

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades



Evaluación del potencial eólico para  
generación de energía eléctrica en  
Comapa, Jutiapa.

Trabajo de Graduación presentado  
por Otto Rolando Ruíz Balcárcel,  
para optar al grado académico de  
Master en Ciencias

Guatemala  
2006



Evaluación del potencial eólico para  
generación de energía eléctrica en  
Comapa, Jutiapa.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades

Evaluación del potencial eólico para  
generación de energía eléctrica en  
Comapa, Jutiapa.

Trabajo de Graduación presentado  
por Otto Rolando Ruíz Balcárcel,  
para optar al grado académico de  
Master en Ciencias

Guatemala  
2006

**Vo. Bo.**

(f) \_\_\_\_\_  
M. Sc. Glenda Maureen López Sett

**TRIBUNAL**

(f) \_\_\_\_\_  
M. Sc. Carlos Mansilla Mejía

(f) \_\_\_\_\_  
M.B.A. Jorge Luis Galindo Arévalo

(f) \_\_\_\_\_  
M. Sc. Glenda Maureen López Sett

Fecha de aprobación: 19 de junio de 2006.

## ÍNDICE

<b>Lista de cuadros</b> .....	vii
<b>Lista de figuras</b> .....	viii
<b>Resumen</b> .....	x
<b>I. Introducción</b> .....	1
<b>II. Problema</b> .....	3
<b>III. Antecedentes</b> .....	6
<b>IV. Objetivos</b> .....	36
<b>V. Justificación</b> .....	37
<b>VI. Metodología</b> .....	39
<b>VII. Análisis de resultados</b> .....	41
<b>VIII. Discusión</b> .....	68
<b>IX. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	72
<b>X. Bibliografía</b> .....	75
<b>XI. Apéndice</b> .....	78

## LISTA DE CUADROS

	<b>Página</b>
Cuadro 1. Valores de Coeficiente $\alpha$	11
Cuadro 2. Factores de rugosidad para distintos tipos de terrenos	12
Cuadro 3. Número de estaciones por país	21
Cuadro 4. Proyectos eólicos en Guatemala	22
Cuadro 5. Comparación de impactos ambientales de las diferentes formas de producir electricidad	25
Cuadro 6. Número de víctimas por distintas causas	27
Cuadro 7. Resultados comparativos de los parámetros eólicos obtenidos, Sitio 1, 30 m	44
Cuadro 8. Resultados comparativos de los parámetros eólicos obtenidos, Sitio 2, 30 m	45
Cuadro 9. Resultados comparativos de los parámetros eólicos obtenidos, Sitio 1, 15 m	46
Cuadro 10. Resultados comparativos de los parámetros eólicos obtenidos, Sitio 2, 15 m	47
Cuadro 11. Dirección de viento, Sitio 1, 30 m	50
Cuadro 12. Dirección de viento, Sitio 2, 30 m	50
Cuadro 13. Reporte de parámetro de velocidad Sitios 1 y 2 Wasp	51
Cuadro 14. Estimación EAG y FC para turbinas V52 850 kW	55
Cuadro 15. Energía Anual Generada –kWh- por distintas turbinas para sitios 1 y 2	56
Cuadro 16. Valores de las variables climáticas de Comapa	59

Cuadro 17	Otras características ambientales de Comapa	60
Cuadro 18.	Combustible desplazado por el proyecto Eólico de Comapa	62
Cuadro 19.	Contenido de Carbono de los Combustibles Desplazados por el proyecto	63
Cuadro 20	Cálculo de las emisiones de CO <sub>2</sub> de los Combustibles evitados	63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Sistemas globales	6
Figura 2.	Viento de brisa	7
Figura 3.	Vientos de laderas y montañas	8
Figura 4	Rosa de vientos	14
Figura 5	Torre de medición de variables Eólicas	18
Figura 6	Tipos de terrenos	19
Figura 7	Mapa de potencial eólico	23
Figura 8	Ruido producido por un aerogenerador de acuerdo a la distancia del receptor	29
Figura 9	Distribución de velocidad del viento para Sitio 1, altura 30 m	43
Figura 10	Distribución de velocidad de viento para Sitio 2, altura 30 m	44
Figura 11	Distribución de velocidad de viento de los Sitios 1 y 2 Wasp	52
Figura 12	Rosa de dirección de viento, Sitios 1 y 2	53
Figura 13	Ubicación del proyecto eólico de 8.5 MW	57
Figura 14	Interconexión con la red del proyecto eólico	58

## RESUMEN

Este trabajo de graduación tiene como finalidad la medición de las principales características del recurso eólico existente en el municipio de Comapa, Jutiapa, para su empleo en generación eléctrica por medio de turbinas conectadas al Sistema Nacional Interconectado. Se incluye además el análisis de la viabilidad ambiental del aprovechamiento para la generación mediante granjas eólicas.

Se determinó que los vientos, medidos, del municipio de Comapa tienen una dirección predominantemente noreste, correspondiente a los vientos Alisios; tiene una menor componente noroccidente, que se debe a la presencia de los vientos Monsónicos. La velocidad media anual es de 6.6 m/s con una densidad de potencia de 334 W/m<sup>2</sup>. La estimación de este recurso tiene una certeza de un 75%, por lo que, se hace necesario seguir midiendo el recurso en el lugar para aumentar la certidumbre de las mediciones.

Se estimó que con el recurso eólico existente se puede instalar una granja eólica de 8.5 MW capaz de generar unos 20 GWh al año y se estableció que el área de estudio reúne las condiciones básicas de cercanías a la red de alta tensión para su conexión y tiene buenos accesos de carreteras.

Se estableció que los impactos ambientales positivos que tienen los proyectos eólicos consisten en que pueden evitar la emisión de gases de efecto invernadero, al ser utilizados en vez de una térmica que emplea combustibles fósiles para la generación eléctrica; también tiene impactos negativos como sonoros, impactos sobre el paisaje, impactos sobre la flora y la fauna. Siendo esta última importante, cuando en el emplazamiento existen rutas de aves migratorias.

Para el proyecto de 8.5 MW, que se ubicará en el municipio de Comapa, se consideró que los anteriores impactos eran poco significativos; sin embargo se recomendó que para analizar los impactos para las aves locales se realice un estudio más detallado considerando que podrían presentar colisiones de estas aves con las aspas.

# I. INTRODUCCIÓN

La alta dependencia energética que tienen los países del petróleo, el cual cada vez se hace más caro y escaso, obliga a buscar fuentes renovables de energía que por un lado, suplan esta demanda, y que por el otro lado, disminuyan los efectos de la quema de estos combustibles. Al disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, se contribuye a evitar el calentamiento global y a reducir los riesgos de cambio climático.

En Guatemala, país que no produce petróleo para su consumo energético, la problemática se agrava ya que necesita importar la totalidad de los hidrocarburos que utiliza. Esto conlleva a una erogación bastante fuerte de divisas para la compra de dicho producto. La situación puede cambiar si se logra aprovechar sus recursos renovables para la generación de energía. El país cuenta con un potencial elevado de estos recursos, que aún se utilizan a pequeña escala.

Este trabajo presenta las bases de la utilización del recurso eólico mediante la caracterización y cuantificación de este recurso existente en el municipio de Comapa (Jutiapa) para su aprovechamiento energético. Asimismo identifica los efectos ambientales que tienen las granjas eólicas que se presentan como una posibilidad energética en dicha área.

Se determinó los beneficios económicos que tendría el municipio con el aprovechamiento del recurso eólico en actividades energéticas, ya sean éstas de generación de energía o bien en otras aplicaciones productivas.

Para llevar a cabo dicho trabajo, se procesó información del recurso existente en el lugar y se correlaciona con otra serie de mediciones para establecer el potencial eólico-eléctrico con una mayor confiabilidad.

Se realizaron reconocimientos de campo para obtener información relativa a orografía, rugosidad, obstáculos, actividad económica de la población, demografía y otros datos que contribuyan al logro de los objetivos de este trabajo.

Los resultados de este trabajo contribuirán a fortalecer la información básica que se requiere para el desarrollo de proyectos energéticos eólicos empleando un recurso renovable como es el viento, el cual, es abundante, pero hasta la fecha aún no se ha evaluado su potencial.

## **II. PROBLEMA**

El escenario mundial de la energía se ve influenciado fuertemente por el uso de los derivados del petróleo. El consumo de petróleo como fuente de generación de energía primaria representa un 87% comparada con la proveniente de las energías renovables que apenas alcanzan un 1% (OIEA 2002).

Esta alta dependencia energética de los combustibles fósiles y sus elevados precios en los últimos años está provocando una crisis económica mundial, que no parece tener fin. Unido a esta circunstancia ésta el hecho que la población, a escala mundial está creciendo a un nivel de 1% anual, provocando un incremento anual en el consumo de energía en un 1.8 %. Esta condición también ocurre en Guatemala convirtiéndose en un factor importante en el crecimiento de la demanda de la energía (Home Power 2002).

Otro elemento importante que hay que tomar en cuenta son las reservas del petróleo; con los niveles de consumo actuales, se estima que las mismas alcanzan para 60 años. Esto conlleva a pensar, que para mantener la dinámica económica mundial, es necesario pensar en otros recursos, que si bien, no van a reemplazar al petróleo en el corto plazo, lo pueden hacer en el mediano plazo.

En el contexto del desarrollo sostenible deben de escogerse medidas que no reduzcan el capital ambiental social actual a niveles inaceptables ni comprometan el de las futuras generaciones. Esta afirmación se discutió en el Protocolo de Kioto de 1997, que busca mecanismos para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Al revisar las emisiones en el sector de energía a escala mundial, se puede observar que del total de emisiones de carbono la actividad del transporte genera un

20%, mientras que el otro 80% resulta de uso de la energía en la industria térmica, generación eléctrica y uso en los sectores doméstico y comercial. (Home Power 2002)

Entonces, para afrontar el futuro energético mundial, mitigar el problema de los gases de efecto invernadero y evitar el agotamiento paulatino de las fuentes convencionales, las energías renovables aparecen como alternativas viables. Dentro de éstas, la energía hidráulica que en la actualidad produce el 7 % de la energía primaria, la mayoría es destinada para producir electricidad.

En lo que respecta a la generación eléctrica en Guatemala, la misma, se produce a partir de un 65% de productos derivados del petróleo; se genera un 5% a partir de la biomasa y el resto a partir de hidroeléctricas. Esta estructura de generación eléctrica, no sólo hace al país, un alto productor de gases de efecto invernadero por la generación eléctrica, sino que además, la hace vulnerable, dado que casi la totalidad del combustible para generación térmica, lo importa. Además, provoca que en el país las tarifas eléctricas estén influenciadas grandemente por los precios internacionales del petróleo.

Bajo esta perspectiva se hace imperante que en Guatemala, para la generación eléctrica, se aproveche las energías renovables tales como la hidroeléctrica, la geotermia y la eólica, que son los de mayor potencial en el país. El potencial en el país es de 5000 MW, 1000 MW y el otro con 7,800 MW teóricos respectivamente (MEM 2005).

El aprovechamiento de la energía hidroeléctrica en Guatemala, tiene una trayectoria de más de 100 años, alcanzando a la fecha una capacidad instalada de unos 600 MW, la energía geotérmica tiene 30.2 MW, mientras que la energía eólica apenas alcanza unos 5 kW (proyecto ubicado en Nentón, Huehuetenango).

A pesar del gran recurso eólico con el que cuenta el país, su empleo para fines energéticos es bastante bajo debido, entre otros factores, a que no se cuenta con información precisa de la disponibilidad del recurso.

Es necesario entonces, iniciar el estudio del recurso para contar con la información confiable que llene las características necesarias para ser empleada en la estimación del potencial eólico para fines energéticos, en especial, en zonas rurales con menos índices de electrificación.

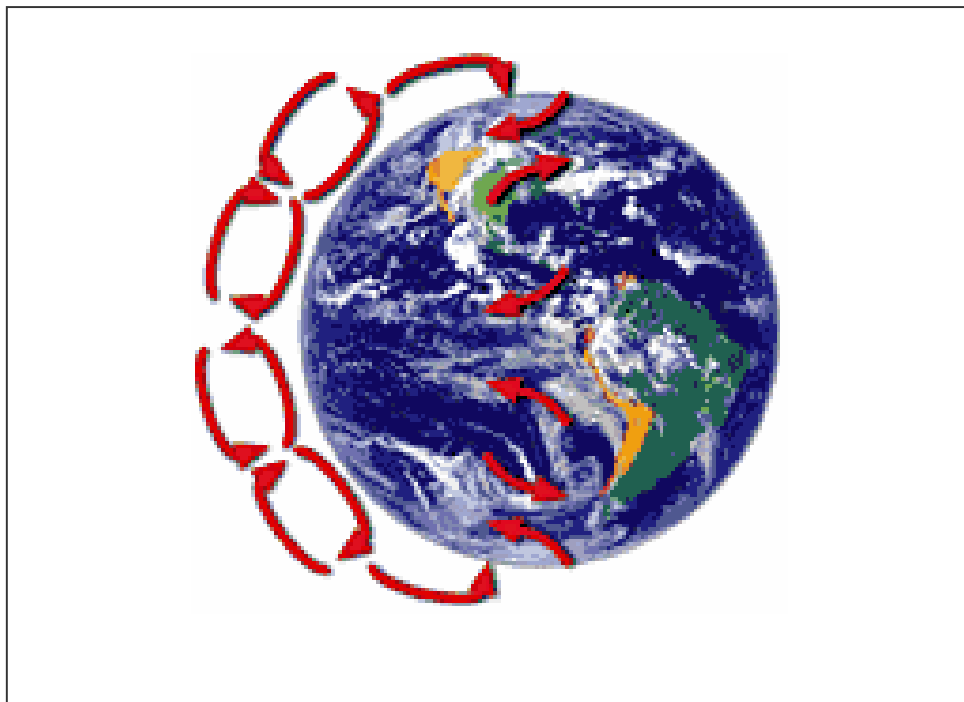
### III. ANTECEDENTES

#### A. Recurso Viento

Los vientos son movimientos de masas de aire en la atmósfera, que son generados por diferencias en temperaturas debido al diferencial de calentamiento solar; lo que hace que la energía del viento sea una forma de energía solar.

El fenómeno ocurre por la diferencia entre el ángulo de radiación solar y la superficie de la Tierra. Más cerca del Ecuador el área tiene más radiación solar por metro cuadrado que produce diferencias de presión debido al gran volumen de expansión en áreas de más radiación y provoca que el aire se mueva de sitios de alta presión hacia de baja presión.

**Figura 1. Sistemas globales**



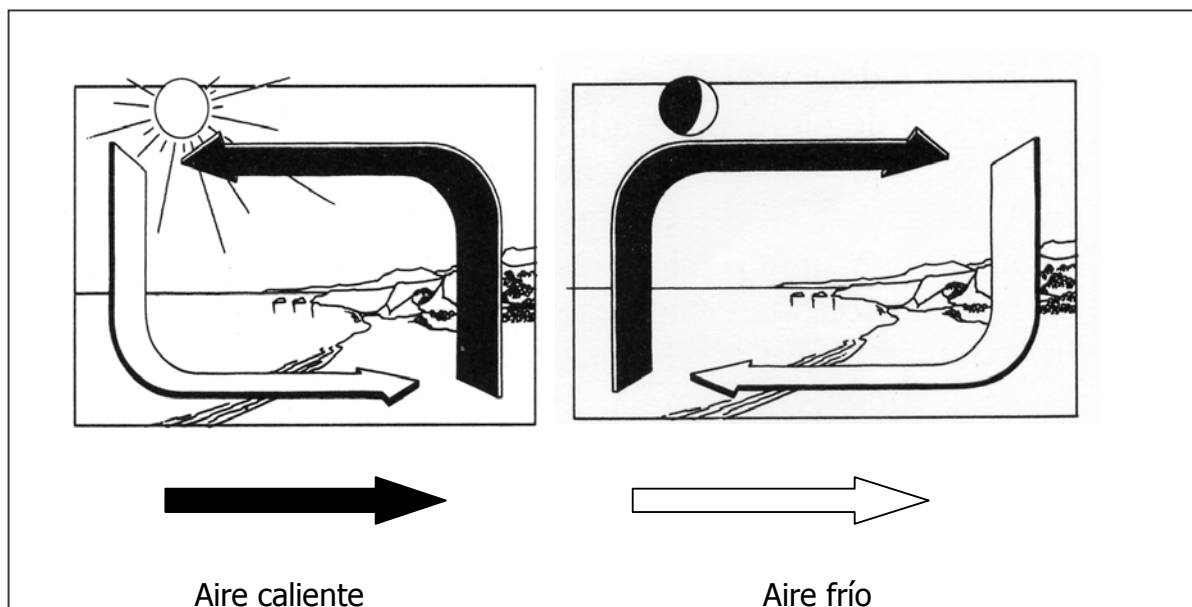
Fuente: [www.windpower.org](http://www.windpower.org)

Como ejemplos de vientos de estos Sistemas globales se tiene los Alisios y a los Monsónicos.

**1. Vientos locales.** Los vientos locales pueden ser originados por efectos térmicos u orográficos tales como vientos de laderas o de barreras topográficas (Centro Brasileiro de Energía Eólica 2002) que son componentes de la forma y configuración del viento.

**a. Las brisas.** Son corrientes de aire que se manifiestan durante el día y la noche en zonas costeras. Su origen se debe a la diferencia de calentamiento tierra-mar. Durante las horas de sol la Tierra se calienta más rápidamente que el mar; entonces el aire caliente de la Tierra se eleva y las masas de aire frío del mar se desplazan en dirección a la tierra ocupando los espacios dejados por el aire caliente. En la noche se da el proceso inverso.

