



**UNIVERSIDAD MICHOCANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN EL ESTADO
DE MICHOCÁN: IDENTIFICACIÓN PRELIMINAR**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

PRESENTA:

GILBERTO SUÁREZ CAMARGO

ASESOR:

**DOCTOR EN FILOSOFÍA EN SISTEMAS DE POTENCIA
NORBERTO GARCÍA BARRIGA**

MORELIA, MICHOCÁN, MARZO DE 2014



Dedicatorias

A Dios que me ha brindado todo.

A mi familia por su cariño y apoyó en todo momento en especial a mi padre Marcelino Suárez Suárez y mi madre Flora Camargo Rogelio.

Agradecimientos

Es necesario dedicar un mensaje de agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que de alguna forma u otra hicieron posible este proyecto.

Al Dr. Norberto García Barriga por su guía y apoyo.

Al Dr. Cesar Ángeles Camacho por asesoría brindada.

Al Lic. Christian Alexandro Ortiz Corza.

A Familiares y amigos por su ánimo y apoyo para seguir adelante.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y la Facultad de Ingeniería Eléctrica por su apoyo en mi formación y realización de este trabajo.

Al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Secretaría de Marina (SEMAR) y el Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico (OCLSP) de la Comisión Nacional del Agua por la aportación de las bases de datos climatológicos.

Índice general

Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Índice de tablas	vii
Índice de figuras.....	viii
Nomenclatura y abreviaciones.....	xi
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Justificación	5
1.3 Objetivos.....	7
1.4 Metodología.....	8
1.5 Descripción por capítulos	9
Capítulo 2 Representación del recurso eólico	10
2.1 Fundamentos del recurso eólico.....	10
2.1.1 Patrones que afectan la circulación del viento.....	11
2.1.2 Escalas de vientos: vientos geostroficados.....	11
2.2 Relaciones de velocidad y potencia	13
2.3 Representación estadística del viento	14
2.4 Cálculo de la velocidad del viento a diferentes alturas.....	15
2.5 Sumario.....	19
Capítulo 3 Características del Estado de Michoacán.....	20
3.1 Geografía.....	20
3.2 Clima.....	22
3.3 Datos del recurso eólico en Michoacán	23
3.3.1 Estación Meteorológica Automática	26
3.3.2 Estación sinóptica meteorológica	27
3.4 Selección de datos de entrada	28
3.5 Sumario.....	32
Capítulo 4 Resultados de cada estación meteorológica.....	33
4.1 Estación Isla Clarión.....	36

4.2	Estación Lázaro Cárdenas.....	50
4.3	Estación Puerto Vicente.....	60
4.4	Estación Tepuxtepec.....	75
4.5	Conclusiones.....	83
Capítulo 5	Resultados del potencial eólico.....	85
5.1	Promedio de velocidades y densidad de potencia.....	85
5.2	Desviación estándar y varianza.....	91
5.3	Rosas de vientos.....	97
5.4	Conclusiones.....	100
Capítulo 6	Conclusiones y trabajos futuros.....	102
6.1	Conclusiones.....	102
6.2	Trabajos futuros.....	103
Apéndice A	Paquete WAsP.....	105
A.1	Introducción a OWC Wizard.....	106
A.1.1	Uso de Wizard.....	107
A.1.2	Navegación a través de las ventanas de OWC Wizard.....	108
A.1.3	Gestión de conjunto de datos.....	109
Bibliografía	115

Resumen

Los estudios de evaluación del recurso eólico se pueden clasificar en estudios de identificación preliminar, estudios detallados de evaluación del recurso eólico y estudios para localizar instalaciones de generación eólica. Este trabajo de tesis tiene como objetivo realizar estudios de identificación preliminar del recurso eólico en el Estado de Michoacán. Esta evaluación preliminar del potencial eólico se realiza en 40 estaciones meteorológicas: 31 estaciones ubicadas en el Estado de Michoacán, 3 e estaciones ubicadas en islas del Océano Pacífico, 4 estaciones ubicadas en el Estado de Guerrero (2 en las cercanías a las costas de Guerrero y 2 en las colindancias de Michoacán y Guerrero), 1 estación ubicada en la cercanía a la costa de Manzanillo y 1 estación ubicada en el Estado de Jalisco. Las estaciones de monitoreo pertenecen a instituciones tales como el Servicio Meteorológico Nacional, la Secretaría de Marina y el Organismo Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico. Para la estimación del recurso eólico se utilizaron datos de dirección y velocidad de viento, medidos a 10, 15 y 60 minutos. Los datos del recurso eólico se extrapolaron a 80m de altura, el cual representa un nivel promedio al cual se instalan los aerogeneradores en los parques eólicos. La extrapolación de los datos se realizó utilizando la Ley de Perfil Logarítmico. Por su parte, se utilizó el paquete WAsP para el procesamiento y evaluación de datos, el cual proporciona una forma rápida y flexible de obtener un análisis estadístico. El análisis arroja los valores medios de velocidad de viento y densidad de potencia, así como el histograma de distribución de frecuencias de velocidades y la rosa de vientos de cada año.

Los resultados obtenidos en este trabajo representan una base para realizar trabajos futuros más precisos. Los resultados expuestos en este trabajo serán el punto de partida para la identificación de sitios con un recurso eólico importante, de forma tal que se determine la factibilidad de emplazar generadores eólicos a gran escala. Además, los resultados de este trabajo permitirán evaluar la posibilidad de instalar pequeños aerogeneradores en lugares aislados para la generación de energía eléctrica en pequeñas comunidades.

Palabras claves: Eólico, Viento, Energía. Edo. Michoacán.

