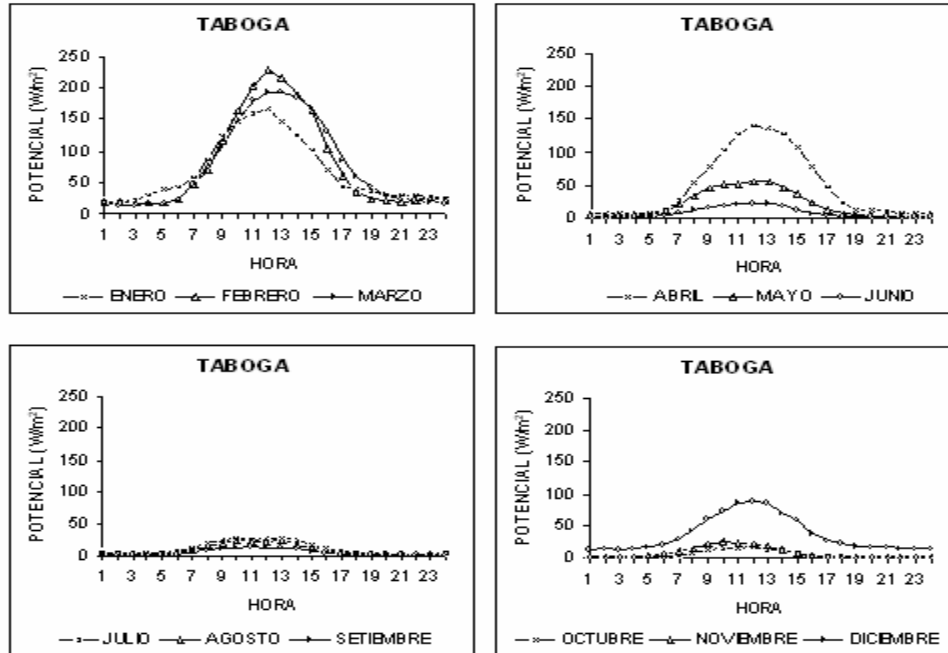


Figura 26: Distribución horaria del potencial eólico a una altura de 10 m en la estación Taboga (1971-72/ 1983-86) y para los meses mostrados.

RESUMEN

Se analiza la distribución mensual y horaria del potencial de energía eólica para diferentes lugares de Costa Rica. El potencial del viento es estimado a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo.

El cálculo del potencial promedio horario del viento, permite agrupar las estaciones, según los valores máximos horarios de la siguiente manera:

De 0 a <50 W/m ² :	Upala, Santa Clara, Cobal, Limón, Hacienda El Carmen, Pindeco, Palmar Sur, Sabanilla, Puntarenas y Nicoya.
De 50 a <100 W/m ² :	Los Chiles, San José y Santa Cruz.
De 100 a <150 W/m ² :	Tierra Blanca.
De 150 a <200 W/m ² :	Fabio Baudrit y Liberia.
De 200 a <250 W/m ² :	Taboga.
De 250 a <300 W/m ² :	Aeropuerto Juan Santamaría.
De 300 a <550 W/m ² :	La Tejona

La estación La Tejona presenta los valores máximos, alcanzando 389.3 W/m² en el mes de febrero.

A partir de los resultados obtenidos del análisis de la distribución mensual y horaria de la velocidad del viento en nuestro país, es importante recalcar que la producción de electricidad a partir de la energía del viento, representa un buen complemento al desarrollo de la energía hidroeléctrica. En la Vertiente del Pacífico, la mayor producción de energía eólica es posible durante los meses correspondientes a la época seca, cuando la energía hidroeléctrica podría disminuir. Además, alrededor del mediodía, cuando el consumo de electricidad es mayor, la velocidad del viento adquiere los valores máximos en su variación diurna, permitiendo obtener los máximos valores del potencial de la energía eólica.

Referencias

EES., 1984: "Non conventional energy sources. Wind energy".. Electrowatt Engineering Services Ltd. Volume I.

DSE., 1982: "Diagnóstico sobre energía eólica". San José, C.R.: Dirección Sectorial de Energía.

ICE., 1979: "Fuentes de energía no convencionales". San José, C. R.: Instituto Costarricense de Electricidad.

ICE., 1980: "Análisis preliminar del viento en Costa Rica". San José: Instituto Costarricense de Electricidad.

ICE., 1985a: "Fuentes de energía no convencionales". San José: Instituto Costarricense de Electricidad.

ICE., 1985b: "Fuentes de energía no convencionales. Resumen Ejecutivo". Zurich, Suiza. Electrowatt Ingenieros Consultores.

Muñoz, A.C., W. Fernández, J. Gutiérrez y E. Zárate, 2002a: Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, ,

Muñoz, A.C., W. Fernández, J. Gutiérrez y E. Zárate, 2002b: Distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, ,

Rohatgi, Janardan y Nelson Vaughn, 1994: "Wind Characteristics. An analysis for the generation of wind power". Texas, USA.

- Snell, Herman., 1995: “Generación de electricidad por medio de energía eólica”,ITCR, Cartago.
- Vindas, Carlomagno., 1989. Estudio preliminar para la instalación de una planta eólica de generación eléctrica en Costa Rica. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Costa Rica.