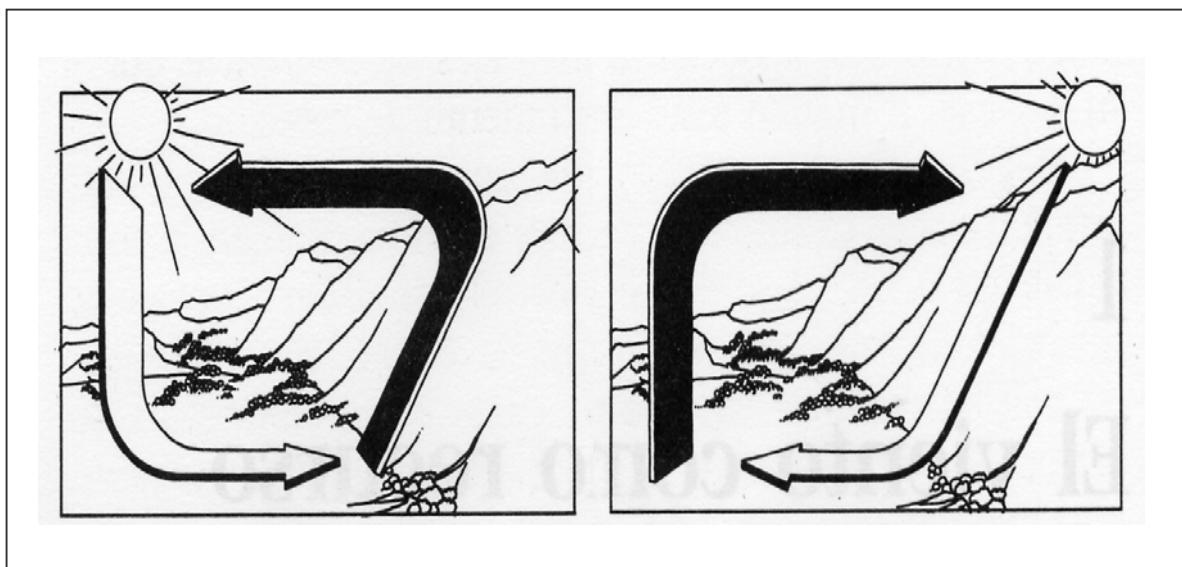
**Figura 2. Vientos de brisa**



Fuente: Nordteco 2005.

**b. Vientos de laderas y valles.** Son vientos que se originan en los valles entre las montañas. Cuando las laderas de los valles se calientan se origina un flujo ascendente del aire; al medio día estas corrientes son más fuertes iniciándose un flujo ascendente del aire sobre el valle. Caso contrario sucede durante las noches cuando las cumbres se enfrían más que los valles y el aire frío desciende por las laderas generando un flujo descendente del aire. La formación de estos vientos depende de la forma del valle y de las características de las montañas adyacentes y su orientación.

**Figura 3. Vientos de laderas y valles**



Fuente: Nordteco 2005

**c. Vientos de barreras topográficas.** Las cadenas de montañas ejercen un efecto importante en el flujo de aire que las atraviesa. El aire es forzado a subir para evitar un obstáculo pudiendo recuperar su curso después de la barrera. En las cimas, los vientos alcanzan velocidades medias entre 12 y 15 m/s. El aire, al pasar por las montañas, es comprimido y posteriormente acelerado sobre las barreras montañosas.

**2. Potencial energético de la energía eólica.** A continuación se analizan las características del viento desde una perspectiva energética, incluyendo la teoría que respalda la predicción de la energía del viento.

**a. Energía del viento.** La energía del viento es energía cinética producida por el movimiento del aire. La potencia de la energía por unidad de tiempo, está expresada como: (Centro Brasileiro de Energía Eólica 2002)

donde:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * (V)^3$$

$\rho$  = densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)

V = velocidad del viento (m/s)

A = área interceptada (m<sup>2</sup>)

P = Potencia (Watt)

De la ecuación anterior, se observa que la energía contenida en el viento es:

Directamente proporcional a la masa específica del aire (densidad del aire)

Directamente proporcional al área de captación

Directamente proporcional al cubo de la velocidad del viento

**b. Densidad del aire.** La densidad del aire, depende de la temperatura y presión. Si la presión y temperatura de los sitios son conocidos la densidad del airea puede ser calculada por:

$$\rho = P/RT$$

donde:

P = presión del aire (N/m<sup>2</sup>)

R = constante específica para los gases (287 J/kg.K)

T = temperatura del aire ° K

Cuando la presión del sitio no está disponible, la densidad del aire puede ser estimada como una función de la elevación y temperatura del sitio tal como (Hagerby D, y Landberg S. 2004):

$$\rho = P_0/RT.e^{-gz/RT}$$

donde :  $P_0$ = presión atmosférica estándar al nivel del mar (101,305 Pa)  
 $g$  = constante gravitacional (9.82 m/s<sup>2</sup>)  
 $z$  = elevación del sitio sobre el nivel del mar (m)

Sustituyendo los valores numéricos para  $P_0$ , R y g, la ecuación resultante es:

$$\rho = 353.05 / e^{-0.034/T}$$

**3. Extrapolación vertical de la velocidad de viento.** La energía generada por las turbinas eólicas es generada con velocidades que están a una altura del cubo del rotor. Dado que las velocidades medidas con anemómetro están a diferentes alturas del cubo del rotor, es preciso corregir las velocidades obtenidas con este equipo (h) a una altura (H) de la producción de energía. Para tal efecto, es necesario determinar el comportamiento del perfil de velocidad local que depende de los efectos de topografía del terreno y que afectan la capa límite atmosférica.

La metodología consiste en extrapolar los datos de velocidad al nivel deseado tomando en consideración la topografía local. Para el efecto existen dos métodos: a) Extrapolación por la Ley Exponencial de velocidad y, b) Extrapolación por la Ley Logarítmica de velocidad.

**a. Ley de Exponencial de velocidad.** Si se considera un anemómetro instalado a una altura h, esta Ley está dada por la ecuación siguiente (Centro Brasileiro de Energía Eólica 2002):

$$V(z) = V(h) \cdot (z/h)^\alpha$$

Donde:

$V(z)$  = velocidad a la altura  $z$  ( que puede ser la altura del rotor de la turbina )

$V(h)$  = velocidad a la altura de referencia  $h$  medida con anemómetro.

$\alpha$  = parámetro que determina el perfil de velocidad que depende de la topografía local, como se observa en el cuadro 1.

**Cuadro 1. Valores de Coeficiente  $\alpha$**

Tipo de terreno	Valor de $\alpha$
Playas	0.10
Nieve	0.10
Mar	0.10 a 0.14
Gramas cortas	0.13
Gramas altas + plantas	0.14 a 0.19
Terrenos abiertos	0.16
Áreas suaves del interior	0.30
Áreas rurales con árboles	0.20
Suburbios	0.23 a 0.32
Áreas urbanas	0.25 a 0.40

Fuente: Centro Brasileiro de Energía Eólica 2002.

**b. Ley Logarítmica de velocidad.** Esta Ley está dada como la relación entre la velocidad del viento a una altura de referencia  $h$  y la velocidad deseada a una altura  $z$ , tomando de base la rugosidad del terreno.

$$\frac{V(z)}{V(h)} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(h/z_0)}$$

Donde  $V(h)$  = velocidad a la altura de referencia  $h$

$V(z)$  = velocidad a la altura deseada

$z_0$  = rugosidad del terreno

En el cuadro 2, se observan los valores típicos de  $z_0$  los cuales aparecen clasificados en grandes categorías por tipos de terreno.

**Cuadro 2. Factor de rugosidad para diferentes tipos de terrenos**

Clasificación	Características del terreno	Rugosidad $z_0$ (m)
<b>Clase 0</b> Superficies suaves	Superficies suaves como lagos, mares	$10^{-5}$
	Áreas desérticas	$3 \times 10^{-4}$
	Superficies nevadas suaves	$10^{-3}$
<b>Clase 1</b> Terreno levemente ondulado	Suelos descubiertos suaves	$5 \times 10^{-3}$
	Áreas engramadas, vegetación rastrera	0.01
	Áreas con pocas construcciones y árboles	0.03
	Áreas de aeropuerto con construc. y árboles	
<b>Clase 2</b> Terreno ondulado	Terrenos con apariencia abierta	0.05
	Terrenos con apariencia fachada	0.10
<b>Clase 3</b> Terreno bastante ondulado	Muchos árboles con arbustos	0.20
	Florestas y obstáculos próximos	0.30
	Suburbios y ciudades pequeñas	0.40

Fuente: Centro Brasileiro de Energía Eólica 2002.

**4. Distribución de velocidad.** La cuantificación del recurso eólico se puede realizar ajustando el histograma de velocidad por alguna función de densidad de probabilidad o por medio de una distribución de velocidad de viento  $f(v)$ . Esta última forma de tratamiento es más práctica ya que se puede estimar la fracción del tiempo que el viento sopla por encima de la velocidad de entrada en funcionamiento de una turbina.

Los datos recogidos del sitio a evaluar permiten construir un histograma de velocidades con el tiempo. El análisis de los datos se torna útil para obtener gráficamente la distribución de frecuencias; el resultado puede ser utilizado para

estimar la energía generada por un sistema eólico. Diversas funciones de distribución se estudian con tal finalidad, siendo éstas: Distribución de Weibull, Distribución de Rayleigh, Distribución Log-normal, Distribución de Plank, Distribución Inversa Gaussiana, Distribución Gama, Distribución Chi-cuadrado y Distribución Exponencial.

De todas ellas, la Distribución de Weibull es la función más utilizada ya que ha reportado los mejores resultados. Sin embargo se recomienda su uso, para análisis estadístico, cuando las velocidades sean superiores a 3 m/s. La expresión de la densidad de distribución de la velocidad de Weibull está dada por:

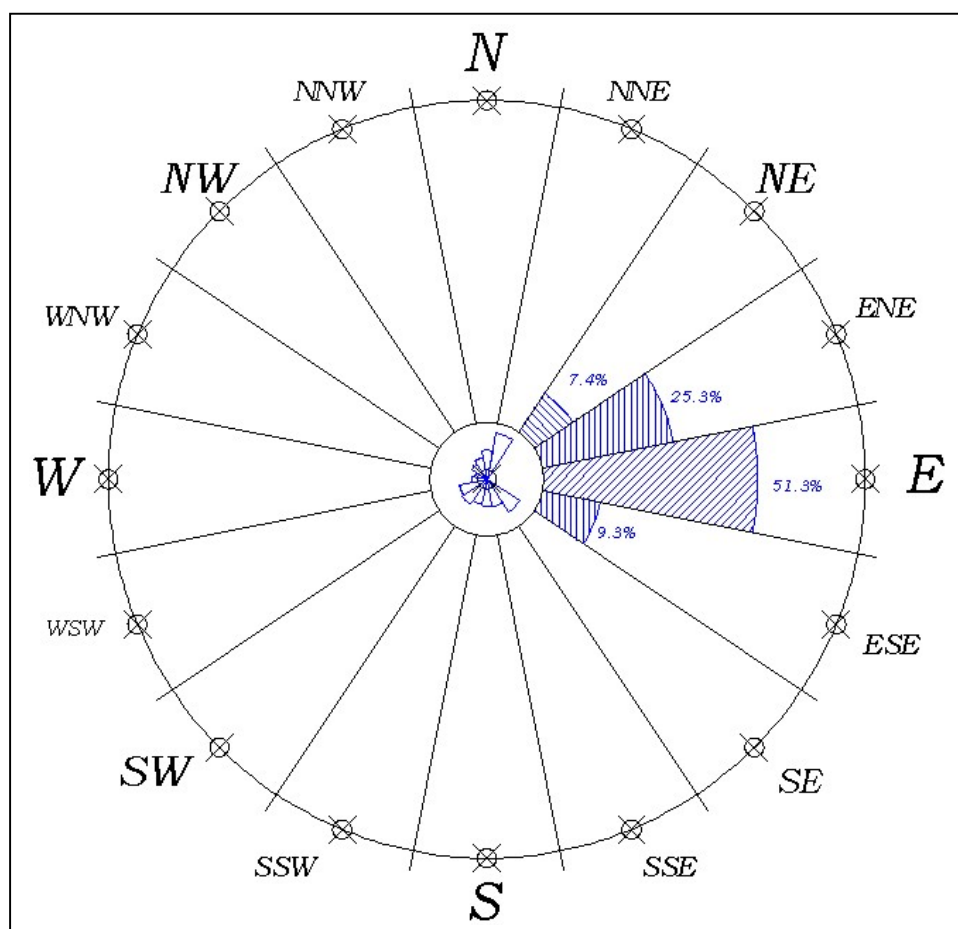
$$f(v) = k/c (v/c)^{k-1} \exp [ - (v/c)^k ]$$

Donde "c" es el factor de escala en m/s y está relacionada con la velocidad media. El "k" es el factor de forma, el cual, es adimensional y está relacionado con la variancia ( $\sigma^2$ ) de velocidades de viento respecto a la velocidad media.

**5. Turbulencia.** Es un parámetro importante cuando se piensa en aprovechar el recurso eólico para la producción de energía. Los valores 'normales' de la intensidad de turbulencia en tierra varían entre el 10% al 15% y usualmente disminuyen con la velocidad. En el mar pueden ser de 5%, pero aumentan con la velocidad del viento debido a las olas. Valores cercanos al 20% se consideran excesivos y causan mucho daño por fatiga al material.

Nordteco (2005), prescribe valores de 16% a 18% para el diseño típico de operación en un campo eólico incluyendo efectos de estela.

**6. Distribución de dirección del viento.** La distribución estadística de los datos de dirección del viento o Rosa de los vientos ('Wind Rose') se obtiene de la misma forma que para los valores promedios de velocidad pero gráficamente se expresa diferente (figura 4).

**Figura 4. Rosa de viento**

Fuente: Nordteco 2005

La figura 4 muestra que la dirección predominante del viento es este con un 51.3%, este noreste con un 25.3% y noreste con 7.4%.

La dirección de los vientos es importante para diseño del parque eólico-generador y para comprender el origen de algunos fenómenos de turbulencia. Particularmente sobre terrenos montañosos o irregulares la dirección del viento determina: 1) la posición y distribución de turbinas sobre el terreno, 2) la máxima aproximación entre equipos y, 3) el tamaño de parque viable en un espacio determinado.

**7. Factor de capacidad.** El factor de capacidad, o de planta, es un indicador para medir la productividad de una planta de generación eléctrica. Este indicador compara su producción real, durante un período dado, con la cantidad que se habría producido si hubiera funcionado a plena capacidad en el mismo tiempo. Está representado en la siguiente expresión:

$$\text{Factor de capacidad (FC)} = \frac{\text{producción real}}{\text{producción teórica}} = x \text{ 100 \%}$$

**8. Medida del viento.** Los principales parámetros que deben ser registrados para la estimación del recurso eólico son velocidad y dirección del viento. Otras variables complementarias también pueden ser medidas tales como temperatura, radiación solar y presión barométrica. Para un mayor detalle de la intensidad de turbulencia y estudio de la estabilidad atmosférica también se pueden registrar las velocidades verticales y la variación de la temperatura con la altura.

**a. Velocidad de viento.** Para una prospección eólica detallada se recomienda utilizar torres con mediciones en varias alturas, para determinar el perfil de velocidades. El manual NRG recomienda realizar mediciones a las alturas de 10, 25 y 40 m. La primera es la altura patrón de mediciones meteorológicas; la segunda es la medida mínima alcanzada por la paletas de la torre y se utiliza para conocer el régimen de vientos. Las mediciones a 40 m se consideran la medida representativa de los cubos de las turbinas ya que muchas de ellas se encuentran entre 40 y 60 m (Instituto Brasileiro de Energía Eólica y Nutema 2002).

**b. Dirección de viento.** Permite determinar las direcciones de los vientos predominantes mediante la instalación de veletas que son instaladas a la misma altura que los anemómetros. Esta información es importante para identificar los terrenos con mejor forma y orientación permitiendo optimizar la salida de las turbinas en una gran eólica.

**c. Temperatura.** La medición de la temperatura del aire es importante para conocer las condiciones de operación de la granja eólica. Se recomienda instalar la medición a 2 ó 3 m del suelo. La temperatura se utiliza para determinar la densidad del aire con lo que se puede determinar la energía del viento del lugar. Esta variable puede ser obtenida de alguna estación meteorológica cercana.

**d. Radiación solar.** Información importante para realizar una posterior evaluación del uso de la energía. Puede ser utilizada junto con la velocidad de viento para indicar la estabilidad atmosférica. Se recomienda que los medidores se instalen a 3 ó 4 m del suelo.

**e. Registro e intervalos de mediciones.** Todas las variables deben ser medidas cada 1 ó 2 segundos; además deben ser registrados los valores medios, desviación estándar y valores máximos y mínimos. Los valores medios deben ser recopilados considerando intervalos de 10 min. Estos valores son utilizados para obtener una variabilidad temporal así como una curva de distribución de velocidad y dirección.

Con los registros de la desviación estándar se pueden determinar niveles de turbulencia y de estabilidad atmosférica local. La desviación estándar también es útil para detectar errores originados en las mediciones.

**f. Períodos de mediciones.** Para un plan de mediciones el costo y la exactitud son proporcionales al período del programa para el levantamiento de datos.

Para un período corto (un año) las mediciones proporcionan una exactitud de un 65% mientras que después de los dos años, ésta tiene un aumento significativo. De esta forma, se adopta con una relación costo/beneficio, un período de un año como un intervalo de tiempo razonable para un programa de medición de viento.

Con mediciones de largo plazo, se disminuye las incertidumbres de las mediciones aumentando el período de años de medición según el intervalo de confianza (IC) deseado. Es así, que para un año de medición, con un intervalo de confianza de un 50% la incertidumbre es 6; para el mismo período, tomando de base un 99%, la incertidumbre aumenta a 15. Si se compara este valor con una medición de cinco años, se tiene que con un intervalo de confianza de 50% se tiene una incertidumbre de 5, mientras que con un 99% de IC, se tiene una incertidumbre de 8.