Abstract

Wind power assessment studies can be classified as preliminary identification studies, detailed assessment of the wind resource and studies for the allocation of wind power installations. The aim of this work is to carry out a preliminary identification study of the wind resource at the state of Michoacán. The preliminary evaluation study is carried out in forty meteorological stations: 31 stations located at the state of Michoacán, 3 stations located on islands of the Pacific Ocean, 4 stations located at the state of Guerrero (2 stations near the coast of Guerrero and 2 stations at the border of Michoacán and Guerrero), 1 station located nearby Manzanillo's coast and 1 station located at the state of Jalisco. These measurement stations belong to institutions such as the "Servicio Meteorológico Nacional", "La Secretaría de Marina" and the "Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico". In order to estimate the wind energy, a database containing wind speed and wind direction measured every 10, 15 and 60 minutes are used. The wind speed is extrapolated to 80 meters height, which is a standard height for wind generators installed in wind farms. The speed is estimated at higher altitudes using the logarithmic wind profile law. On the other hand, the software WAsP is used to obtain a statistical analysis of the wind speed data. This analysis provides the mean value, power density, frequency distribution speed histogram and the wind rose of the wind energy resource.

Results reported in this work represent a set of preliminary outcomes that can be used to carry out future research works. They represent a starting point for the identification of places with outstanding wind resources in order to determine the feasibility of locating wind generators at large scale. Further, these results will allow evaluating the deployment of small wind power generators in small communities.

Key Words: wind, wind, Energy. Edo. Michoacán.

Índice de tablas

Tabla 1. Coeficientes de fricción para diferentes tipos de terreno.....	16
Tabla 2. Clasificación de rugosidad y valores de coeficiente de rugosidad para diversos terrenos.	17
Tabla 3. Valores del coeficiente de rugosidad para diversos tipos de terreno.....	17
Tabla 4. Clases y longitudes de rugosidad dadas por la “Danish Wind Industry Association”.	18
Tabla 5. Estaciones meteorológicas en el Estado de Michoacán y mar adentro	25
Tabla 6. Factor de rugosidad para la extrapolación de velocidad de viento	34
Tabla 7. Porcentaje de datos útiles en los estudios de la estación Isla Clarión.....	36
Tabla 8. Porcentaje de datos útiles en los estudios de la estación Lázaro Cárdenas	50
Tabla 9. Porcentaje de datos útiles en los estudios de la estación Puerto Vicente.	60
Tabla 10. Porcentaje de datos útiles en los estudios de la estación Tepuxtepec.....	75
Tabla 11. Clasificación del viento usada en Estados Unidos de Norteamérica.	85
Tabla 12. Promedio de velocidades medias de datos extrapolados a 80m	87
Tabla 13. Densidades de potencia corregidas para los datos extrapolados a 80m.....	89
Tabla 14. Desviación estándar y varianza de la velocidad del viento.	91

Índice de figuras

Figura 1. Fuentes que participan en la generación de energía eléctrica al año 2010: a).- capacidad efectiva instalada y b).- producción bruta de energía.....	7
Figura 2. Circulación general del aire en la superficie.	11
Figura 3. Orografía del terreno a).- efecto aceleración sobre colina suave y b).- turbulencias en la parte superior e inferior de acantilados y cimas angulosas.	12
Figura 4. Diagramas de Weibull con a).-un factor de forma $k=1,2,3,4$ y un factor de escala $c=8$ y b).- con un factor de escala $c=2,4,6,8$ y un factor de forma $k=2$	15
Figura 5. División municipal del Estado de Michoacán.	21
Figura 6. Mapa de relieve del Estado de Michoacán.	22
Figura 7. Ubicación de las estaciones meteorológicas en: a).- el Estado de Colima, Michoacán, Guerrero y Jalisco, b).- la Isla María Madre, c).- la Isla Clarión y d).- la Isla Socorro.....	24
Figura 8. Estructuras utilizadas en las estaciones meteorológicas automáticas: a).- estructura tipo andamio y b).- estructura tipo torre triangular.....	28
Figura 9. Distribución de los sensores en la estación meteorológica ESIME.	29
Figura 10. Lecturas registradas por una estación meteorológica y reportadas en un archivo de hoja de cálculo.....	30
Figura 11. Diagrama de flujo del código del programa en Java.	31
Figura 12. Archivo de salida con los valores filtrados y acondicionados para su análisis en WASP.	32
Figura 13. Resultados para la estación Isla Clarión año 2011 a 10m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	37
Figura 14. Resultados para la estación Isla Clarión año 2000 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	38
Figura 15. Resultados para la estación Isla Clarión año 2001 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	39
Figura 16. Resultados para la estación Isla Clarión año 2002 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	40
Figura 17. Resultados para la estación Isla Clarión año 2003 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	41
Figura 18. Resultados para la estación Isla Clarión año 2004 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	42
Figura 19. Resultados para la estación Isla Clarión año 2005 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	43
Figura 20. Resultados para la estación Isla Clarión año 2006 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	44
Figura 21. Resultados para la estación Isla Clarión año 2007 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	45
Figura 22. Resultados para la estación Isla Clarión año 2009 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	46
Figura 23. Resultados para la estación Isla Clarión año 2010 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	47
Figura 24. Resultados para la estación Isla Clarión año 2011 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	48
Figura 25. Vista aérea del sitio de la estación Isla Clarión.....	49

Figura 26. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2011 a 10m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	51
Figura 27. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2004 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	52
Figura 28. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2005 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	53
Figura 29. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2006 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	54
Figura 30. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2007 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	55
Figura 31. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2009 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	56
Figura 32. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2010 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	57
Figura 33. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2011 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	58
Figura 34. Vista aérea del sitio de ubicación de la estación Lázaro Cárdenas.	59
Figura 35. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2011 a 10m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	61
Figura 36. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2000 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	62
Figura 37. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2001 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	63
Figura 38. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2002 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	64
Figura 39. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2003 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	65
Figura 40. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2004 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	66
Figura 41. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2005 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	67
Figura 42. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2006 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	68
Figura 43. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2007 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	69
Figura 44. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2008 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	70
Figura 45. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2009 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	71
Figura 46. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2010 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	72
Figura 47. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2011 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	73
Figura 48. Vista aérea de la ubicación de la estación Puerto Vicente.	74
Figura 49. Dirección y velocidad de viento en el tiempo a).- estación Tepuxtepec año 2010 y b).- estación Tepuxtepec año 2011.	76