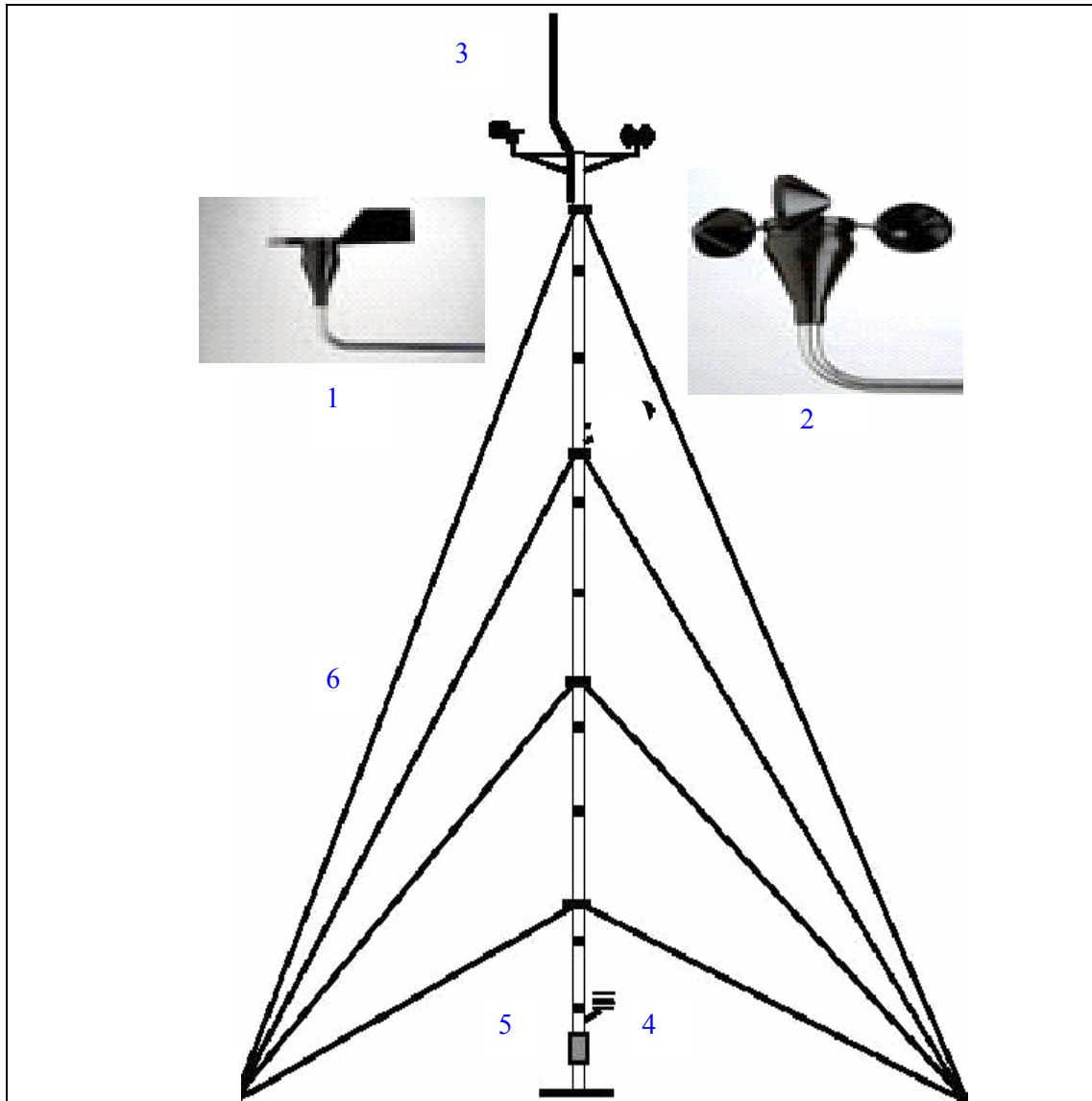
La importancia de la incertidumbre estriba en que en la medida que esta aumenta, los valores esperados de la velocidad media puede variar significativamente dependiendo del intervalo de confianza seleccionado. Es así que para un año de medición con una velocidad media de 5.0 m/s y para un intervalo de confianza de 90%, se puede esperar, con un 90% de seguridad, que los datos de velocidad media anual van a estar comprendidos entre  $\pm$  del valor medio. Entonces si  $V = 5.0 \pm 0.5$  m/s.

**g. Torre de medición de variables eólicas (Figura 5).** Una torre típica de 10 m de altura está comprendida por: 1) Veleta, 2) Anemómetro, 3) Pararrayo, 4) medidor de temperatura, 5) Registrador y, 6) la torre con sus tendales, cuando se trata de una tubular (NRG 2005).

**8. Clases de terreno, terreno complejo y terreno hostil.** En la figura 6, se observan los tipos de terreno, para modelaje usando un software especializado de viento llamado Wind Assesment Programme –WasP-

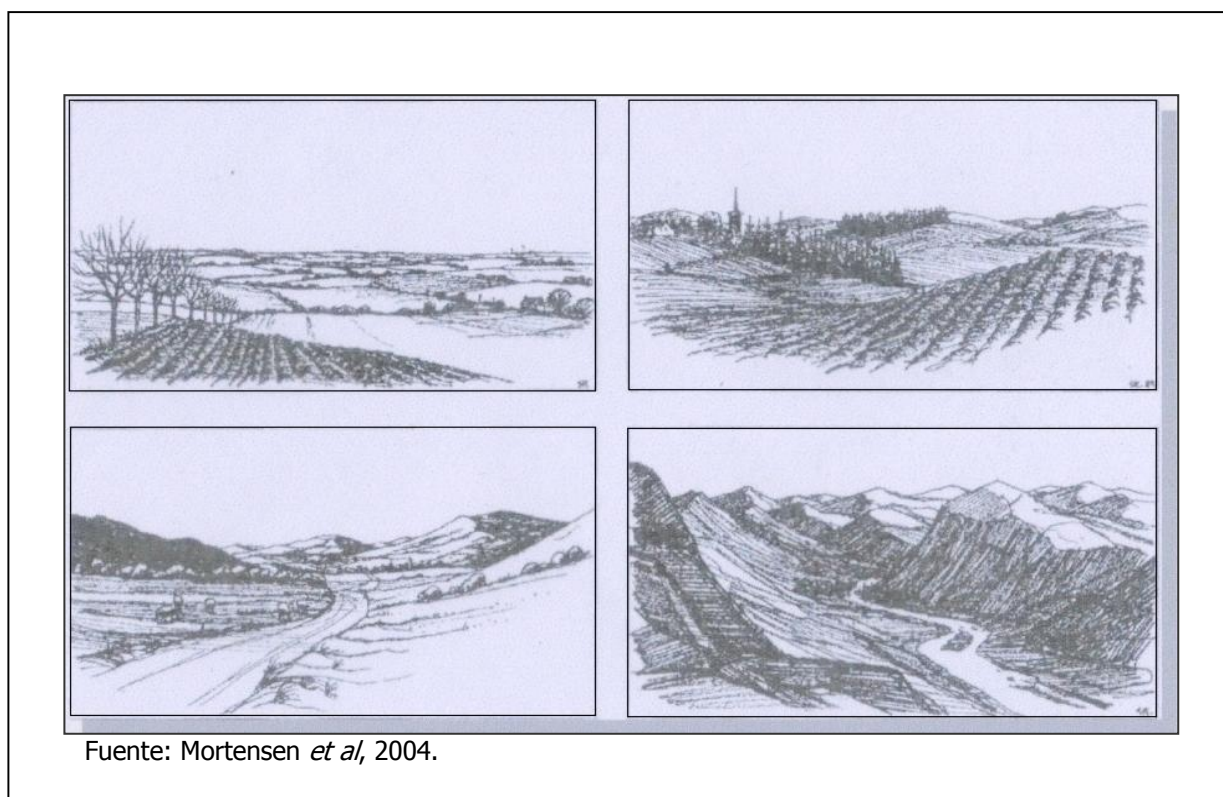
Las clases de terreno 'plano' y 'ondulado' (arriba) permiten modelarse razonablemente bien con programas como WasP (que usa información del lugar como rugosidad, topografía y obstáculos para calcular un viento regional); sin embargo las clases de terreno complejo u hostil (abajo) no se prestan para esto.

**Figura 5. Torre de medición de variables eólicas**



Referencia: Manual de NRG

**a. Clasificación de terreno, RIX.** El coeficiente RIX (Ruggedness Index) es la fracción (%) del terreno con pendientes mayores a 30 grados; el uso adecuado del WasP es válido para valores de  $RIX = 0$ . El error en predecir la distribución de la velocidad sobre el terreno es aproximadamente  $2\Delta RIX$ .

**Figura 6. Tipos de terrenos**

**b. Variaciones de la velocidad en terreno complejo.** En terreno complejo pueden existir variaciones de la velocidad con un factor de 2 ó más; estas variaciones cambian con la dirección del viento. Entonces, el "micro-sitio", análisis a profundidad del sitio, es importantísimo para encontrar los sitios adecuados.

Se recomienda el uso de varios anemómetros sónicos 3D (tres dimensiones), distribuidos sobre el terreno ya que los registros de anemómetros de copa (solamente la componente horizontal) pueden tener un error hasta del 15% con una inclinación del flujo de 10° o más. Inclinaciones del flujo mayores a 7° necesitan de un tratamiento especial en el cálculo de cargas para la certificación de los equipos.

## 9. Estudios sobre el recurso viento en Guatemala

**a. El viento en Centroamérica.** Aunque han existido muchas iniciativas para estudiar el recurso viento con fines energéticos, dentro de los estudios que más destacan se encuentra *El viento en Centroamérica*, (Morales 1994). Este informe presenta los resultados del estudio del potencial eólico de la región centroamericana durante dos años.

El estudio consistió en la recopilación y análisis de información meteorológica de cada país y de obtención de datos de una red de estaciones instaladas como parte del estudio. Se instalaron 19 equipos de medición con un medidor de dirección y dos de velocidad ubicados en torres de 30 metros de alto (Cuadro 3).

**Cuadro 3. Número de estaciones por país**

No.	País	Estaciones
1	Guatemala	5
2	El Salvador	3
3	Honduras	7
4	Nicaragua	4

Fuente: Morales 1994.

Las conclusiones de dicho estudio para Guatemala fueron que los departamentos con mayor potencial son Jutiapa, Escuintla y Zacapa, que presentan velocidades entre 5 y 7 m/s. Las condiciones favorables son producto de la influencia de los vientos alisios que en estas zonas tienen un patrón bastante definido. Desde el punto de vista de producción de energía el comportamiento de dichos vientos permite una generación eléctrica bastante continua.

El estudio reporta que el altiplano posee velocidades de viento entre 3 – 5 m/s que solamente permite el desarrollo de aplicaciones muy puntuales

(telecomunicaciones). También se informa que en la región sur del país las velocidades del viento podrían variar entre 4-5 m/s y que tienen un comportamiento diferente al resto del país debido a que esta región está expuesta a un sistema local de brisas. La región podría ser adecuada para desarrollar proyectos de riego o electrificación rural aprovechando el recurso eólico.

La región norte del país está influenciada por los vientos alisios que son afectados por un gradiente térmico. Las velocidades ahí encontradas pueden variar entre 3 y 4 m/s y solo en algunas montañas se presentan vientos mayores.

El estudio concluyó que entre las regiones con velocidades de viento para el desarrollo de granjas eólicas eran: Comapa y Agua Blanca (Jutiapa), Jutiapa; Palín (Escuintla) y Huité (Zacapa).

**b. Manuales sobre energía renovable: Eólica.** En el año de 1992 Biomass User Network Central America (BUN-CA) elaboró un manual sobre energía renovable, en el caso eólico se informa que en Guatemala 6 sitios son de características para generación eólico-eléctrica (Cuadro No. 4).

**Cuadro No. 4. Proyectos eólicos en Guatemala**

<b>Nombre del proyecto</b>	<b>Potencia</b>
1. Parque eólico Buenos Aires	20 MW
2. Parque eólico Huité	15-60 MW
3. Cerro Miramundo	3.2 MW
4. Proyecto Quince	4 kW
5. Sistema Santa Bárbara	10-15 kW
6. Amatitlán	Aún no definido su potencial

Fuente: BUN-CA 2002.

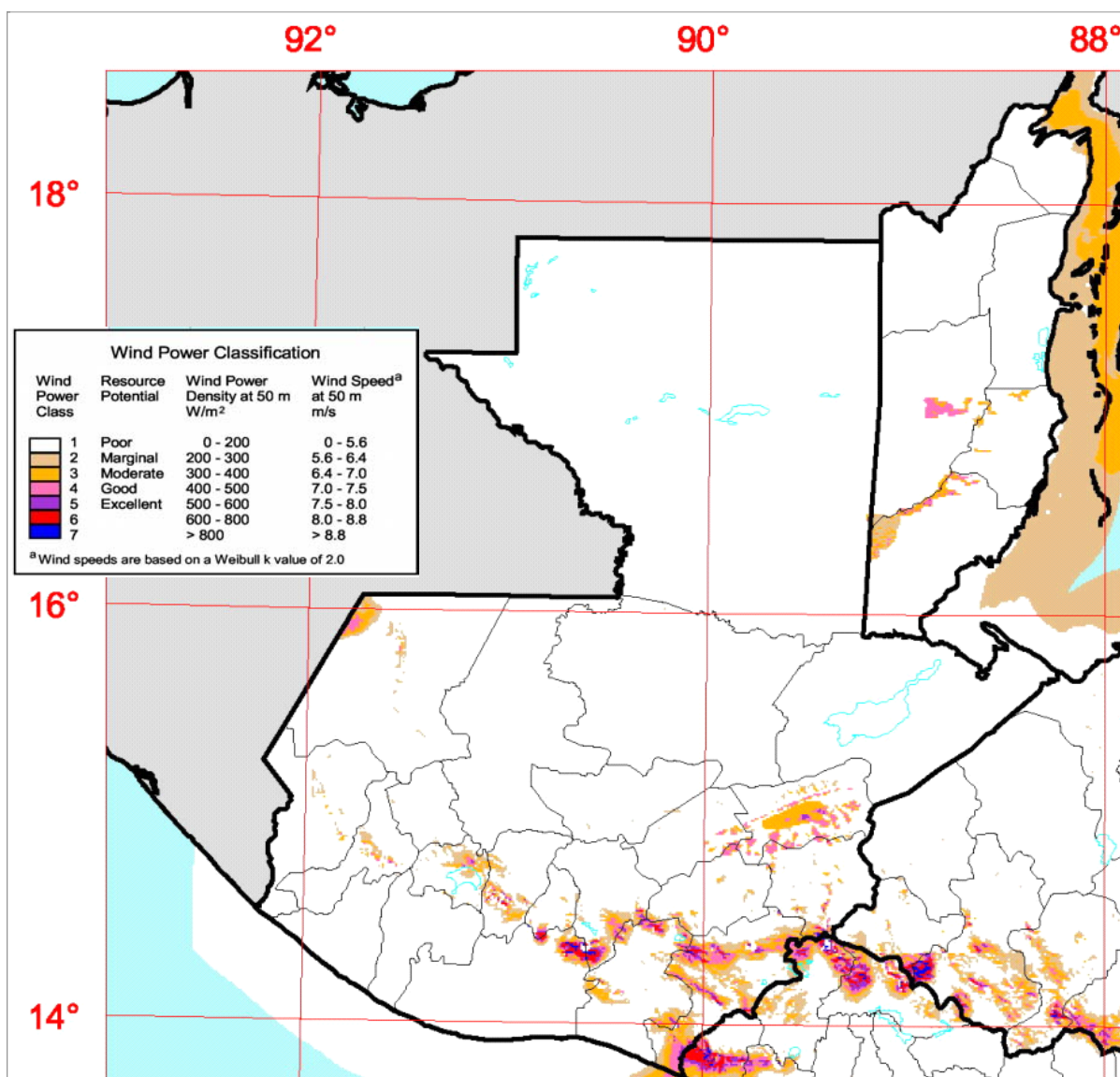
El Manual destaca además las principales barreras al desarrollo de la energía eólica identificándolas como: i) información, ii) financieras, iii) tecnológicas y, iv) de mercado. La primera barrera se refiere al desconocimiento de las oportunidades de la energía eólicas en desarrolladores de proyecto. Las financieras incluyen altos costos iniciales de la tecnología, falta de financiamiento, riesgo en la inversión y a la estabilidad de los niveles de precios en movimiento a mercados abiertos. Estas barreras, favorecerían una tendencia a no ser aprovechados los recursos eólicos.

**c. Proyecto: Solar and Wind Energy Resource Assessment.** El Ministerio de Energía y Minas –MEM- con el resto de ministerios de los países de Centroamérica, con la ayuda técnica y financiera del Programa de Naciones Unidas (PNUMA), unieron esfuerzos para el desarrollo de la energía eólica el cual consistió en la elaboración de un mapa de potencial eólico para América Central, dentro del proyecto de SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) en el 2004. Uno de los productos es un mapa que brinda la información de este recurso, identificándolo por clases de acuerdo a la velocidad que presente. Estas clases van desde 1, que significa un recurso pobre con velocidades de 0 a 5.6 m/s hasta las clases 5, 6 y 7, que se consideran que tienen un recurso excelente con velocidades de 7.5 m/s en adelante. Otra de las variables identificadas en el mapa es el término “densidad de potencia” que nos indica la potencia por unidad de área que presenta el sitio. A la clase 5 le corresponde un valor un rango de 500 – 600 W/m<sup>2</sup>. La altura de referencia para estos datos es de 50 m.

Las regiones que presenta este mapa con potencial de viento de clase 5 en adelante, se ubican en los municipios de Villa Canales y San José Pinula (Guatemala), Alotenango (Sacatepéquez); Patzún (Chimaltenango), Sololá (Sololá), Mataquescuintla (Jalapa), San Rafael Las Flores (Santa Rosa), Huité y Zacapa (Zacapa) y Comapa, Moyuta y Jutiapa (Jutiapa) Ver figura 7.

Figura 7. Mapa de potencial eólico

## Guatemala - 50 m Wind Power



Fuente: Guatemala – 50 m Wind Power, elaborado NRL 2004

## **B. Aspectos ambientales**

Los aspectos ambientales que serán revisados son los que se refieren al aprovechamiento del viento para la generación de energía en instalaciones eólicas situadas en tierra. Se describen los problemas ambientales de las turbinas eólicas considerando seguridad, ruido, impacto visual y otros.

**1. Energía y emisiones indirectas.** La expresión "uso de energía indirecta" en los equipos eólicos se refiere a la energía utilizada para producir los materiales que son usados para la construcción de la turbina eólica (hierro, concreto y otros materiales). Unida a esta definición se encuentra el concepto "tiempo del pago de energía" que se refiere al tiempo que se necesita para pagar la energía invertida en la construcción de dichos equipos.

Varios estudios realizados indican que las grandes turbinas tienen un "tiempo de pago de energía" más corto que las pequeñas. Por ejemplo, el tiempo de pago de energía para una turbina eólica de 10 kW varía entre 0.5 a 1.5 años, mientras que para una turbina de 500 kW varía entre 2 a 3 meses (ECN 1998).

Cuando se construyen y operan las turbinas eólicas se producen las llamadas emisiones indirectas, que son las emisiones al ambiente provocadas por dichas actividades.

Cuando se comparan las emisiones de las distintas tecnologías de producción eléctrica, se observa que su impacto en las emisiones de las turbinas eólicas está dentro de las que tienen menor impacto; solamente produce 7.4 toneladas por GWh producido, en las etapas de construcción y operación (Cuadro 5).

**Cuadro 5. Comparación del impacto ambiental de las diferentes formas de producir electricidad**

COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LAS DIFERENTES FORMAS DE PRODUCIR ELECTRICIDAD (en toneladas por GWh producido)								
FUENTE DE ENERGÍA	CO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	PARTÍCULAS	CO	HIDRO-CARBUROS	RESIDUOS NUCLEARES	TOTAL
Carbón	1.058,2	2.986	2,971	1,626	0,267	0,102	-	1.066,1
Gas Natural (ciclo combinado)	824	0,251	0,336	1,176	TR	TR	-	825,8
Nuclear	8,6	0,034	0,029	0,003	0,018	0,001	3,641	12,3
Fotovoltaica	5,9	0,008	0,023	0,017	0,003	0,002	-	5,9
Biomasa	0	0,614	0,154	0,512	11,361	0,768	-	13,4
Geotérmica	56,8	TR	TR	TR	TR	TR	-	56,8
<b>Eólica</b>	<b>7,4</b>	<b>TR</b>	<b>TR</b>	<b>TR</b>	<b>TR</b>	<b>TR</b>	<b>-</b>	<b>7,4</b>
Solar Térmica	3,6	TR	TR	TR	TR	TR	-	3,6
Hidráulica	6,6	TR	TR	TR	TR	TR	-	6,6

NOTA: Los valores de emisiones consideran también las emisiones producidas durante el periodo de construcción de los equipos. TR= trazas

Fuente: <http://www.ubp.edu.arg>

**2. Impactos sobre la flora y la fauna.** Los mayores impactos que producen las instalaciones eólicas sobre la flora son derivados de los problemas de erosión causados cuando se están instalando los equipos. Si esto es tratado adecuadamente, el único problema que quedaría es la pérdida de la vegetación en el área donde se ubicarán directamente las instalaciones.

La pérdida de la cobertura vegetal se da concretamente en la franja entre 5 y 30 m en la línea de los aerogeneradores. Por lo general, no se afectan masas arboladas ya que donde estos existen no se consideran zonas favorables para viento.

El impacto sobre la vegetación cobra importancia cuando la implantación del parque supone labores de deforestación y cuando se ubica en una zona de alto valor botánico.

Existen otros impactos en la pérdida de la cobertura vegetal relacionados con las infraestructuras asociadas a estos parques, tales como: apertura de viales de servidumbre a los aerogeneradores, accesos, zanjas, explanaciones, terraplenes, accesos para el levantamiento de apoyos del tendido eléctrico.

Los impactos sobre la fauna se dan con mayor intensidad durante el periodo de construcción, que suele ser relativamente corto, ya que no llega a exceder de un año para las instalaciones grandes. Durante la operación, esos efectos se concentran en las propias máquinas y, en su caso, en los tendidos eléctricos, que sólo cubren una pequeña parte de la superficie total ocupada por la instalación.

Los impactos generados por los parques eólicos sobre la fauna se concentran casi en exclusividad sobre las aves puesto que, salvo en la etapa de construcción, la incidencia por ocupación o generación de molestias es muy restringida para el resto de las especies animales.

Entre las afecciones ejercidas sobre las aves se han identificado las siguientes:

- Colisión con los aerogeneradores. La ocurrencia de este impacto se centra sobre dos grupos de aves especialmente las aves planeadoras, que llevadas por vientos y corrientes térmicas, pueden colisionar con las aspas de los aerogeneradores. Las aves migratorias, que por carecer de buen conocimiento del territorio son más propensas a la colisión que las aves residentes, especialmente en condiciones atmosféricas desfavorables (baja visibilidad) y pasos de grandes grupos de aves (<http://www.ctio.noao.edu>).
- Colisión con el tendido eléctrico de evacuación, especialmente con el cable de toma de tierra, que por su ubicación superior en el apoyo y su menor sección, resulta menos visible para las aves.

- También existe riesgo de electrocución, aunque la disposición de los anclajes y conductores en los tendidos de media y alta tensión hacen muy improbables este efecto.

- Modificación del uso del espacio en un entorno próximo a la instalación que puede dar lugar a desplazamientos de las especies nidificantes y pequeñas variaciones de ruta de las que se encuentran en migración. De los estudios realizados, parece deducirse que las aves migratorias, cuando la instalación interfiere sus itinerarios estacionales, son más susceptibles de verse afectadas que las especies locales. (<http://www.ctio.noao.edu>)

Con relación al impacto en las aves provocado por las turbinas de viento en operación, el Research Institute of Nature Management (RIN) midió los efectos de este impacto en granjas de 7.5 MW (una fila de 25 turbinas de 300kW) en Urk (Holanda); encontrándose que un promedio de 0.1 a 1.2 de muertes de aves por día podrían ser esperadas. Esto concluyó que el número de muertes de aves por km de una granja eólica, era diez veces menor que el número de muertes por km provocados por una línea de transmisión. En el cuadro 6, se presentan varias causas de muerte de aves por distintas causas.

**Cuadro 6. Número de víctimas de aves por distintas causas**

<b>Causas de muerte de aves en Holanda</b>	<b>No. de víctimas de aves</b>
Cacería	1.5 millones
Tráfico	2-9 millones
Electricidad en líneas de alto voltaje	1 millón
Turbinas de viento de 1000 MW	21,000

Fuente: ECN 1998

**3. Perturbaciones sonoras (ruido).** El ruido generado por el funcionamiento de la instalación tiene varios orígenes múltiples, unos debido a sus diferentes partes en movimiento y otros productos de la vibración.

Cuatro factores son lo que determinan el grado de molestia; el propio ruido producido por el aerogenerador, la posición de las turbinas, la distancia a la que se encuentran los residentes del emplazamiento y el sonido de fondo existente.

El ruido producido por el aerogenerador tiene dos vertientes una mecánica y otra dinámica. La vertiente mecánica es de origen convencional común a otros sistemas mecánicos y eléctricos; procede del generador, la caja multiplicadora y las conexiones, y puede ser fácilmente reducida mediante técnicas convencionales.

El ruido aerodinámico, procedente de la vertiente dinámica y tiende a crecer con la velocidad de rotación de las palas o paletas; condiciones turbulentas en la circulación del viento pueden causar un aumento de ruido. Actualmente los aerogeneradores se diseñan con criterios para disminuir el ruido aerodinámico y los modelos en el mercado tienen niveles de ruido que en general están por debajo del "ruido de fondo" del propio viento (<http://www.ctio.noao.edu>).

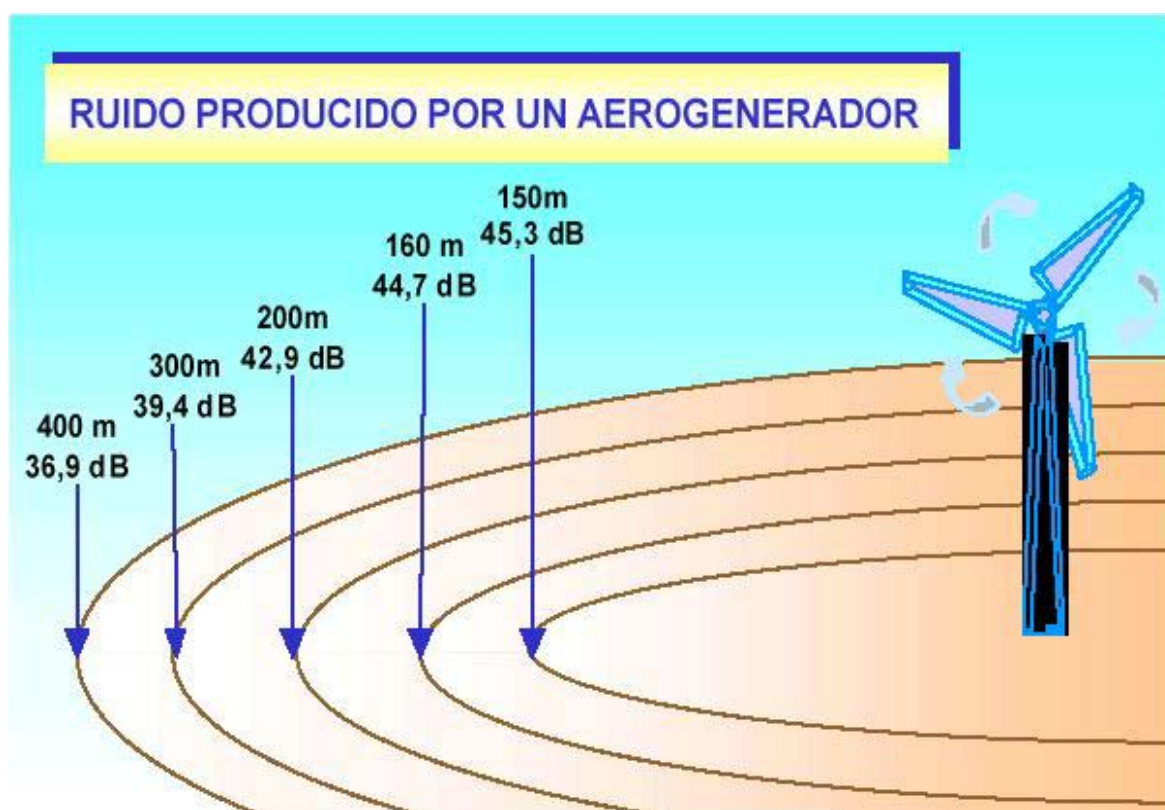
Los estudios muestran que una turbina con rotor de hasta 20 m la componente mecánica domina; en cambio, para rotores mayores de ese diámetro la componente aerodinámica es más importante.

Varios estándares han sido recomendados para medir la emisión del ruido de las turbinas de viento. De acuerdo a una función logarítmica de los niveles de ruido con relación al diámetro del rotor una turbina de los años 90 con un rotor de un diámetro de 40 m emitía un nivel de ruido equivalente a unos 98 decibeles (db); mientras esa misma emisión de sonido lo provoca una turbina moderna con un rotor de un diámetro cercano a los 70 m. Esto indica que las tecnologías de turbinas actuales emiten menos ruido que sus antecesoras (ECN 1998).

La posición de las turbinas es otro foco importante de ruido y es originado por la velocidad que pueda tomar el eje, ya que en la medida que tenga más velocidad el ruido que provocará será mayor.

El tercer factor de ruido es la distancia a la que se encuentra el foco emisor de ruido respecto del receptor. Esto viene dado por un esquema que muestra, según la distancia, los decibelios que puede llegar a tomar. Las circunstancias de percepción son debido a los vientos dominantes, los sonidos de fondo y la distancia del receptor (Figura 8).

**Figura 8. Ruido producido por un aerogenerador de acuerdo a la distancia del receptor**



Fuente: <http://www.ctio.noao.edu>

Para reconocer el ruido que produce el aerogenerador debe ser analizado siempre en el contexto en el que se encuentra y el ruido que predomina alrededor de éste. Por ejemplo, si se coloca un aerogenerador cerca de un aeropuerto la suma de los dos ruidos es mayor que cada uno por separado.

En general, los parques eólicos no son ruidosos si se comparan con otras máquinas de similar potencia.

Donde el viento sopla siempre en una dirección determinada es relativamente fácil aminorar el ruido. En cambio, si el viento sopla con dirección variable hay que dejar una amplia zona circular alrededor del parque eólico.

Con los aerogeneradores eólicos de última generación un parque eólico es prácticamente inaudible a una distancia de 500 metros. El diseño de los aerogeneradores, tanto en aislamiento de transmisión y generador como aerodinamismo de las palas ofrecen un nivel de ruidos cada vez más bajo (depende de cada fabricante) <http://www.ctio.noao.edu>.

Los niveles sonoros a los que se someta una población estarán además influenciados por el relieve, el ruido de fondo, la dirección del viento, apantallamientos por vegetación, etc., por lo que la distancia a la que se puede considerar que se presente impacto significativo es extremadamente variable.

**4. Impacto visual.** Tal vez sea este efecto el que más críticas suscita cuando la instalación se ha de ubicar en un lugar paisajísticamente valioso. Aunque la apreciación de este impacto es subjetiva los generadores son elementos extraños en un ambiente natural y que, por tanto, pueden perturbar su contemplación y disfrute.

Es preciso hacer un cuidadoso estudio de los efectos visuales de instalaciones ubicadas en lugares remotos, poco alterados por la acción antrópica y en espacios naturales de especial interés, tanto si tienen protección legal como si carecen de ella.

Los parques eólicos se caracterizan por ocupaciones del terreno lineales y relativamente extensas, considerable altura de los aerogeneradores y ubicación en lugares tales como cumbres. Suponen, por tanto, un impacto paisajístico al situarse en el terreno como elementos ajenos al medio y que polarizan las vistas de los posibles observadores.

Para minimizar los impactos visuales de aerogeneradores de mediano y gran tamaño, se puede reducir la sección de las palas, emplear colores poco llamativos y utilizar torres de baja solidez.

Hay que tener en cuenta que al impacto de la máquina debe añadirse el tendido eléctrico que le une a la red de transmisión.

Entre los elementos de la actividad eólica se distinguen:

- El propio parque eólico, siempre sujeto a la subjetividad del observador, al existir criterios y gustos contrapuestos sobre la estética y el grado de integración de estos elementos en el paisaje.
- El tendido eléctrico, genéricamente de menor impacto paisajístico que un parque eólico. Menos condicionado por requerimientos de localización, permite alternativas de trazado que impliquen pasillos de menor impacto visual.
- Otras actuaciones asociadas como accesos, vías y edificaciones anexas al parque como el edificio de control y subestación eléctrica. La gradación del impacto paisajístico es función directa de la necesidad de realizar aperturas de nuevos caminos, terraplenes, y de la extensión o volumen de los mismos, siendo entonces el condicionante principal la orografía del lugar.

Los aerogeneradores crean una intrusión en el paisaje dado que:

- Son estructuras verticales destacadas en un paisaje de componentes horizontales.
- Son estructuras artificiales de carácter puntual, lo que hace que su impacto visual, aunque exista sea menor que si fueran estructuras lineales que ocuparan grandes extensiones.
- Los objetos en movimiento atraen la atención del observador, por ello, las palas de los molinos girando constituyen puntos dominantes en el paisaje.
- La intrusión visual disminuye con la distancia. Los efectos visuales de un parque eólico dependen de las características del propio parque: tamaño, altura, material y color.

Aunque cada persona tiene una percepción única existe actualmente un consenso general acerca de las evaluaciones del paisaje. Esto no quiere decir que la mayor parte de la gente posea la misma opinión acerca del paisaje y la estética, pero hay ciertas opiniones regulares en sus juicios (<http://www.ctio.noao.edu>).

En estudios realizados por la Universidad de Leiden (Holanda) se encontró que la apreciación pública de un paisaje decrece en la medida que más turbinas son instaladas y que el tamaño de turbina tiene menos efecto en la apreciación. También encontró que se prefiere la colocación de turbinas en línea, en vez de realizar redes en forma rectangular (ECN 1998).

Un caso especial de impacto se produce por el efecto de la sombra de turbina eólica, particularmente con rotores de hoja. Estos pueden ser obstáculos cuando las turbinas son instaladas cerca de los lugares de trabajo o residencias. Sin embargo,

este efecto puede ser fácilmente predecible mediante cálculos de la posición horaria del sol para cada mes. (ECN 1998)

**5. Interferencia en las telecomunicaciones.** Las turbinas presentan un obstáculo para la incidencia de ondas electromagnéticas. Las ondas pueden ser reflejadas, dispersadas y difractadas; de esta forma las turbinas eólicas pueden interferir con las redes de telecomunicaciones, especialmente cuando una turbina eólica está colocada entre un transmisor de radio, televisión o microondas y un receptor puede, en ocasiones reflejar parte de la radiación.

**6. Erosión del suelo.** Se manifiesta principalmente durante la fase de construcción, siendo más reducida su incidencia en la operación. Los efectos resultan prácticamente insignificantes en general, considerando la mínima superficie definitivamente ocupada por los aerogeneradores y los usos tradicionales de los emplazamientos de un parque eólico (normalmente pastizales).

Para un parque eólico construido con máquinas de 660 kW es necesario mover unos 250 m<sup>3</sup> de tierra para cimentar la máquina. Además en promedio se necesitan construir 125-150 m de camino por máquina con un ancho de 3 m y una profundidad media que nunca pasa de 0.5 m. Es decir, otros 250 m<sup>3</sup> como máximo. Si la máquina funciona unas 2200 horas al año significa que por cada MWh producido se mueven para toda la vida del parque unos 0.34 m<sup>3</sup> /MWh, mientras que por cada MWh con centrales térmicas de carbón con minería a cielo abierto se mueven al año entre 7 y 10 m<sup>3</sup> (<http://www.ctio.noao.edu>).

Otro efecto sobre el suelo, especialmente en áreas deforestadas y sometidas a lluvias irregulares y frecuentemente intensas, es la activación de procesos erosivos. Las zonas de pendiente intensa son las más propensas a verse afectadas por este proceso, por lo que han de evitarse ubicaciones de aerogeneradores en áreas especialmente agrestes.

**7. Empleo.** En la aplicación de la energía eólica resultan más empleos que por otra fuente de energía. Por ejemplo generan 66% más que gas natural y 27% más que carbón, al mismo tiempo; que se ahorran recursos y se evita la futura contaminación del ambiente (ECN 1998).