Figura 50. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2011 a 10m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	77
Figura 51. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2007 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	78
Figura 52. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2008 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	79
Figura 53. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2009 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	80
Figura 54. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2010 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	81
Figura 55. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2011 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.	82
Figura 56. Vista aérea de la ubicación de la estación Tepuxtepec.....	83
Figura 57. Rosas de vientos de las estaciones meteorológicas.	98
Figura 58. Ubicación de la rosa de vientos de las estaciones: a).- Manzanillo y b).- Zihuatanejo y Puerto Vicente.	99
Figura 59. Ubicación de aproximada de las rosas de vientos a).- estación Isla María Madre, b).- Isla Clarión y c).- Isla Socorro.	100
Figura 60. Tipos de análisis usando WAsP.	107
Figura 61. Bienvenida al asistente de OWC Wizard.	108
Figura 62. Especificación de los detalles del sitio.	109
Figura 63. Especificación del archivo de datos: a).- conjunto de datos y b).- explicación del conjunto de datos.	109
Figura 64. Estructura de datos: a).- especificación de filas a usar y b).- representación en el tiempo. ..	110
Figura 65. Especificación de las filas a usar en OWC Wizard.	111
Figura 66. Ajustes de datos medidos: a).- definición de los ajustes de datos y b).- definición los límites de velocidad y dirección.	112
Figura 67. Ventana de revisión de datos: a).- resumen de los datos y b).- adición de Archivos.	112
Figura 68. Elección del número de sectores en la rosa de vientos.....	113
Figura 69. Valores medios de velocidad y densidad de potencia.	114

Nomenclatura y abreviaciones

E_c	Energía cinética (J)
m	Masa (kg)
t	Tiempo (seg)
P	Potencia Real (W)
ρ	Densidad del aire en el punto de interés (kg/m^3)
ρ_0	Densidad estándar del aire ($1.225kg/m^3$)
A	Área de barrido (m^2)
D	Diámetro del área de barrido del rotor (m)
V	Volumen (m^3)
v	Velocidad del viento a la altura H (m/s)
v_0	Velocidad del viento a la altura H_0 (m/s)
H	Altura a la que se desea conocer la velocidad del viento (m)
H_0	Altura de medición del viento (m)
H_m	Altura sobre el nivel del mar (m)
z_0	Coefficiente de longitud de rugosidad (m)
α	Coefficiente de fricción o exponente de Hellmann
$f(v)$	Función de densidad de probabilidad
k	Parámetro de forma
c	Parámetro de escala
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
OWC Wizard	Observed Wind Climate Wizard
SEMAR	Secretaría de Marina
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
OCLSP	Organismo de Cuenca-Lerma-Santiago de la Comisión Nacional del Agua
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CFE	Comisión Federal de Electricidad
msnm	Metros sobre el nivel del mar
INEGI	Instituto de Nacional de Estadística y Geografía
TEP	Toneladas Equivalentes de Petróleo
GIE	Gases Efecto Invernadero
EMAS	Estación Meteorológica Automática
ESIME	Estación Sinóptica Meteorológica

Capítulo 1 Introducción

Las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por el ser humano desde tiempos remotos, especialmente la energía solar, la eólica y la hidráulica. La navegación a vela, los molinos de viento ó agua y las disposiciones constructivas de los edificios para aprovechar el sol, son algunos ejemplos de ello. En particular, el hombre ha aprovechado para fines industriales la energía contenida en el viento desde tiempos inmemoriales. Entre las técnicas más antiguas de aprovechamiento de la energía de los fluidos atmosféricos se encuentra el desplazamiento y transporte, la molienda de grano, la extracción de aceites, el prensado de material vegetal, el aserrado de madera y desde luego, la elevación y trasiego de agua para el regadío y el abastecimiento humano y animal [1].

Los más antiguos molinos accionados por el viento eran de eje vertical y pueden situarse en Persia hace unos 3700 años. Aparentemente en la misma época histórica también se desarrollo en China un molino de eje vertical. La penetración del molino de viento en Europa no se produce hasta pasados 2000 años desde su invención. El molino de eje horizontal que se extendió en Europa con distintas topologías apareció hasta la Edad Media, el cual muy probablemente fue mejorado por la técnica árabe [2].

En la actualidad existe un deterioro importante del medio ambiente, provocado en su mayoría por acción humana, en donde las industrias juegan un rol trascendente debido a la emisión de sustancias tóxicas que afectan tanto al aire, suelo y agua. Como consecuencia, los ecosistemas se ven directamente afectados. El deterioro de la flora y fauna, tiene efectos negativos en la economía y biodiversidad de los países. Sin embargo, la tecnología de las energías renovables en uso en todo el mundo puede proporcionar alternativas energéticas viables desde el punto de vista ecológico, confiables y económicamente atractivas. Estas tecnologías ofrecen ventajas sobre las energías tradicionales.

En esta tesis se presenta el análisis del recurso eólico de 40 estaciones meteorológicas ubicadas en el Estado de Michoacán y sitios cercanos usando el paquete de modelado de viento “Wind Atlas

Analysis and Application Program” (WASP). Algunas de estas estaciones se encuentran ubicadas mar adentro en islas localizadas de las aguas territoriales en el Océano Pacífico. Dichas estaciones se encuentran a cargo de la Secretaría de Marina (SEMAR), Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Las estaciones meteorológicas registran variables tales como velocidad del viento, dirección del viento, precipitación pluvial, presión atmosférica y temperatura ambiente. Sin embargo, en este trabajo se proceso exclusivamente la velocidad y la dirección del viento, en donde los registros de estas estaciones a las cuales se tuvieron acceso abarcan desde el año 2000.

1.1 Antecedentes

Existe en la actualidad un mayor interés por el cuidado del medio ambiente y la preservación de los recursos naturales. Prueba de ello son la gran cantidad de estudios que se han hecho a lo largo de estas décadas sobre las energías renovables, en donde los países europeos han realizado muchos de estos trabajos. Por su parte, en México se han venido realizando esfuerzos para contribuir a la introducción y uso de estas fuentes de energía.