En 1995 esta industria con sus productos y servicios fueron superiores a los 1.5 billones de dólares y dio empleo a un número aproximado de 40,000 personas. En promedio se necesitan 450 personas para operar y darle mantenimiento a turbinas eólica por cada TWh generado por año, y 6 personas son empleadas por MW de turbina eólica manufacturada (ECN 1998).

**7. Seguridad.** Los accidentes con turbinas son muy raros pero han sucedido, como en otras industrias. Estos accidentes han pasado en Europa y en Estados Unidos. En la mayoría de los casos, éstos sucedieron cuando los técnicos trataron de parar la turbina de viento.

Los accidentes ocurren cuando se rompen los álabes. En estudios realizados concluyeron que una probabilidad de fallo  $10^{-7}$  por año, la probabilidad que una persona esté cerca de la turbina cuando esto sucede es de  $10^{-7}$  por año y a una distancia de 600 m es  $10^{-10}$  por año. Esto indica que existe una probabilidad muy baja que se rompa un alabe y que una persona esté cerca cuando se da un accidente de esta naturaleza. Esta probabilidad baja aún más cuando se está a una distancia de 600 m de la turbina.

Sin embargo, otros estudios realizados en Alemania en los noventa (ECN 1998) indican que la fractura de los álabes tiene una ocurrencia de  $2.7 \cdot 10^{-2}$  por año, lo cual es un valor muchos más alto que el dado en los estudios iniciales. Sin embargo, estos valores en la actualidad son menores (ECN 1998).

Esto quiere decir que a pesar que en los años noventa los estudios realizados por Alemania mostraron que probabilidad de ocurrencia de una ruptura de un álabe era mayor que la reportada inicialmente; en la actualidad en las máquinas modernas la probabilidad de ruptura de estos equipos es muy baja.

#### **IV. OBJETIVOS**

- Determinación de las principales características del recurso eólico existente en el municipio de Comapa, Jutiapa.
- Estimar la potencia y energía que se podría generar con dicho recurso
- Identificar los impactos ambientales que tienen las plantas eólicas.
- Establecer la viabilidad técnica y ambiental de la instalación de un proyecto de granjas eólicas.

## **V. JUSTIFICACIÓN**

Debido a la alta dependencia energética que se tiene de los hidrocarburos en el mundo actual la búsqueda de otras fuentes de energía es una necesidad. Los precios de los combustibles fósiles son cada vez más elevados y con reservas limitadas que pueden provocar una crisis que afecte a todos los países, en especial a aquellos que no lo tienen, y que los hace más vulnerables.

Guatemala es un país que depende de la importación de los hidrocarburos; el 65% de su energía eléctrica la genera con plantas térmicas que queman este combustible. Esta condición tiene un impacto negativo en la economía, por los precios altos del servicio eléctrico, además de la incertidumbre en los suministros futuros de hidrocarburos. Unido a lo anterior se encuentra el impacto al ambiente que esta plantas generan mediante la emisión de gases de efecto invernadero, partículas sólidas y lluvia ácida.

El aprovechamiento de la energía eólica ha tenido grandes avances en los últimos años lo que la convierte en una alternativa energética para el país. Sin embargo, este recurso ha sido poco estudiado lo que dificulta su desarrollo en el país.

Existe información meteorológica de estaciones de medición de viento ubicadas en distintos sitios del país y un mapa de potencial eólico. Basándose en ambas fuentes, se seleccionó el municipio de Comapa, para estudiar el recurso eólico, utilizando software especializado disponible en el país.

Esta evaluación del recurso dará la pauta, no solo de la forma que se pueda aprovechar el recurso en el municipio, sino que validará información general que se tiene del viento del lugar.

Basándose en este trabajo en el futuro se puede evaluar el resto de la información existente para determinar el potencial eólico de otros sitios medidos en el pasado.

## **VI. METODOLOGÍA**

Este trabajo se desarrolló de acuerdo al siguiente esquema:

### **A. Unidad de análisis**

El universo de este trabajo lo constituyó los datos de vientos existentes del municipio de Comapa, Jutiapa.

### **B. Obtención de material y aprendizaje del proceso**

Este trabajo se inició con una investigación de literatura relevante para garantizar un mejor proceso basado en principios teóricos, enfocados en teoría de medición de viento, análisis e interpretación de datos. También se hará una revisión de estudios relacionados con impactos ambientales provocados por granjas eólicas en otros países de Centroamérica.

### **C. Medición y colecta de datos**

La primera parte del estudio consistió en coleccionar todos los datos que existen sobre mediciones realizadas con anterioridad por entidades como NRECA (National Rural Electricity Central América) y otras mediciones de vientos que puedan correlacionarse con dichos datos.

En adición a los datos de viento, se obtuvieron datos relativos a topografía, orografía, vegetación y obstáculos en la zona de estudio.

### **D. Análisis de datos**

Debido a la cantidad y calidad de los datos primarios del lugar no se pudo correlacionar esta información con otros datos de distintos sitios que mostraran un patrón similar de velocidad de viento.

La parte más crítica de este trabajo, consistió en la obtención de datos secundarios de calidad y cantidad del viento y de series de tiempo, que permitieron una estimación razonablemente técnica del recurso eólico.

### **E. Análisis de los aspectos ambientales**

Para esta parte del trabajo se hizo una recopilación de información técnica y de experiencias recientes de otros países en el desarrollo de proyectos de granjas eólicas. De esta forma, se identificaron los impactos ambientales que podría provocar un proyecto de esta naturaleza en Comapa, Jutiapa.

### **F. Cálculos y valoración del recurso**

Con base en los datos colectados sobre el recurso eólico, topografía local y factores secundarios, se seleccionó el sitio más adecuado para la instalación de posibles turbinas eólicas considerando además los aspectos ambientales.

Se discutió el tamaño de turbina de acuerdo a las condiciones locales que hagan posible la instalación de dichos equipos.

Para estos cálculos se usó un software especializado de viento llamado WasP, que usa información del lugar como rugosidad, topografía y obstáculos para calcular un viento regional. Ya con este valor de viento y usando las características de sitios aledaños al punto de medición se pueden definir las áreas con mayor potencial del lugar.

### **G. Materiales y recursos**

Para efectuar el trabajo de campo fue necesario el siguiente material y equipo:

- Un GPS
- Una cámara digital
- Mapas cartográficos con escala 1:50000
- Dos programas informáticos: 1) Wasp y, 2) Programa de digitalización.

## **VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En esta sección se describe lo referente a la obtención de los datos, la calidad y cantidad de los mismos. Posteriormente, se presentarán los resultados del procesamiento de esta información, con lo que se obtendrán los parámetros más importantes del recurso, tales como distribución de velocidad de viento, velocidad promedio anual y los parámetros de forma y escala del recurso del lugar. Finalmente se estimará la energía generada por el tipo de turbina que se seleccione para dicha área.

En la siguiente sección se hará una revisión de los aspectos ambientales más importantes que se deberán de tomar en cuenta a la hora de desarrollar un proyecto eólico en Comapa, Jutiapa. Para lo cual, se hará una descripción de algunas características del lugar, tales como temperatura, precipitación, radiación solar y zonas de vida.

Con base a la experiencia de proyectos eólicos de otros países, se evaluarán los impactos ambientales más importantes que se tendrían en el desarrollo de un proyecto eólico conectado a la red.

Finalmente se hará una revisión de las condiciones de infraestructuras necesarias para desarrollar un proyecto de esa naturaleza, siendo los más importantes la construcción de carreteras de acceso, cercanías de líneas de transmisión, etc.

### **A. Análisis de los datos de viento**

**1. Evaluación de los datos.** Los datos usados para evaluar el recurso en el municipio de Comapa, se obtuvieron de mediciones de viento realizadas en equipo marca NRG a dos distintas alturas, 15 y 30 m; se usó un registrador de datos marca NRG 9200 y se realizaron durante un año.

La calidad de dichos datos es importante, ya que a diferencia de los del Instituto Meteorológico Nacional (INSIVUMEH), estas mediciones fueron hechas con equipo especializado, que son usados específicamente para medir potencial eólico para fines energéticos.

Las mediciones fueron realizadas por Nacional Rural Electric Cooperative Association (NRCA) en los años 1992 y 1993. La importancia de estos datos estriba en que los mismos, fueron los últimos obtenidos en la región y con una buena calidad para los usos de este estudio.

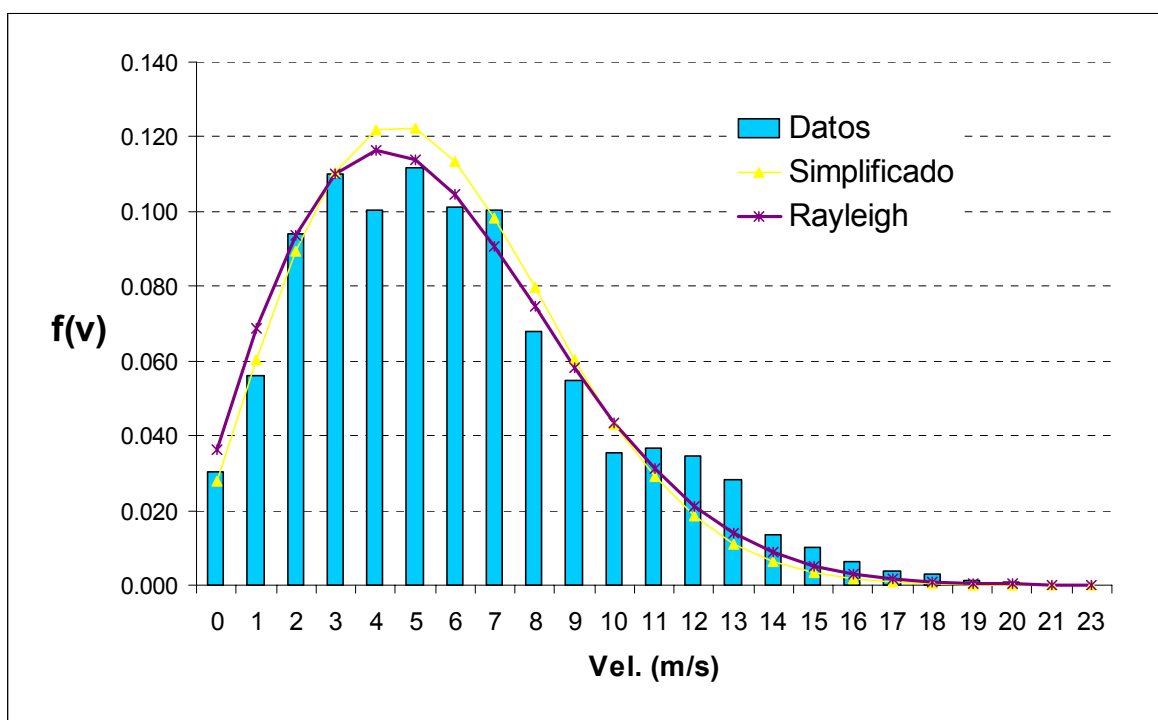
El período de medición de un año se considera adecuado para una estimación del recurso y para evaluar la conveniencia de seguir estudiándolo por un tiempo más prolongado y así desarrollar un proyecto con certidumbre cercana al 100%. Para este trabajo se considera que los resultados tiene una certeza de un 75% debido al período de tiempo medido (Centro Brasileiro de Energía 2002).

Los datos de velocidad de viento y dirección fueron obtenidos de dos torres ubicadas en el municipio de Comapa en las coordenadas siguientes: a) Latitud  $14^{\circ} 9' 42''$  y Longitud  $89^{\circ} 58' 28''$  (Sitio 1) b) Latitud  $14^{\circ} 9' 02''$  y Longitud  $89^{\circ} 57' 30''$  (Sitio 2) en las comunidad de Copalapa y la finca San Luis respectivamente.

**2. Cálculos y resultados de las mediciones.** Los cálculos y mediciones del recurso, se hicieron usando dos procedimientos; el primero, empleando cada una de las fórmulas presentadas en este trabajo de graduación. El segundo, empleando un software especializado de viento llamado "WasP" el cual trata de incluir otros factores como la topografía del terreno. Aunque, este último modelo es muy confiable en este estudio se utilizó parcialmente para comparar la variación con los resultados que proporcionó dicho modelo.

**a. Distribución de velocidad de viento.** Para la obtención de esta distribución se utilizó la frecuencia de velocidad para los dos sitios medidos y a dos distintas alturas (15 y 30 m). Se compararon tres métodos para la obtención de la distribución de velocidades, siendo estos: a) A partir de datos directos, b) El método Simplificado y c) Distribución de Rayleigh. De estos métodos el último describe en mejor forma la curva de distribución del recurso del viento, como se observa en la figura 9.

**Figura 9. Distribuciones de velocidad de viento para Sitio 1, altura 30m**



Fuente: Elaboración propia

A partir de esta distribución se estimaron los principales parámetros que aparecen en el cuadro 7, tales como: velocidad promedio anual, factores de forma y escala, Desviación Patrón, Densidad de Potencia y Factor de Energía.

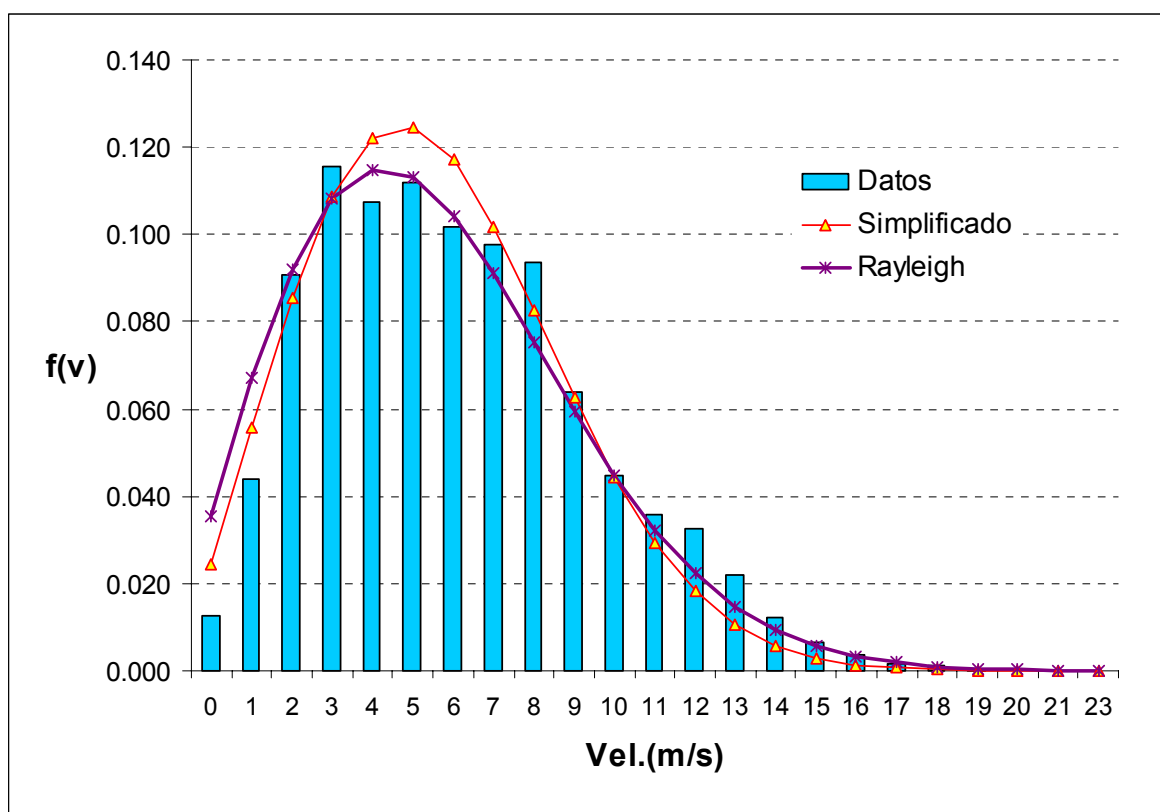
**Cuadro 7. Resultados comparativos de los parámetros eólicos obtenidos, Sitio 1, 30 m**

Variables	Símbolos	Datos	Simplificado	Rayleigh
Factor Forma	K		2.17	2.00
Factor de Escala	C		7.36	7.36
Velocidad media	Vm	6.52	6.52	6.52
Desviación Patrón	$\Sigma$	3.76	3.70	3.41
Relación	$\sigma/Vm$	0.58	0.57	0.52
Factor de Energía	Ke	1.76	1.76	1.91
Densidad Potencia	DP	361.99	298.90	323.59

Fuente: Elaboración propia

En la figura 10 se observan los parámetros de velocidad obtenidos para el Sitio 2, a 30 m, lo cuales fueron obtenidos usando el mismo procedimiento para el Sitio 1.

**Figura 10. Distribuciones de velocidad de viento para Sitio 2, altura 30m**



Fuente: Elaboración propia

Para este sitio también se calcularon los parámetros eólicos los cuales se presentan en el Cuadro 8.

**Cuadro 8. Resultados comparativos de los parámetros eólicos,  
Sitio 2, 30 m**

Variables	Símbolos	Datos	Simplificado	Rayleigh
Factor Forma	K		2.25	2
Factor de Escala	C		7.44	7.44
Velocidad Media	Vm	6.60	6.59	6.59
Desviación Patrón	$\Sigma$	3.42	3.10	3.44
Relación	$\sigma/Vm$	0.52	0.47	0.52
Factor de Energía	Ke	1.70	1.70	1.91
Densidad Potencia	DP	331.93	300.4	334

Fuente: Elaboración propia

Al comparar los resultados de los parámetros eólicos del Sitio 2 a una altura de 30m (Cuadro 8) se observa que la distribución de velocidad de viento que más se ajusta al comportamiento de viento es la Distribución de Rayleigh.

Los valores de velocidad media (Vm) para este Sitio 2 es de 6.59 m/s, se obtuvo a partir de la Distribución de Rayleigh, que como se indicó anteriormente, es la que más concuerda con la distribución del viento del sitio.

Al analizar los valores obtenidos de los factores de escala "k" y de forma "c", para el Sitio 2 (30 m), se observa que "k" es igual a 2, lo que indica que el viento es de poca turbulencia e intenso. Asimismo indica un mayor valor de uniformidad de los datos respecto a la velocidad media (Centro Brasileiro de Energía 2002).

Los valores de "c", que está relacionado con la velocidad media, es de 7.44 m/s para este Sitio están cercanos a los encontrados en la literatura para este tipo de distribuciones (Centro Brasileiro de Energía 2002).

El valor de Densidad de Potencia del sitio en cuestión es de  $334 \text{ W/m}^2$  que indica que el viento podría generar 334 Watt por metro de área de barrido de las aspas de la turbina. El valor obtenido se considera medio y concuerda con lo reportado en el Mapa de Potencial Eólico de Guatemala para esa región.

El valor de  $\sigma/V_m$  para el Sitio 2 (30 m) obtenido a partir de Distribución Rayleigh muestra una variabilidad media debido a que sus valores se encuentran cercanos a 0.50, lo que indica que este Sitio es adecuado para aprovechamiento energético del viento.

El factor de energía "ke" es un parámetro que muestra la relación entre la cantidad total contenida en el viento y se calculó para estimar la Densidad de Potencia (DP).

**Cuadro 9. Resultados comparativos de los parámetros eólicos,  
Sitio 1, 15 m**

Variables	Símbolos	Datos	Simplificado	Rayleigh
Factor Forma	K		2.05	2.00
Factor de Escala	C		7.22	7.22
Velocidad Media	$V_m$	6.40	6.40	6.40
Desviación Patrón	$\Sigma$	3.44	3.27	3.34
Relación	$\sigma/V_m$	0.54	0.51	0.52
Factor de Energía	Ke	1.86	1.86	1.91
Densidad Potencia	DP	311.71	297.79	305.66

Fuente: Elaboración propia

El cuadro 9, muestra los parámetros de velocidad obtenidos para el Sitio 1, a 15 m. Los valores obtenidos de los distintos parámetros guardan mucha similitud con los estimados en los Sitios 1 y 2, ya que la distribución que más se ajusta al comportamiento de viento es la Distribución de Rayleigh.

El parámetro de la  $V_m$  estimada para el Sitio 1 (15 m) fue de 6.40 m/s y su variante con las otras estimaciones se debe a que la medición se hizo a una altura menor. Esto tuvo como consecuencia que la DP también fuera más baja con un valor de 305.66 W/m<sup>2</sup>.

Más adelante se hará una comparación de los valores de los distintos parámetros obtenidos para los dos sitios y a las dos distintas alturas (15 y 30 m).

**Cuadro 10. Resultados comparativos de los parámetros eólicos,  
Sitio 2, 15 m**

Variables	Símbolos	Datos	Simplificado	Rayleigh
Factor Forma	k		1.76	2.00
Factor de Escala	c		6.87	6.87
Velocidad Media	$V_m$	6.08	6.11	6.08
Desviación Patrón	$\sigma$	3.19	3.57	3.18
Relación	$\sigma/V_m$	0.52	0.58	0.52
Factor de Energía	$K_e$	2.16	2.14	1.91
Densidad Potencia	DP	262.14	303.86	262.97

Fuente: Elaboración propia

Al comparar los distintos parámetros de velocidad de viento obtenidos de los dos sitios de Comapa se observa que las distribuciones de velocidad de viento que más se ajusta al comportamiento del viento es la Distribución Rayleigh.

Los valores de velocidad media anual obtenidos para los dos sitios muestran algunas diferencias; tal es el caso que para el Sitio 1, la  $V_m$  es de 6.52 m/s, mientras que para el sitio 2 es de 6.59 m/s. Esto indica que en el Sitio 2, la velocidad es ligeramente mayor, lo cual, se debe entre otros factores a que la torre se situó a una mayor altura. Asimismo, los valores de  $V_m$  obtenidos en los dos sitios a 15 m mostraron una diferencia más significativa que los de 30 m, debido a que la rugosidad del segundo sitio era mayor, ya que había un mayor número de arbustos y población cercana.

Al relacionar los resultados de  $V_m$  de los dos sitios entre los valores obtenidos a 15 y 30 de cada torre se observa un comportamiento de gradiente de velocidad esperado, lo que indica que en la medida que la altura de medición aumenta, el efecto de la rugosidad y la topografía van en disminución. Esta condición confirma que los sitios en donde se hicieron las mediciones, a mayor altura se esperan mayores velocidades de viento. De esta forma se espera que la producción de energía sea mayor.

Al analizar los valores obtenidos de los factores de escala "k" y de forma "c", para los sitios de estudio, se observa que "k" es mayor de 2 lo que indica que el viento es de baja turbulencia e intenso, se ubica en una meseta donde hay una buena exposición de viento, y donde no se observa ningún patrón diario (Centro Brasileiro de Energía 2002). Igualmente se observa una mayor valor de uniformidad de los datos respecto a la velocidad media.

Para el factor de "c", que está relacionado con la velocidad media, los valores se situaron entre 7.36 y 7.44 m/s a una altura de 30 m. Estos valores están cercanos a los presentados en la literatura para estas distribuciones de viento (Centro Brasileiro de Energía 2002).

Los valores de  $\sigma/V_m$ , obtenidos de los dos sitios analizados en Comapa muestran una variabilidad media ya que sus valores están cercanos a 0.50, lo que indica que el sitio es adecuado para aprovechamiento energético del viento.

El factor de energía "ke" es un parámetro que muestra la relación entre la cantidad total contenida en el viento y la energía obtenida considerando la velocidad como constante e igual a la velocidad media. Este factor se calculó porque sirvió para estimar la Densidad de Potencia (DP).

La  $D_p$  indica cuál es la potencia que podría generar un viento específico y está dado en  $W/m^2$ ; dicho de otra manera, es la potencia generada por área de barrido de las aspas de la turbina. Para los sitios 1 y 2, los valores fueron de 323 y 324  $W/m^2$ ; los valores obtenidos se consideran medios y concuerdan con lo reportado en el Mapa de Potencial Eólico de Guatemala para esa región.

**b. Dirección del viento.** Este es un parámetro importante en la evaluación del viento ya que por medio de él se define cuál es la dirección predominante del lugar. Con esta información se dirige adecuadamente la dirección de las turbinas para la generación de electricidad.

Para este estudio, se tomaron como base los datos de dirección de los dos sitios en cuestión, (1 y 2) a una altura de 30 m ya que esta altura está más cerca de la ubicación del rotor de la turbina que se va a colocar.

Al analizar la dirección del sitio 1 se observa que el viento presenta una orientación mayoritariamente noreste, que coincide con la orientación que presentan los vientos alisios. Igualmente tiene una componente suroeste importante debido a su posición cercana a la costa sur afectada por los vientos Monsónicos que vienen de esa dirección. (Cuadro 11)

Asimismo, los datos de dirección de viento para el sitio 2, muestran que éstos tienen una orientación noreste, que coinciden con la dirección de los vientos Alisios que se hacen presente con mayor intensidad durante los meses de octubre a febrero. Al igual que el sitio 1, estos datos también tienen una componente suroeste, debido a la presencia de vientos Monsónicos que vienen con dirección del sur (Cuadro 12.)

**Cuadro 11.**  
**Dirección de viento del Sitio 1 a 30 m**

Dirección (°)	(%)
30	25.51
60	40.87
90	5.03
120	0.65
150	0.79
180	1.54
210	3.40
240	13.82
270	2.22
300	0.40
330	1.75
360	4.01

Fuente: Elaboración propia

Las diferencias de dirección entre los Sitios 1 y 2 son debidas a la variante topográfica originada debido a las diferentes elevaciones de los cerros ubicados en la parte anterior en la dirección del viento. En el momento de diseñar el parque, podría minimizarse con una adecuada orientación de las turbinas.

**Cuadro 12.**  
**Dirección de viento del Sitio 2 a 30 m**

Dirección (°)	(%)
30	35.57
60	24.33
90	18.11
120	1.92
150	0.82
180	1.04
210	2.03
240	7.42
270	7.56
300	0.53
330	0.33
360	0.34

Fuente: Elaboración propia

**c. Comparación de los parámetros de velocidad y dirección del viento, usando WasP.** Este trabajo no tiene como objetivo la comparación del manejo de los datos obtenido por distintas metodologías sin embargo, dado que esta herramienta (WasP) podría en un momento ahorrar mucho esfuerzo, se consideró conveniente conocer los resultados que brinda dicho programa.

El cuadro 13 presenta los parámetros de Velocidad media y Densidad de Potencia obtenidos usando el programa WasP. Los valores dados toman en cuenta las mediciones de velocidad y dirección de viento de los Sitios 1 y 2 a 30 m.

A partir de la distribución de velocidad calculada con este programa la  $V_m$  es de 6.73 m/s con una discrepancia de un 0.22% con relación a los datos medidos, asimismo, la Densidad de Potencia es de 377.91 W/m<sup>2</sup>.

El parámetro de  $V_m$  (6.73 m/s) calculado con este programa tiene una variación de un 2.2 % con los estimados usando la Distribución de Rayleigh, sin embargo, para los fines de ese estudio se tomará como válido el dato obtenido por esta distribución que son 6.52 y 6.59 m/s para los Sitios 1 y 2 respectivamente.

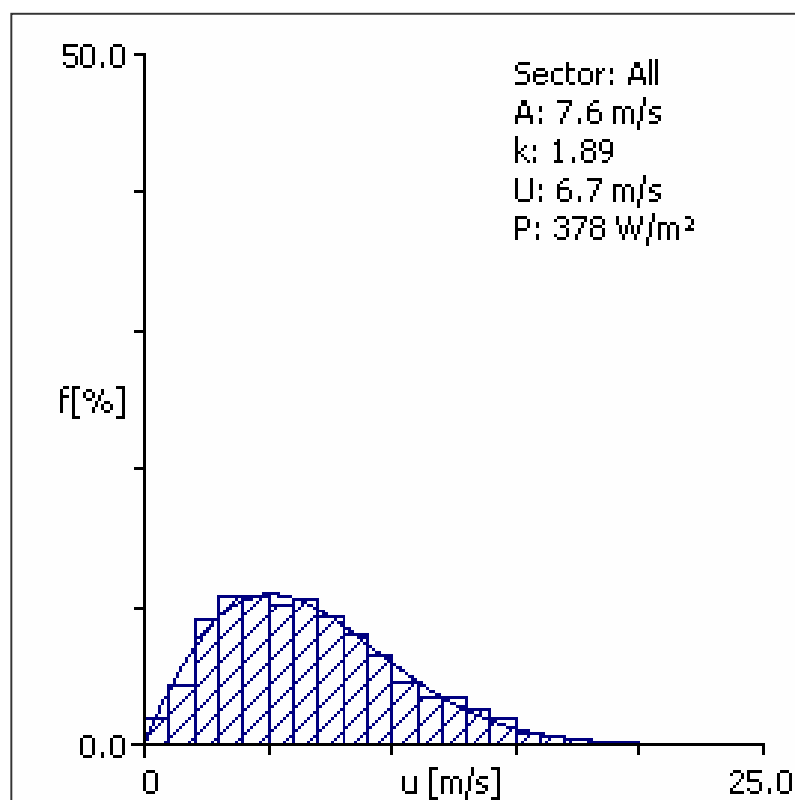
**Cuadro 13. Reporte de parámetros de velocidad del los sitios 1 y 2, a 30 m usando WasP**

	Unidades	Mediciones	Distribución de Weibull	Discrepancia
Velocidad media	m/s	6.75	6.73	0.22%
Densidad de potencia	W/m <sup>2</sup>	376.66	377.91	0.33%

Fuente: Programa de viento WasP

En la distribución de velocidad de viento se integran los datos de mediciones de viento y dirección de los sitios 1 y 2, produciendo la distribución que se presenta en la figura 11.

**Figura 11. Distribución de velocidades de viento de los sitios 1 y 2, a 30 m mediante WasP**



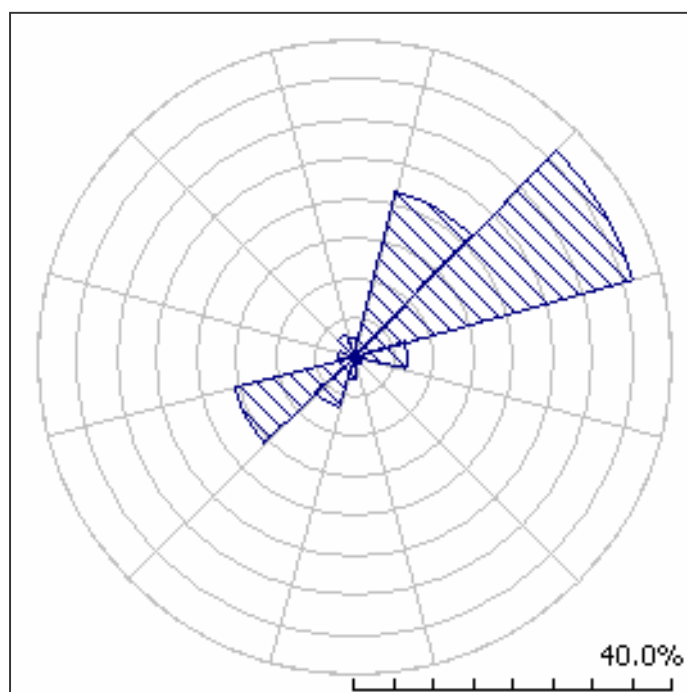
Fuente: Programa de viento WasP

La información mostrada por el programa WasP brinda, además, los valores de parejas de datos aceptados y rechazados, siendo los siguientes: a) Para el Sitio 1, 71.43% aceptados y 28.57% rechazados y, b) Para el Sitio 2, 65.8% y 34.2 % respectivamente. Estos valores deben ser tomados en cuenta, cuando se habla de la certeza de los datos.

El concepto de valores aceptados y rechazados está relacionado con las lecturas que efectúa el anemómetro. Cuando existe una descarga electroatmosférica el aparato registra un valor negativo lo que indica que no hubo lectura; igualmente, cuando se da una ráfaga que sobrepase un valor prefijado en las mediciones, el equipo registrará el mismo valor negativo. Estos dos tipos de registros el programa WasP los toma como rechazados. El resto de los datos positivos de velocidad y dirección los considera como aceptados.

En cuanto a la dirección del viento el programa hace una integración de los dos grupos de datos y muestra una rosa de vientos que caracteriza al viento en la región en donde el mismo fue medido, y que se puede extrapolar para el resto del municipio de Comapa. Los valores presentados muestran pequeñas diferencias ya que en la metodología usada en el método anterior el análisis de la dirección del viento se hizo por separado.

**Figura 12. Rosa de Viento de dirección sitios 1 y 2 a 30 m**



Fuente: Elaboración con programa WasP

**d. Cálculo de la Energía Anual Generada.** La Energía Anual Generada es la información más importante que se obtiene identificando cuál es la energía media anual ofrecida por la turbina.

Para este estudio la Energía Anual Generada –EAG- se determinó usando la distribución de velocidades del Sitio 1, obtenida por el ajuste de los datos de velocidad medidos y la curva de potencia de la turbina dada por el fabricante.

Para la estimación EAG para el sitio en cuestión, se tomaron las curvas de las turbinas de 660 y 850 kW de Vestas; 600 y 1000 kW de NEG, 600 y 1000 kW de UNICOM.

Para la estimación de la EAG para la turbina de 850 kW de Vestas, se calculó de acuerdo con la distribución de velocidad de viento multiplicada por la curva de potencia de dicha turbina como se presenta en el cuadro 14. La Energía Anual Generada por la turbina es de 2,077 MWh con factor de planta –FC- de 28%.

La mayor cantidad de energía generada fue la de V52-850 que tiene una potencia de 850 kW es de 2,077 MWh, que comparada con el resto de turbinas seleccionadas para este trabajo (Cuadro 15)

Para el resto de turbinas con las que se estimó la EAG y FC se siguió un procedimiento similar; los resultados se presentan en el cuadro 15.

De los valores de factor de planta –FC- obtenidos el de la turbina de Vestas V52-850 es el mayor, y se ubica dentro de los valores que hacen factible el desarrollo de un proyecto con granjas eólicas conectadas a la red (Instituto Brasileiro de Energía 2002).

Para estimar el número total de turbinas que se pueden instalar se tomó el criterio de separación de turbinas de tres veces el diámetro del rotor; para el caso de este trabajo se consideró la turbina de Vestas de 850 que tiene un diámetro de 52 m. De esta forma podrían instalar diez turbinas que harían una capacidad total de 8,500 kW, lo que tendría una generación total estimada de 20,770, MWh durante un año, en el área comprendida entre los sitios medidos (Figura 13).

**Cuadro 14. Estimación de EAG y FC, para turbina V52, 850 kW**

v(m/s)	f(v)	kW (curva de potencia)	P(v)f(v)
1	0.03546436	0	0
2	0.06718902	0	0
3	0.09208377	0	0
4	0.10820137	20.8	2.25058842
5	0.11496645	60.1	6.90948337
6	0.11310925	114.6	12.9623196
7	0.10435375	189.4	19.7646003
8	0.09096631	285.6	25.9799785
9	0.07528892	408.7	30.7705835
10	0.05936138	550.5	32.6784391
11	0.04469197	688.7	30.7793579
12	0.03218609	788.7	25.3851709
13	0.0222023	831.3	18.4567727
14	0.01468479	842	12.3645922
15	0.00932037	847	7.89435743
16	0.00568044	849.5	4.82553356
17	0.0033262	850	2.82726873
18	0.00187209	850	1.59127541
19	0.00101316	850	0.86118912
20	0.00052741	850	0.44829555
21	0.00026414	850	0.2245229
22	0.00012731	850	0.10821522
24	2.6379E-05	850	0.02242218
			237.104967

<b>EAG =</b>	<b>2,077,040</b>
<b>FC =</b>	<b>28%</b>

Fuente: Elaboración propia.