La aplicación de la energía eólica para generar energía eléctrica requiere del conocimiento de la distribución espacial del viento en zonas del país con potencial eólico. Sin embargo, subsiste hoy en día muchas limitaciones en cuanto a la cuantificación del recurso eólico. En nuestro país se han realizado esfuerzos para identificar el potencial eólico en zonas estratégicas del territorio. Por ejemplo, en [3] se reporta un atlas detallado del recurso eólico en el estado de Oaxaca, en donde se identifican las características del viento y la distribución del recurso eólico. Estos mapas fueron generados en el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL por sus siglas en inglés) utilizando sistemas de información geográfica, en donde la resolución de densidad de potencia del viento se realiza a 50m.

En el 2008 se realizó un análisis de la velocidad del viento titulado “*Análisis estadístico de mediciones de la velocidad del viento utilizando la técnica de valores desviados*” el cual utilizó valores de velocidad de viento del Istmo de Tehuantepec del año de 1999 proporcionados por la CFE. En este estudio se hace un análisis de las mediciones aplicando la técnica de valores desviados propuesta por Barnett y Lewis comprobando las curvas de probabilidad de los histogramas antes y después de la

aplicación de la técnica. Además, se reporta que esta técnica de análisis permite obtener modelos de probabilidad más ajustados y disminuye las tendencias de error estadístico [4].

En [5] se presenta la evaluación preliminar del potencial eólico en el Estado de Zacatecas. Se realizó el procesamiento de 36 estaciones de medición del Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ubicadas en este Estado. Para la estimación del recurso se contó con mediciones de dirección y velocidad de viento cada 15min a 3m sobre el nivel del suelo y el intervalo de lecturas con el que se contó fue del año 2005 a 2009. Para la estimación del recurso eólico, se extrapolaron los valores de velocidad del viento a una altura de 80m con el propósito de obtener valores medios de velocidad del viento y densidad de potencia, las rosas de vientos y diagramas de Weibull. Este trabajo se llevó a cabo mediante el programa Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP). Los resultados de la evaluación presentan cuatro ubicaciones con potencial aprovechable pues presentan una densidad de potencia de alrededor de $300W/m^2$. En base a estos resultados se resalta también la posibilidad de la instalación de aerogeneradores de baja capacidad de forma aislada para la alimentación de energía en comunidades lejanas. Además, se reportan mapas de geolocalización de las estaciones de medición usando rosas de viento indicando la dirección de los vientos predominantes [5].

En el Estado de Veracruz se llevó a cabo la evaluación del recurso eólico para su posible utilización en la generación de energía eléctrica. Con este fin se realizaron mediciones de viento registradas cada 10 minutos a 50m de altura durante los años 2008 y 2009 en 16 estaciones anemométricas distribuidas dentro del Estado. El análisis se realizó con el software RETScreen, Windgrapher y MatLab, utilizando los métodos de función de densidad, densidad de potencia y la determinación del efecto estacional en la velocidad del viento con la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Se encontró que existen regiones en donde la velocidad promedio del viento es 5.45 m/s, con cuyo valor es posible producir energía eléctrica en el orden de 14,432 KW mientras la velocidad se mantenga en ese rango. Para cuantificar la potencia eléctrica generada se utilizó un aerogenerador marca ACCIONA modelo AW 70/1500 Class I con una capacidad 1500kW. El estudio arrojó que instalando un aerogenerador por cada zona estudiada se suministraría energía eléctrica a la red por un valor de 10,694 MWh/año, con lo cual se podrán ahorrar 9,933.1 de Toneladas Equivalentes de Petróleo (TEP), y una reducción anual bruta de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) equivalentes a 28,806.1 toneladas de CO₂ (tCO₂) [6].

En año 2012 se presentó una tesis de maestría en el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del IPN-CICATA-UA, a fin de optimizar el cálculo del potencial eólico en el Estado de Tamaulipas. En este trabajo se propone realizar una reconstrucción espacial del viento basada en mediciones temporales ya existentes. El trabajo se realizó con un paquete satelital llamado “Blended Mean Wind Field” (BMWf) desarrollado por el Instituto Francés de Investigación para la Explotación del mar ubicado en Best, Francia. Con esta herramienta es posible obtener las componentes zonal y meridional del viento cada 6 horas, con una resolución de 25Km. Para validar la información satelital, se analizaron los datos cada 6 horas de las series de tiempo de cuatro estaciones durante el período 2004–2009. En este trabajo se concluye que es posible estimar campos de viento de una zona determinada a partir de los datos del producto satelital, siempre y cuando se tenga en cuenta que en las zonas costeras puede sobrestimarse la intensidad del viento en 1 m/s como promedio, aumentando esta sobrestimación tierra adentro en 2 m/s como promedio. Teniendo en cuenta sólo los datos de viento del producto satelital, en más del 80% de la zona de estudio el potencial eólico a 50 m de altura se clasifica de muy pobre, presentándose pequeñas áreas donde llega a ser marginal. Sólo en la zona del Golfo de México puede apreciarse un potencial de moderado a excelente [7].

En los alrededores de Sisal Yucatán se estimó el recurso eólico y de generación eoloelectrica con base en mediciones anemométricas realizadas a 20 y 40m de altura, respectivamente, en un periodo de 33 meses (enero de 2005 a septiembre de 2007). Se realizó la estimación de la velocidad del viento, desviación estándar, velocidad máxima, factores de forma y de escala de la función de distribución de Weibull y densidad de potencia. Finalmente, se extrapoló la velocidad del viento a 80m de altura y se determinó el potencial de generación eléctrica a través de un aerogenerador de 1800kW de capacidad nominal. Los resultados arrojaron que el sitio presenta vientos adecuados para su explotación energética con fines de generación eléctrica. Los valores promedio de velocidad en el lugar son de 6.0, 6.8 y 7.7m/s a 20, 40 y 80m de altura con valores de densidad de potencia del viento de 222, 298 y 416W/m², respectivamente. Tomando en cuenta las características del aerogenerador se obtuvo un valor promedio anual del factor de capacidad del 42.5% [8].

En el Estado de Baja California, se realizó un estudio sobre “*Zonas potencialmente productoras de energía eléctrica eólica, en Baja California*” presentado por el Centro de investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en mayo del 2003. La rumorosa fue seleccionada como una de las localidades potenciales por su cercanía con Mexicali y la red de transmisión de CFE que pasa por ese sitio. En el trabajo presentado se proponen 5 zonas potenciales para establecer una planta eólica. Se menciona de forma especial la instalación *La Rumorosa 1* con una extensión de 42 hectáreas propiedad del Gobierno del Estado con una inversión de 26.1 millones de dólares, con capacidad de 10MW y una generación estimada promedio anual de 27,156 MWh. Con este tipo de generación se evitará la emisión de 17000 toneladas de CO₂ a la atmosfera [9].

En el Estado de Chihuahua, México se realizó un análisis sobre la periodicidad del viento en datos de 23 estaciones meteorológicas. Los datos analizados se registraron cada 10 minutos en un periodo de 2 años. La técnica utilizada fue la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier en un programa diseñado con el programa MatLab. Se analizaron las gráficas de dirección y velocidad del viento en función del tiempo, el espectro temporal de la velocidad del viento y el espectro superficial con respecto al tiempo de cada estación. Los resultados indicaron que el viento en la mayoría de las estaciones tiene una periodicidad de 1.15e-005Hz y 2.31e-005Hz, es decir, que cuentan con una periodicidad del viento de 12 y 24 horas [10].

1.2 Justificación

Los sistemas actuales de generación de energía eléctrica están basados principalmente en combustibles fósiles como fuente primaria de energía. Sin embargo, estos recursos se están agotando y en el proceso de conversión de energía de esta fuente fósil se producen sustancias que dañan el medio ambiente. En estas últimas décadas se han empezado a notar los efectos del cambio climático, el descongelamiento de los casquetes polares y el cambio brusco en las temperaturas. En gran medida la contaminación del medio ambiente está asociada a la necesidad del hombre por obtener los recursos energéticos suficientes que satisfagan sus necesidades cotidianas.

En México la generación de energía por medio de fuentes alternas es mínima. A la fecha, las principales plantas de generación de energía eólica se encuentran instaladas en Oaxaca, Tamaulipas y Baja California. La Venta I cuenta con 7 aerogeneradores, cada uno con una capacidad de 225kW, generando un total de 1.57MW. La Venta II inaugurada en marzo del 2007 cuenta con 100 aerogeneradores de 850kW de capacidad, generando un total de 85MW. La central eólica La Venta III inaugurada en octubre de 2012 posee 121 generadores con capacidad de 850KW para un total de 102.85MW. Las centrales eólicas Oaxaca II, III y IV están en operación comercial desde el primer trimestre del año 2012 con 68 aerogeneradores cada una y una capacidad total de 306MW. Los proyectos Sureste I, II, III y IV con capacidad de 1,216MW entrarán en operación en el periodo 2013-2016. De igual manera en los estudios de planificación de CFE se incluyen los proyectos Tamaulipas I, II y III de 200MW cada uno, programados para entrar en operación en 2017, 2018 y 2019, respectivamente. En el área Norte los proyectos Coahuila I y II aportarán un total de 150MW, entrando en operación en 2021 y 2022, mientras que en Baja California los proyectos de la Rumorosa I, II y III tendrán una capacidad total de 300MW disponibles para 2014 y 2015 [11].

La Figura 1 muestra la capacidad efectiva instalada al año 2010 y la producción bruta de energía. Se puede apreciar que la participación de energía eólica y geotermoeléctrica es de 2.0 y 2.8% respecto a la capacidad instalada y producción bruta, respectivamente [11]. Es evidente que el nivel de penetración de energías renovables en nuestro país es bajo. Además algunas tecnologías que son promisorias para nuestro país como la solar no aparecen aún.

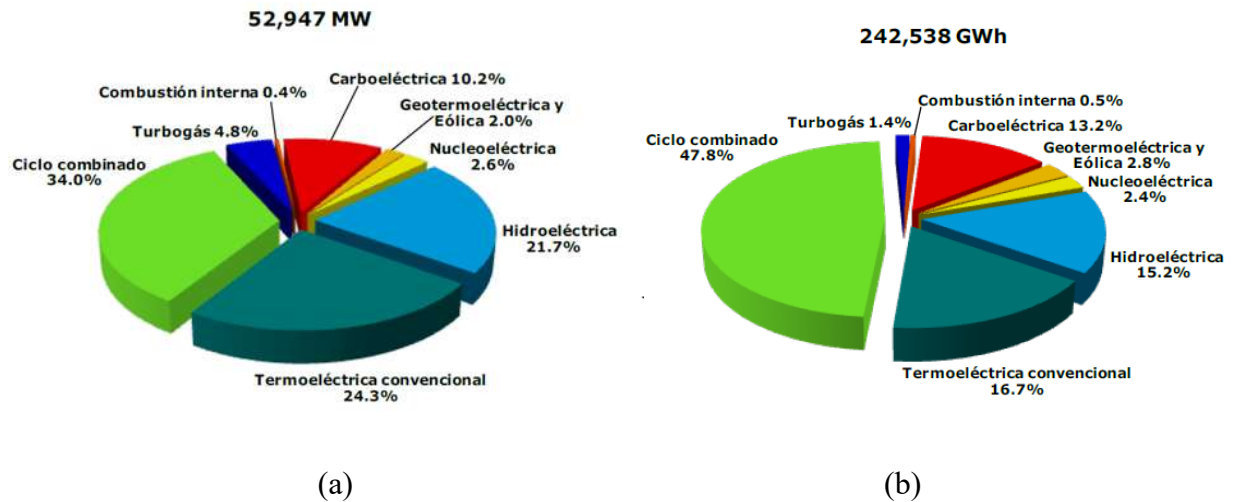


Figura 1. Fuentes que participan en la generación de energía eléctrica al año 2010: a).- capacidad efectiva instalada y b).- producción bruta de energía.