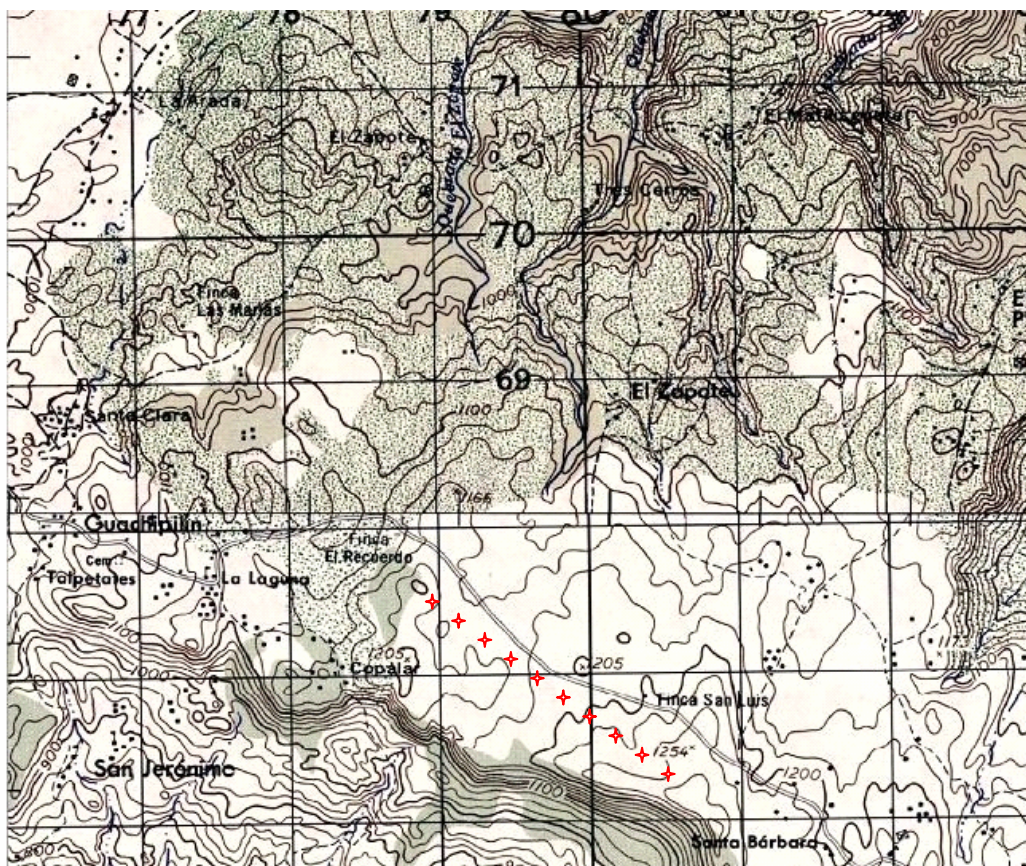
**Cuadro 15. Energía Anual Generada –kWh- por distintas turbinas para sitio 1 y 2**

VALORES	TURBINAS	
	VESTAS	
	660 kW	850 kW
EAG(kWh)	1,268,638.3	2,077,039.5
FC	22%	28%
	ENERCOM	
	600 kW	1000 kW
EAG(kWh)	1,128,466	1,957,182
FC	21%	22%
	BONUS	
	600 kW	1000 kW
EAG(kWh)	1,079,065	1,762,542
FC	21%	20%
	NEG	
	600 kW	1000 kW
EAG(kWh)	1,035,556	1,971,441
FC	20%	23%

Fuente: Elaboración propia

Para determinar la EAG del proyecto eólico propuesto se estimó que dentro del área lineal entre los dos sitios de medición podrían instalarse 10 turbinas con una potencia de 850 kW y una generación de 2,770 MWh cada una, y tomando en cuenta que el recurso tiene las mismas características en dicha área, la estimación de la generación total de energía del proyecto se obtendría multiplicando por 10 (número de unidades propuestas) la generación de la turbina Vestas 52-850 lo que daría 20,70 MWh durante un año. La ubicación de las turbinas se encuentra en la figura 13.

**Figura 13. Ubicación del proyecto eólico de 8.5 MW**



Fuente: IGN. Hoja Cartográfica 1:50.000

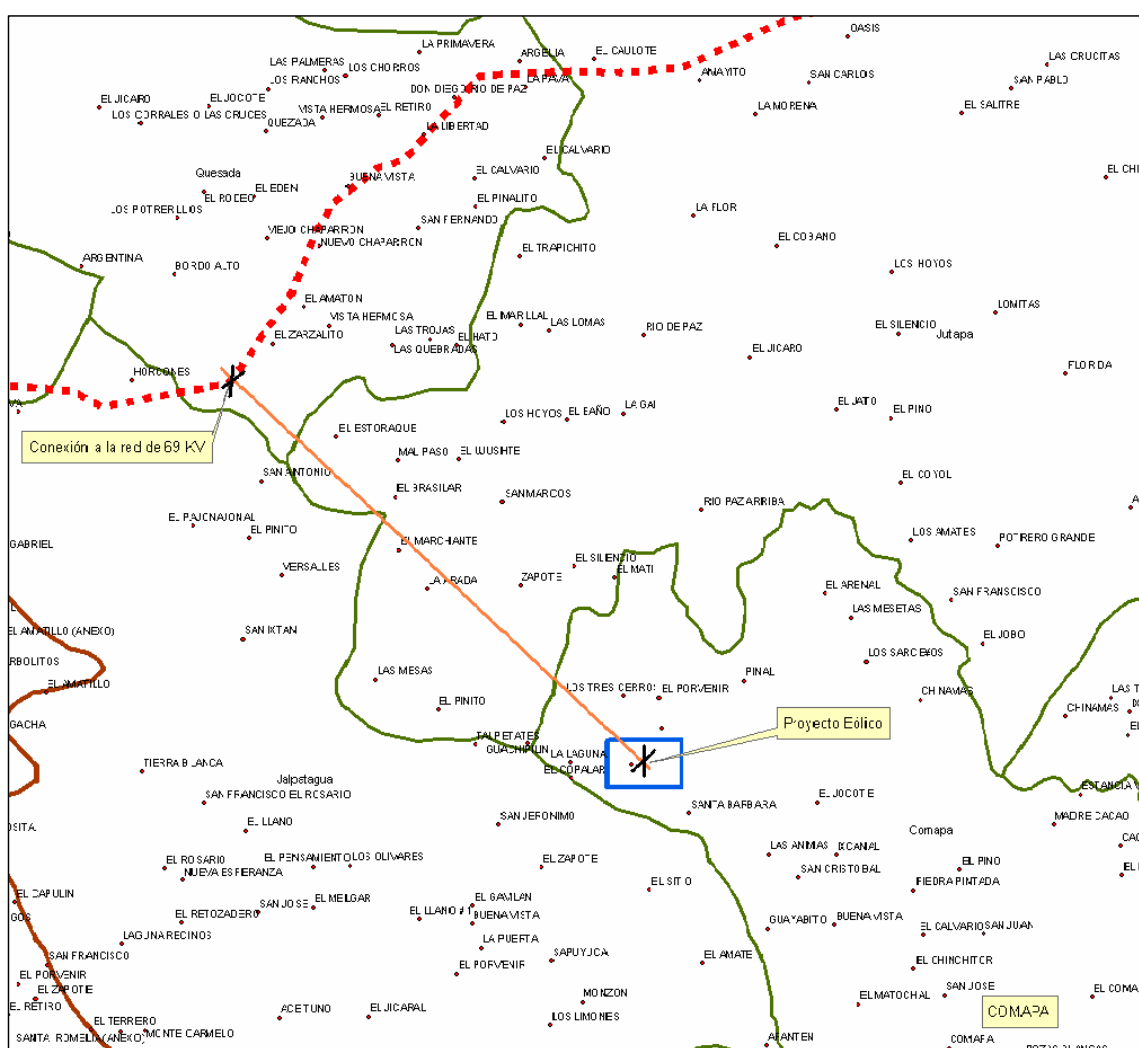
## **B. Ubicación de futuro parque eólico**

Para tomar la decisión de la ubicación del futuro parque eólico (granja eólica) es necesario que se cumplan con las condiciones siguientes: una topografía adecuada, conocimiento de la geología general, acceso y transporte a través del sitio, posibilidad de interconexión a la red y análisis de dirección de viento (Proyecto Swera 2001).

Para la ubicación de la granja eólica en el municipio de Comapa se logró analizar cada una de las características a cumplir en el área en donde se ubicarán las torres. Los sitios en donde se hizo la medición están en promedio a 200 m y pasa en

frente de ellos una carretera de terracería de más de 6 m de ancho. El proyecto propuesto estaría en toda su extensión a la par de esta carretera dada sus características de topografía y dirección del viento.

La línea de alta tensión de 69 KV pasa a 11 km del lugar lo que se considera una distancia relativamente corta (Figura 14).



**Figura 14. Interconexión con la red del proyecto eólico.**

Fuente: MEM 2006

Todas las condiciones anteriores hacen que el proyecto sea viable para desarrollarse en el municipio de Comapa.

### C. Aspectos ambientales

**1. Características del municipio.** En esta sección se hace una descripción de las características ambientales previo a que el proyecto sea implementado. Las características del sitio condiciones climáticas, aire agua, suelo y vegetación.

**2. Clima.** En el cuadro 16 se presentan los valores de las variables climáticas más importantes. El valor de temperatura promedio de Comapa es de 24 ° C que es característico de climas cálidos. La precipitación de 1100 mm de agua se considera que es un valor bajo que contrasta con un índice de sequía alto que tiene el municipio.

**Cuadro 16. Valores de las variables climáticas de Comapa**

Variable	Valor
Temperatura promedio	24° C
Precipitación	1100 mm de agua
Radiación solar	6-6.5 kWh/día

Fuente: Atlas temático de Cuencas Hidrográficas de la República de Guatemala

**3. Otras características de Comapa.** A continuación se presenta un resumen de las características relativas al uso de la tierra, suelo, intensidad y uso de la tierra. Cuadro 17.

El municipio de Comapa está conformado de montañas Volcánicas Orientales, de tierras no cultivables, cubierto de cultivos forestales de asociación mixto-cultivo y arbustal, en donde predominan los pastos naturales. Las zonas de vida del municipio

son Bosque húmedo subtropical cálido y Bosque húmedo subtropical templado, las cuales están relacionadas con la precipitación que se da en el lugar.

En términos generales se puede decir que en el municipio de Comapa la tierra no tiene vocación agrícola y que el resto de las condiciones ambientales hacen que dicho municipio tenga poca producción agrícola.

**Cuadro 17. Otras características ambientales de Comapa**

No.	Característica	Condición
1	Cobertura forestal	Asociación Mixto-cultivo y bosque secundario arbustal
2	Intensidad de uso de la tierra	En su mayoría es subutilizada
3	Capacidad de uso de la tierra	Son tierras no cultivables, salvo para algunos cultivos perennes, principalmente producción forestal. Tiene factores muy severos de relieve, profundidad y jocosidad. Relieve ondulado fuerte y quebrado.
4	Mapa fisiográfico-geomorfológico	Todo el municipio está conformado por montañas Volcánicas Orientales.
5	Mapa de Cobertura vegetal y uso de la tierra	Está cubierta por pastos naturales y charral o matochal
6	Zonas de vida	Bh-S(c) Bosque húmedo subtropical calido y Bh-S(t) Bosque húmedo subtropical templado.

Fuente: Atlas temático de Cuencas Hidrográficas de la República de Guatemala 2004.

**4. Vegetación.** El área está cubierta con bosque semideciduo montañoso de nivel inferiores con un alto nivel de intervención humana que conforma un bosque ralo combinado con pastos y cultivos abundantes (Mapa de Ecosistemas Vegetal INAB-2002).

Entre las especies que predominan la región se encuentran el Matazano, Manzana Rosa, Guachipilín, Calagua, Matiliguat y Conacaste (Martínez Vásquez, Luis, CONAP).

**5. Fauna.** Debido a la naturaleza del proyecto, la investigación que se realizó en el lugar sobre fauna se hizo énfasis en las aves, determinándose que las especies más importantes son: Azacuán, Urracas, pericas señoritas, quebrantahuesos y gavilán (Martínez Vásquez, Luis, CONAP).

**6. Condiciones socioeconómicas.** El municipio de Comapa tiene una extensión de 132 km<sup>2</sup>, su población es de 23,715 habitantes, está ubicado a 1250 metros sobre el nivel del mar y su clima es templado. Su producción agropecuaria es de maíz, frijol, ayote, maicillo, henequén, maguey y chile. Su producción artesanal es de cerámica, jarcia, muebles de madera, teja y ladrillo de barro (Instituto de Estudios y Capacitación Cívica 2001) (INE 2002).

Con relación a los niveles de pobreza, el municipio tiene un 83.15% de pobreza y un 34% de pobreza extrema (SEGEPLAN 2001).

**7. Evaluación de los impactos ambientales de un proyecto de Granja Eólica en Comapa.** La revisión de los impactos que se realizarán en esta sección no pretenden sustituir a un Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, sino más bien, identificar algunos de los impactos importantes que podría tener en el municipio un proyecto de una granja eólica de 8,500 kW según las estimaciones realizadas sobre la capacidad que se puede instalar en el área en de estudio.

**a. Evita la emisión de gases de efecto invernadero.** En la estimación de toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas se consideró que la vida media de un proyecto es de 20 años y que la granja eólica puede generar cerca de 400 GWh al año (tomando de base tiene una generación anual de 20 GWh).

Para la estimación de las toneladas evitadas de CO<sub>2</sub> se tomó como base la metodología seguida para el estudio *Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en la actividad energética de Guatemala* (Mansilla Mejía 2004). El cálculo inicial consistió en determinar la cantidad de combustible (bunker, diesel y carbón mineral) que desplazaría la producción de energía usando el recurso eólico durante 20 años que se considera la vida útil del proyecto (Cuadro 18).

**Cuadro 18. Combustible desplazado por el proyecto Eólico de Comapa**

Combustible	Generación desplazada en KWh	Rendimiento (KWh/gálon o ton combustible)	Combustible desplazado en Galones	Combustible desplazado en Barriles
	A	B	C=A/B	D= C/42
<b>Diesel</b>				
- Turbina de gas	400,000,000	10	40,000,000	952,380.95
<b>Bunker</b>				
- Planta de vapor	400,000,000	12	33,333,333	793,650.79
- Motores recíprocos	400,000,000	17	23,529,412	560,224.09
<b>Carbón mineral (*)</b>	400,000,000	2528	-	158,227.85

(\*) Rendimiento del carbón mineral está en ton

Fuente: Elaboración propia usando información de MEM y la metodología del IPCC.

El proyecto Eólico de Comapa, tomando en cuenta los rendimientos de kWh/gal combustible y con una generación de 400 GWh se dejaría de usar durante el período de 20 años 952,380.95 barriles de diesel, 793,650.79 barriles de bunker usando una planta de vapor y 560,224.09 barriles de este combustible usando motores recíprocos; para el caso del carbón mineral se dejarían de usar 158,227.85 ton de carbón.

El cuadro 19 muestra el contenido de carbono que tendría cada uno de los combustibles si se hubieran empleado para la generación de los 400 GWh del proyecto. El mayor contenido de carbono lo tiene el carbón mineral con 44,049.90 ton y la generación eléctrica por medio de motores recíprocos empleando bunker tiene el valor más bajo siendo este 25,997.19 ton

**Cuadro 19. Contenido de Carbono de los combustibles desplazado por el proyecto**

Combustible	Combustible desplazado en barriles	factor de conversión de 10 <sup>3</sup> barriles a TEP (#)	Consumo de energía (TEP)	factor de conversión de TEP a (TJ)	Consumo de energía (TJ)	Factor de Emisión de Carbono (ton C/TJ)	Contenido de Carbono (ton)
	A	B	$C=A/1000*B$	D	$E=C*D$	F	$H=E*F$
<b>Diesel</b>							
- Turbina de gas	952,380.95	136.80	130,285.71	0.01484	1,933.44	20.20	39,055.49
<b>Bunker</b>							
- Planta de vapor	793,650.79	148.20	117,619.05	0.01484	1,745.47	21.10	36,829.35
- Motores recíprocos	560,224.09	148.20	83,025.21	0.01484	1,232.09	21.10	25,997.19
<b>Carbón mineral (*)</b>							
	158,227.85	0.70	110,758.30	0.01484	1,643.65	26.80	44,049.90

(\*) Ton para carbón mineral

(#) TEP = ton equivalentes de petróleo

Fuente: Elaboración propia con factores de conversión de (Nicaragua 1998) y (Mansilla 2004)

Con el desplazamiento en el uso de estos combustibles (diesel, bunker y carbón mineral) con la implementación del proyecto eólico, se dejarían de emitir a la atmósfera dependiendo del combustible desplazado, las siguientes cantidades de CO<sub>2</sub>: 154,242.86 ton con turbinas de gas que usan diesel; 145,451.10 ton si se emplean plantas de vapor que consumen bunker; 102,671.37 ton si la generación se lleva a cabo con motores recíprocos que queman bunker; y 174,437.62 ton de CO<sub>2</sub> si para la generación se lleva a cabo con carbón mineral (Cuadro 20).

**Cuadro 20. Cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los combustibles evitados**

Combustible	Contenido de Carbono (ton)	Fracción del carbono oxidado	Conversión de Carbono a CO <sub>2</sub>	Emisiones de CO <sub>2</sub>
	A	B	C	$D=A*B*C$
<b>Diesel</b>				
- Turbina de gas	38,950.22	0.99	44 / 12	154,242.86
<b>Bunker</b>				
- Planta de vapor	36,730.08	0.99	44 / 12	145,451.10
- Motores recíprocos	25,927.11	0.99	44 / 12	102,671.37
<b>Carbón mineral</b>	44,049.90	0.99	44 / 12	174,437.62

Fuente: Elaboración propia con factores de conversión de (Nicaragua 1998) y (Mansilla 2004)

**b. Agotamiento de los recursos naturales.** La instalación de una planta eólica puede conservar las reservas de combustibles fósiles, y por consiguiente evitar la polución en la transformación de estos combustibles. Además, la generación eólica por lo general se produce cuando las plantas hidroeléctricas tienen baja generación debido a la época seca, permitiendo que siempre se genere electricidad con fuentes renovables de energía.

**c. Impacto en el uso de la tierra.** Debido a las características del lugar en donde se desarrollará el proyecto, caracterizada por tierras no cultivables de pastos naturales y matorrales, y tomando en cuenta que es utilizado para pastar ganado se considera que no afecta el uso de la tierra. Esta actividad es compatible con el proyecto eólico.

**d. Ruido.** Las turbinas Vestas 52-850 generan ruido de 45 dBA cuando giran a una velocidad de 8 m/s; a una distancia de 500 m su ruido casi es inaudible. Dado que la población más cercana al sitio queda a casi un 1Km en dirección perpendicular al proyecto se espera que el ruido no tenga un impacto significativo ya que el nivel de ruido se disminuye a menos de 40 dBA. Según la Organización Mundial de la Salud, en áreas al aire libre un sonido entre 50-55 dBA solamente causa molestias a las personas, confirmando con esta información que las turbinas no van a provocar algún deterioro al oído de las personas ([www.who.org](http://www.who.org))

Esta información se puede comparar con la evaluación de ruido realizada al proyecto Tejona (Costa Rica) de 20 MW, en donde se calcularon que los valores de emisión de ruido se encontraron entre 35 y 55 dBA (Van Hulle, *et al*, 2002).

**e. Impacto visual.** La evaluación de este impacto ha sido muy subjetiva; sin embargo, el mismo se vuelve importante cuando el proyecto se va a desarrollar en lugares con cierto valor arquitectónico y un paisaje característico de una región con una vegetación de especial interés. Para el caso de este proyecto, las zonas en

donde se ubicarían las turbinas son áreas altamente deforestadas y que no tienen un valor paisajístico. Se espera entonces, que su impacto sea mínimo para la mayoría de los habitantes del municipio. Por otro lado se puede pintar las bases de las turbinas con colores que armonicen con la naturaleza circundante.

Debido a la expectación que podría causar la instalación de las turbinas en el lugar su impacto se podría convertir en positivo dado a la cantidad de turistas que podrían visitar el lugar (<http://www.ctio.noao.edu>).

En el estudio de Evaluación de Impacto Ambiental del proyecto Tejona (Costa Rica) para evaluar este mismo impacto, se determinó la "Zona de Influencia Visual" (ZVI) en un área de 16 Km<sup>2</sup> y se concluyó que en un 13% de dicha área no se pueden observar las turbinas, y que al menos en un 50% del mismo sitio se pueden ver 23 o más turbinas de un total de 30 que se encuentran instaladas.

**f. Efecto de sombra.** En vista que cerca del lugar no existen viviendas, no se da el efecto de sombra.

### **g. Impacto en suelo y vegetación durante la construcción y operación**

**1) Impacto durante la construcción de la planta.** Los lugares seleccionados para la instalación de las turbinas se encuentran muy cercanas de la carretera de acceso al municipio por lo que no será necesario la construcción de caminos de acceso y por lo mismo no se tendrá que alterar el suelo existente.

Los impactos más importantes del proyecto al suelo y vegetación se producen cuando se está construyendo las bases para la instalación de las turbinas. Un proyecto de unos 10 MW requiere aproximadamente 18 meses de construcción e instalación. El movimiento de tierra es moderado debido al tipo de suelo que se tiene en el lugar y por consiguiente su impacto es moderado (Van Hulle, *et al*, 2002).

Para minimizar aún más el impacto de la erosión va a ser necesaria una revegetación del lugar al mismo tiempo que el equipo se esté montando.

Durante la fase de construcción se incrementa significativamente el tráfico en el área debido al envío de las turbinas y equipo adicional necesario para montar el proyecto, como por ejemplo grúas de 250 ton. Sin embargo, este traslado se realiza en períodos relativamente cortos. Por esto se considera que el impacto es limitado.

**2) Impacto durante la operación.** Durante la operación del proyecto se incrementa ligeramente el tráfico; sin embargo, esto no impacta significativamente el sistema de transportación. El personal de la planta deberá seguir fielmente los procedimientos que se utilizan regularmente en la instalación de cualquier tipo de generadora teniendo cuidado con los tratamiento de desechos de basuras y aguas.

**h. Interferencia electromagnética.** Esta se refiere a las distorsiones que podría afectar señal de TV, radar u otro tipo de señal que se encuentra cerca del proyecto. La ubicación es una área rural en donde las viviendas están dispersas y por consiguiente lejos del proyecto.

Asimismo, cerca del proyecto no se encuentra aeropuerto alguno que pudiera ser afectado por algún tipo de interferencia provocado por las turbinas eólicas.

Según (ECN 2002) indicó que con relación a la interferencia electromagnética en antenas parabólicas y televisión sin cable, no eran afectadas por las plantas eólicas cercanas.

**i. Impacto a las aves.** Cuando los parques se construyen en tierra firme la colisión de las aves migratorias con las aspas podría considerarse como un impacto importante.

De acuerdo a la consulta efectuada al Agrónomo Luis Enrique Martínez Vásquez, técnico en Vida Silvestre de CONAP (Jutiapa) en el municipio de Comapa no existen rutas de aves migratorias y por consiguiente, en la fase de operación se espera que no se tenga ningún incidente por colisión de aves.

De las especies de aves locales, las golondrinas y los gavilanes son especies que podrían colisionar con las aspas; sin embargo, estudios realizados en proyectos de similares capacidades y de una fila, se encontró que el promedio diario de muertes de aves por colisión que podrían ser esperadas se encuentra entre 0.1 a 1.2. Esta condición daría un impacto moderado, el cual, tendría que ser estudiado detenidamente por un especialista (ECN 1998).

## VIII. DISCUSIÓN

Cuando se identifican las principales características del recurso eólico de un lugar, el primer aspecto que hay que tomar en cuenta, es la calidad y cantidad de datos. La primera condición se cumplió con los datos que se utilizaron para evaluar el recurso existente en el municipio de Comapa. El segundo aspecto relativo a la cantidad de datos colectados se obtuvo una muestra significativa ya que se midió durante un año, obteniendo una cantidad de datos cercana a los 8,000. Si bien el periodo es el mínimo aceptable para una campaña de medición, refleja cual es la condición del viento del lugar; claro está que para estimaciones más precisas se debería correlacionar estos datos con otros obtenidos por largo tiempo y cercanos al lugar.

Las distribuciones de frecuencia estimadas mediante la distribución de Rayleigh, que fue la que mas se acercó a los datos reales, indicaron que la Velocidad media ( $V_m$ ) del viento a una altura de 30m para el sitio 1 y 2 fue de 6.52 y 6.59 m/s respectivamente. Este parámetro se determinó también por medio del software especializado para viento; el valor resultante de la velocidad tuvo una variante de una décima, es decir, que fue de 6.7 m/s. Esta comparación confirma la existencia del recurso eólico para producción de electricidad.

Los valores calculados a 50 m sobrepasan la velocidad de 7 m/s, altura del buje del generador eólico, permitiendo así su aprovechamiento del viento en esa región para fines energéticos.

La dirección del viento predominante es la noreste, con una frecuencia de una 73% que coincide con la de los vientos Alisios; sin embargo, la rosa de vientos tiene una componente suroeste, con una frecuencia del 18%, que indica la presencia de vientos Monsónicos. Este último componente es característico de aquellas regiones cercanas a la costa sur.

Estas condiciones de buen viento, las características de fácil acceso, ubicación cercana con los sitios en donde se tiene el recurso favorable y cercanía a la línea de alta tensión de 69 kV, hacen posible que en el lugar puedan instalarse 10 turbinas de 850 kW, con un factor de planta del 28%. Desde el punto de vista técnico se podría desarrollar de una granja eólica con una capacidad total de 8.5 MW.

En el aspecto socioeconómico, se puede indicar que el municipio de Comapa cuya producción agropecuaria es de maíz, frijol, maicillo, henequén, maguey y chile; tiene un alto elevado índice de pobreza (83.15%) y de extrema pobreza (34%).

El municipio está cubierto por una asociación mixto-cultivo y de bosque secundario arbustal, tiene tierras no cultivables, salvo para algunos cultivos perennes, principalmente producción forestal. Tiene elementos muy severos de relieve y profundidad y está cubierto por pastos naturales y charral.

Con relación a los impactos ambientales el proyecto es beneficioso ya que la generación eléctrica por medios eólicos evita las emisiones de los gases de efecto invernadero de otras tecnologías como las térmicas. Se estima que durante la vida útil del proyecto de 20 años pueden evitarse, dependiendo el combustible que desplace; comparando con las emisiones por bunker en los motores reciprocantes unas 102,671 ton de CO<sub>2</sub>, hasta 174,437 producidas por carbón mineral. Asimismo, el aprovechamiento de la energía eólica conserva los recursos no renovables como los combustibles fósiles y ahorra divisas.

El impacto sobre el uso de la tierra es mínimo ya que las tierras son no cultivables y en la actualidad se usan para pastar el ganado, actividad que es compatible con la generación eólica.

El impacto sonoro se considera bajo ya que las turbinas Vestas 52-850 según sus características técnicas a una distancia de unos 500 m producen menos de 40 dB, valores que no afectan a la mayoría de las personas.

La medición del impacto visual, es muy subjetivo, sin embargo, la región donde se va a desarrollar el proyecto no presenta ningún valor arquitectónico ni paisajista debido a las condiciones de las tierras altamente deforestadas. No obstante, como una medida, se podrían pintar las bases de las torres con un color que armonice con la naturaleza circundante.

Existe un impacto moderado en suelo durante la construcción y operación del proyecto; pero el mismo se produce en un corto tiempo principalmente en la etapa de construcción.

El impacto a las aves es importante cuando al parque eólico está ubicado cerca de una ruta de aves migratorias ya que las mismas quedarían expuestas a colisiones con las turbinas. De la información recabada se estableció que no existe ruta alguna en el área de estudio. De las especies de aves locales, las golondrinas y los gavilanes podrían estar expuestos a colisiones con las aspas del generador, condición que se tendría que estudiar por un especialista ornitólogo.

Se puede decir entonces, que la evaluación del recurso eólico para fines energéticos, indica que tiene la posibilidad de instalar 10 turbinas de 850 kW que estarían generando unos 20 GWh; que su impacto ambiental negativo es mínimo, y más bien, tiene un impacto positivo en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero para la generación de electricidad. Tiene además un efecto positivo por la cantidad de empleo que podría generar el montaje de estas plantas.

Por las características de buena calidad de viento encontrado, se hace necesario proseguir con un programa de medición de variables eólicas para conocer el potencial eólico efectivo y aprovechable.

Las mediciones deber ser de calidad y con cantidad de años de medición con la finalidad de contar con datos más confiable para estimar el potencial eólico de los lugares.

## **IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **A. Conclusiones**

1. Las características del viento encontrado en el municipio de Comapa indican que su componente de dirección más importante, noreste, responde a los vientos regionales características de los vientos Alisios. Sin embargo, también presenta una componente menor, suroeste, que corresponde a los vientos monónicos. A la altura de 30 m su velocidad media es de 6.6 m/s y tiene una densidad de potencia (DP) de 334 W/m<sup>2</sup>. Debido a que el período utilizado fue de un año, la certeza fue de un 75%, valor que se considera insuficiente para la realización de una factibilidad técnica.

2. En la estimación de la potencia y energía que podría generar el proyecto se consideró el área comprendida entre las dos mediciones, las que reportaron un mismo recurso. Tomando de base que la turbina VS-850 reportó un mayor Factor de planta (28%) se estimó que en el área en mención era posible instalar 10 turbinas de 850 kW lo que haría una capacidad total de 8,500 kW, con lo que se podría generar unos 20 GWh al año.

3. Los efectos más importantes que tienen las plantas eólicas se pueden resumir en: a) Evitan la emisión de gases de efecto invernadero, ya que por lo general sustituyen plantas térmicas que utilizan combustibles fósiles. b) Disminuyen el agotamiento de los recursos naturales ya que evita el uso los combustibles fósiles no renovables. c) Tienen impactos sonoros, aunque estos han disminuido por que en la actualidad se fabrican máquinas cada vez más silenciosas; su sonido alcanza los 45 dB. d) Presentan impactos sobre la flora y la fauna causada por la destrucción de la cobertura vegetal en una franja de 5 a 30 m en la línea de los aerogeneradores. Los impactos más importantes sobre la fauna son los provocados por las colisiones de las aves con las aspas de los aerogeneradores, condición que se puede agravar cuando existen en el lugar del emplazamiento rutas de aves migratorias.

4. Para el proyecto se considera una capacidad de 8.5 MW, compuesto por 10 turbinas eólicas de 850 kW. Se estableció que el municipio de Comapa, que reúne las condiciones básicas de cercanía a la red de alta tensión para su interconexión, tiene buenos accesos y el proyecto se ubicaría a menos de 300m de la carretera.

5. El impacto al ambiente que tiene el proyecto de Granja Eólica de 8.5 MW es positivo; en cuanto a emisiones evitadas se estiman al menos 102,671 ton de CO<sub>2</sub> durante el ciclo de vida 20 años del proyecto. En vista que no existen rutas de aves migratorias en el lugar se estima que no tendría impacto negativo sobre las aves; sin embargo, con relación a las especies locales, se necesitaría estudiar la región por parte de un ornitólogo para realizar un estudio más detenido sobre este aspecto. El resto de los impactos sonoros, visual, efecto de sombra, al suelo y vegetación durante la construcción y operación, son mínimos

## **B. Recomendaciones**

1. Con base a las mediciones efectuadas sobre el recurso a la fecha en el municipio de Comapa, se hace necesario evaluar la información que existe de otros sitios para evaluar el recurso eólico y la generación eléctrica que éste podría aportar al sistema nacional interconectado.

2. Dadas las características del recurso de viento encontrado en Comapa es indispensable reiniciar un proyecto de torres de medición de variables eólicas para el desarrollo de granjas eólica. Esta tecnología emplea un recurso renovable que aún no se aprovecha en gran escala en Guatemala.

3. Crear las condiciones regulatorias adecuadas para que el aprovechamiento de la energía eólica tenga una gran impulso y presencia significativa dentro de la estructura de generación eléctrica con la que cuenta el país.

4. Estudiar el aprovechamiento del recurso eólico en aplicaciones de usos productivos, en especial en sistema aislados, en los cuales la red de interconexión nacional se encuentra distante.

## X. BIBLIOGRAFÍA

1. American Wind Energy Association. 1993. *Guía para Aplicaciones de Pequeños Sistemas de Energía Eólica*.
2. Centro Brasileiro de Energía Eólica y Núcleo Tecnológico de Energía y Ambiente. 2002. Taller de Energía Eólica. Dirección General de Energía, Guatemala,
3. Doucet, Gerald. 2001. *Enero System Sustainability in a Global Competitive Market, in Sustainable Development International*. Spring 2001 Edition. 81-83.
4. ECN.1998. *International Course on the Implementation of Wind Energy*. The Netherlands.
5. Eólica/Biomass User Network, 2002. *Manuales sobre energía renovable: Centroamérica*. 48 págs.
6. Guatemala. 2006. Dirección General de Energía. *Base de datos del Centro de Información y Promoción de Energías Renovables*.
7. Guatemala. 2005. Instituto Geográfico Nacional. Hoja Cartográfica 1:50,000.
8. Guatemala. 2004. MAGA. *Atlas temático de cuencas hidrográficas de la República de Guatemala*.
9. Guatemala. 2004. MEM. *Guía del Inversionista 2004*.

10. Guatemala. 2001. Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. Mapa de pobreza de Guatemala. Instrumentos para entender el flagelo de la pobreza en el país.
11. Hagerby Daniel y Landberg Stefan. 2004 «Wind Energy Assessment in Guatemala – a case study at Finca Buenos Aires-». Tesis de Institute of Technology, Linkoping University. Swedish. 102 págs.
12. Home Power, Feb/March 2002. Issue # 87.
13. INAB. 2002. Mapa de Ecosistema Vegetal
14. Instituto Internacional para Medio Ambiente y Desarrollo. 1981. Energías nuevas y renovables 2. Earthscan, Londres. 60 págs.
15. Instituto de Estudios y Capacitación Cívica. 2001n. *Diccionario Municipal de Guatemala*.
16. Mansilla, Carlos. 2004. «Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en la actividad energética de Guatemala (1990-2000)». Tesis Facultad de Ciencias y Humanidades, Universidad del Valle de Guatemala.
17. Morales, Edward. 1994. *El Viento en Centroamérica*. NRECA (Nacional Rural Electric Cooperative Association).
18. Mortensen et al, 2004. *Getting Started with WAsP 8*. RisØ National Laboratory, Roskilde. 69 págs.
19. Nicaragua. 1998. Instituto Nicaragüense de Energía. Dirección General de Electricidad. *"Balance Energético Nacional -1998"*.

20. Nordteco, S. A. 2005. Curso "*Generación de Electricidad por medio de Energía Eólica*". Costa Rica.
21. NRG, 2005. *Tall Tower™ Installation Manual and Specifications*.
22. OIEA, 2002. Boletín Vol. 44 No. 1. Austria.
23. Ponencias del Curso XVI sobre Economía Energética celebrado en Montevideo, Uruguay. 1996. Estrategias de Desarrollo Energético en los Mercados Regionales Integrados. 1ª. Edición, Comunicación Impresa, S. L. España.
24. Entrevista efectuada al Sr. Luis Martínez Vásquez, CONAP, Jutiapa.

#### INTERNET

25. <http://www.ctio.noao.edu> (Consultada el 31 de marzo del 2006)
26. <http://www.who.org> (Consultada el 1 de abril del 2006)
27. <http://www.windpower.org> (Consultada el 31 de marzo del 2006)
28. <http://www.ubp.edu.org> (Consultada el 31 de marzo del 2006)
29. <http://www.ipcc.ch> (Consultada el 30 de abril del 2006)

## XI. APÉNDICE

### Tabla de simbología

<b>BUN-CA</b>	Biomasa Users Network Centroamérica
<b>Pa (N/m<sup>2</sup>)</b>	Pascal (Newton por metro cuadrado)
<b>J</b>	Joule (0,239 caloría ó $9.48 \times 10^{-4}$ , unidades térmicas británicas, Btu)
<b>J/s</b>	Joules por segundo
<b>Watt(vatio)</b>	Joules por segundo
<b>kW</b>	(1000 vatios) – unidad de potencia
<b>° K</b>	grados Kelvin
<b>kW/m<sup>2</sup></b>	Kilovatio por metro cuadrado
<b>m</b>	metro
<b>m/s</b>	metros por segundo