En este trabajo se presenta un estudio preliminar para cuantificar el recurso eólico aprovechable en el Estado de Michoacán. De esta manera los resultados reportados en este trabajo se podrán usar como punto de partida para realizar trabajos futuros específicos de sitios con un recurso sobresaliente. Los proyectos que se desarrollen entorno al recurso eólico tendrán un impacto positivo en la calidad de vida de la población y en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

1.3 Objetivos

El objetivo general es realizar la evaluación preliminar del recurso eólico en las regiones Costa, Tepalcatepec, Lerma-Chapala, Bajío, Pátzcuaro-Zirahuen, Cuitzeo y Oriente del Estado de Michoacán para identificar los sitios de interés y determinar posibles emplazamientos de aerogeneradores a escala comercial y para el consumo de energía en comunidades pequeñas.

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Recabar la información de bases de datos de la velocidad y dirección de viento provenientes de organismos federales que poseen estaciones de medición en el Estado de Michoacán.

- Procesar los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas determinando cual es el potencial eólico en las diversas zonas del Estado de Michoacán.
- Extrapolar los resultados a alturas normalmente especificadas para la explotación del recurso eólico.
- Utilizar la herramienta WASP para realizar la evaluación del recurso eólico.
- Identificar sitios de interés para la explotación del recurso eólico.

1.4 Metodología

La metodología utilizada en este trabajo tiene como finalidad analizar y evaluar los datos meteorológicos recabados para la evaluación del recurso eólico. Las herramientas de cómputo son muy importantes para producir estimaciones del recurso eólico que sean suficientemente precisas y de esta manera, estimular el desarrollo de nuevos estudios y proyectos de desarrollo de energía eólica. La metodología utilizada en esta tesis se concentra en los siguientes 4 conceptos:

- *Exploración:* se contactaron a las organizaciones encargadas del monitoreo climático para obtener las bases de datos de valores meteorológicos de distintos sitios ubicados en el Estado de Michoacán y sus cercanías. Las instituciones consultadas son la Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Marina y el Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico de la Comisión Nacional del Agua.
- *Generación:* se filtraron y adecuaron los datos de dirección y velocidad de viento para facilitar su procesamiento. Además, se utilizaron modelos matemáticos para la extrapolación del recurso eólico a la altura que normalmente se ubica un aerogenerador, la extrapolación se realizó mediante la Ley de Perfil Logarítmico. Una vez obtenidos los datos extrapolados se alimentaron al software WASP para la evaluación del recurso eólico. Los resultados obtenidos se reportan en la forma de gráficas de velocidad del viento en función del tiempo, diagramas de Weibull, rosa de vientos y valores medios de velocidad de viento y densidad de potencia.
- *Evaluación:* el criterio de clasificación de los sitios con un buen recurso eólico en este trabajo de tesis se basa en la comparación de las velocidades medias y densidades de potencia. Por lo tanto, se realizó un compendio de los valores medios de velocidad de viento y densidad de potencia de

cada uno de los sitios analizados, así como la revisión de los diagramas de Weibull y las rosas de viento arrojadas en el estudio anual de cada sitio de medición.

- *Comunicación:* se presenta un resumen de los resultados más importantes en esta tesis mostrando las estaciones con el mejor recurso eólico. Además se presentan los posibles trabajos futuros derivados de este trabajo. Por su parte, se presenta el análisis detallado de un subconjunto de sitios de medición, mientras que el conjunto completo de estaciones de medición se puede consultar en el sitio Web <http://dep.fie.umich.mx/~norberto/index.php?id=evaluacion-del-recurso-eolico-en-el-estado-de-michoacan-identificacion-preliminar>.

1.5 Descripción por capítulos

En esta sección se presenta la descripción por capítulos de esta tesis. En el capítulo 1 se presenta una introducción sobre los sistemas de energías renovables, antecedentes de la evaluación de la energía eólica, la motivación del proyecto y la metodología.

En el capítulo 2 se presentan los fundamentos del recurso eólico y las ecuaciones matemáticas utilizadas para su representación y evaluación. Además, se presentan los modelos estadísticos disponibles para el procesamiento y formulaciones matemáticas para la extrapolación de datos.

En el capítulo 3 se presenta una breve descripción del Estado de Michoacán, sus características topográficas y climas. Además, se presentan las estaciones meteorológicas encargadas del monitoreo, así como su ubicación geográfica en el Estado.

En el capítulo 4 se presenta el análisis del recurso eólico para un subconjunto de estaciones de medición en el Estado utilizando el paquete WAsP. Para cada sitio analizado se presentan los valores medios de la velocidad y densidad de potencia del viento, así como el histograma de distribución de frecuencias de velocidades y la rosa de vientos.

En el capítulo 5 se analizan los resultados arrojados por el paquete WAsP, así como los posibles lugares propuestos para realizar estudios detallados del recurso eólico.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta tesis y los trabajos futuros.

Capítulo 2 Representación del recurso eólico

En este capítulo se presentan algunos conceptos asociados a la determinación del recurso eólico. Además, se presenta la formulación básica para representar el recurso eólico y para extrapolar la velocidad del viento a diferentes alturas.

2.1 Fundamentos del recurso eólico

Se considera viento a toda masa de aire en movimiento, en donde el origen del movimiento de las masas de aire es la radiación solar. La cantidad de energía que proporciona la radiación solar depende de la latitud del lugar, de tal forma que en las regiones polares se produce un calentamiento menor que en el Ecuador. El aire más caliente es menos denso y asciende, siendo desplazado por otro más frío y pesado. La circulación global del aire, es la correspondiente al macro-clima de escala planetaria.

La Figura 2 ilustra la circulación general del aire en la superficie. La dirección de estas grandes corrientes de circulación está influida por la rotación terrestre y por la disposición de los continentes. La rotación de la tierra hace que aparezca una fuerza llamada de Coriolis, que produce una *componente Este* para los vientos que circulan hacia el Sur, y una *componente Oeste* para los vientos sur que circulan hacia el Norte. La *componente Este u Oeste* es mayor cuanto más cerca estemos de los polos y menor cuanto más próximos estemos al Ecuador. Esta fuerza de Coriolis también crea movimientos cíclicos circulares de las masas de aire que se desplazan desde las altas presiones hacia las bajas presiones. Las zonas de bajas presiones son sumideros de aire y generan movimientos giratorios en el sentido contrario a las manecillas del reloj en el Hemisferio Norte y en sentido de las manecillas del reloj en el Hemisferio Sur [12].

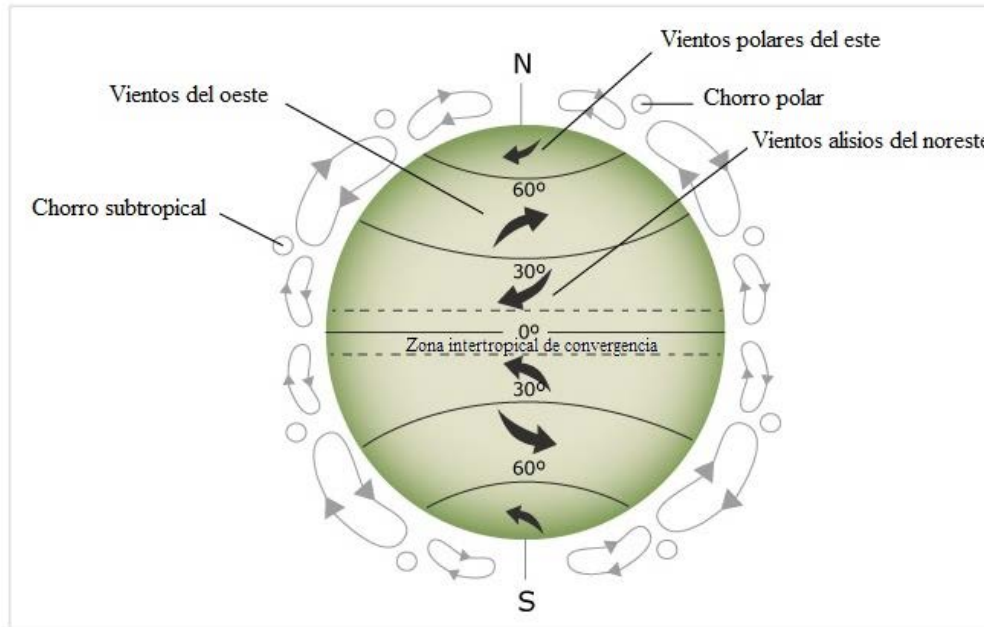


Figura 2. Circulación general del aire en la superficie.

2.1.1 Patrones que afectan la circulación del viento

El patrón de desviaciones de la circulación general de aire ocurre debido a la distribución no homogénea de masas de tierra sobre el globo. La forma en que aparece el viento en términos de velocidad, dirección y turbulencia es difícil de predecir debido a que depende de distintos factores globales y locales. Los factores que influyen son la rotación de la tierra, posición de la luna, diferencia de temperaturas global y local, orografía de terreno, rugosidad de la superficie y obstáculos [12].

2.1.2 Escalas de vientos: vientos geostróficos

La atmósfera (Tropósfera)

La atmósfera tiene un espesor de 10 a 11 Km, lo que representa 1/1200 del diámetro del globo. Esta parte de la atmósfera es conocida con el nombre de tropósfera y es en donde ocurren los fenómenos meteorológicos. Los vientos geostróficos son generados, principalmente, por las diferencias de temperatura, así como por las de presión, y apenas son influenciados por la superficie de la tierra. Los vientos geostróficos se encuentran a una altura de 1000 metros a partir del nivel del suelo. La velocidad de los vientos geostróficos puede ser medida utilizando globos sonda.

Vientos de superficie

Los vientos están mucho más influenciados por la superficie terrestre a altitudes de hasta 100 metros. El viento es frenado por la rugosidad de la superficie de la tierra y por los obstáculos. Las direcciones del viento cerca de la superficie serán ligeramente diferentes de las de los vientos geostroficados debido a la rotación de la tierra (Fuerza de Coriolis).

Rugosidad

En general, cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno mayor será la ralentización que experimente el viento. Obviamente, los bosques y las grandes ciudades ralentizan mucho el viento, mientras que las pistas de hormigón de los aeropuertos sólo lo atenúan ligeramente. Las superficies de agua son incluso más lisas que las pistas de hormigón, y tendrán por tanto menos influencia sobre el viento, mientras que la hierba alta y los arbustos atenúan la velocidad del viento de forma considerable [13].

En la Figura 3 se muestra el efecto del terreno suave y accidentado. Los accidentes del terreno suave como colinas o vaguadas influyen positivamente en la aceleración local del viento. Por ejemplo, una colina de pendiente suave acelera al viento a lo largo de la pendiente dándose la máxima velocidad en la cima de la loma. En cambio, un terreno accidentado abruptamente disipa la energía del viento debido a las turbulencias generadas. Un acantilado no es recomendable para instalar un aerogenerador [14].

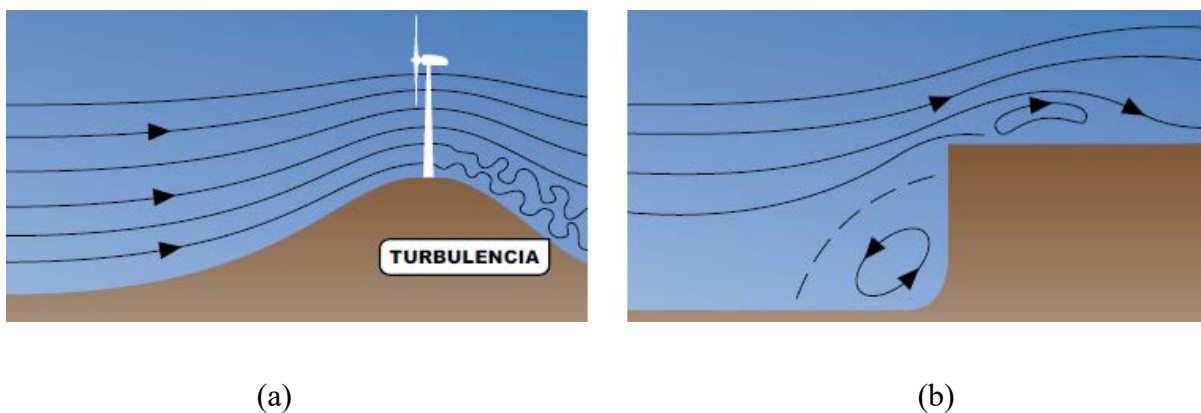


Figura 3. Orografía del terreno a).- efecto aceleración sobre colina suave y b).- turbulencias en la parte superior e inferior de acantilados y cimas angulosas.

2.2 Relaciones de velocidad y potencia

La energía contenida en el viento es la energía cinética definida como,

$$E_C = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (1)$$

en donde m es la masa y v_0 es la velocidad del viento.

La potencia que transporta una corriente de aire se puede calcular como la energía utilizada o convertida por unidad de tiempo,

$$P = \frac{E_C}{t} = \frac{\frac{1}{2}mv_0^2}{t} \quad (2)$$

tomando en cuenta que $m = \rho V$, $v_0 = l/t$, donde l representa la longitud recorrida en la unidad de tiempo t entonces de (2) se tiene,

$$P = \frac{1}{2}\rho A v_0^3 \quad (3)$$

en donde ρ es la densidad del aire y A es el área de barrido.

La Ecuación (3) indica que la potencia transportada por el viento es una función del cubo de su velocidad y es directamente proporcional al área de barrido. Por ejemplo, si una ráfaga de viento duplica su velocidad, la potencia se hará ocho veces mayor. El área que atraviesa el viento influye sobre la velocidad de flujo volumétrico de aire. Si se supone que tal área es circular, al duplicar el diámetro equivale a incrementar cuatro veces la potencia disponible. Para un área circular definida como $A = \pi(D^2/4)$ se tiene,

$$P = \frac{1}{2}\rho\pi\left(\frac{D^2}{4}\right)v_0^3 \quad (4)$$

en donde D es el diámetro del círculo. El límite de Bentz establece que una turbina ideal aprovecha solamente 59% de la totalidad de la potencia del viento [12].

2.3 Representación estadística del viento

Dadas las características tan dispersas y aleatorias de la energía eólica, es evidente que la manera de determinar si un emplazamiento es adecuado o no, es mediante la aplicación de herramientas estadísticas. Para ello se recurre a la representación de la velocidad del viento como una variable aleatoria con una cierta función de distribución. La distribución de frecuencia de la velocidad del viento se puede aproximar usando la distribución de Weibull [15],

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (5)$$

en donde,

k es el factor de forma de la distribución

c es el parámetro de escala de la distribución

v es la velocidad del viento

La Figura 4 describe la forma de la distribución de Weibull que se obtiene al mantener constante el parámetro c y variando el parámetro k . Además, se muestra la distribución de Weibull cuando se mantiene constante el parámetro k y se varía el parámetro c . Se puede observar de esta figura que al variar el parámetro k se varía la forma de distribución y al variar el parámetro c cambia la escala de la distribución de Weibull.

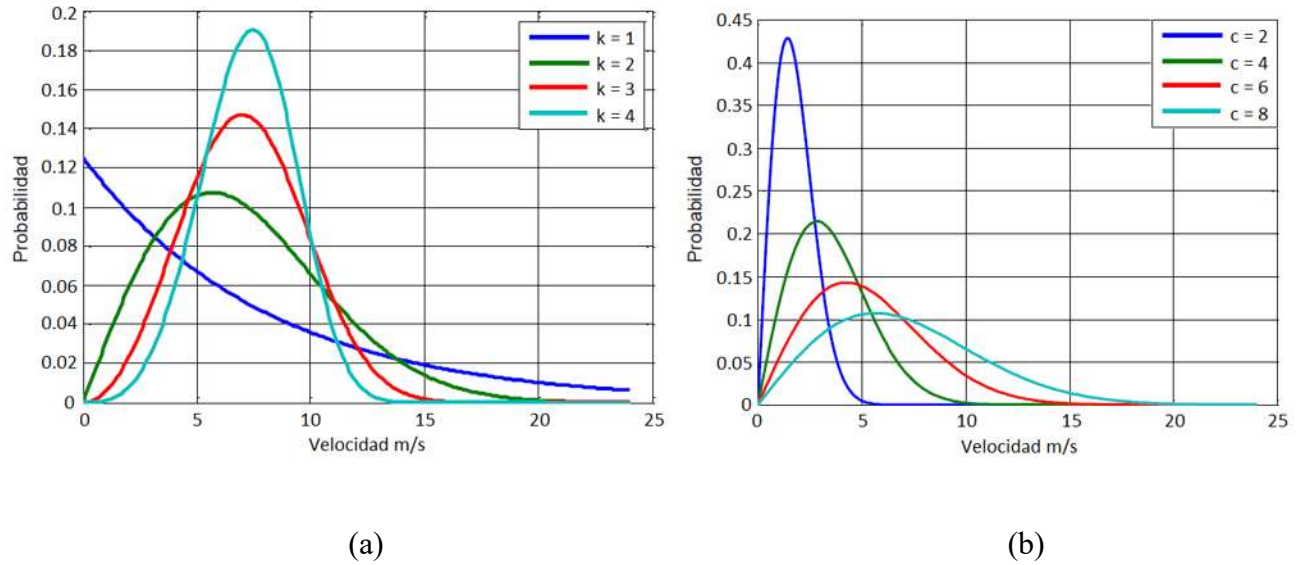


Figura 4. Diagramas de Weibull con a).-un factor de forma $k=1,2,3,4$ y un factor de escala $c=8$ y b).- con un factor de escala $c=2,4,6,8$ y un factor de forma $k=2$.

2.4 Cálculo de la velocidad del viento a diferentes alturas

Los datos meteorológicos disponibles de la superficie se encuentran normalmente a alturas alrededor de 10m. La determinación del recurso eólico a mayores alturas se realiza utilizando métodos de extrapolación. Existen varias expresiones usadas para determinar el perfil de velocidad del viento a diferentes alturas. Una expresión simple que da resultados satisfactorios es la *Ley Exponencial de Hellmann* que relaciona las velocidades de dos alturas cualesquiera de la siguiente manera [16],

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (6)$$

en donde v es la velocidad a la altura H , v_0 es la velocidad a la altura H_0 (frecuentemente a una altura de 10m) y α es el coeficiente de fricción o exponencial de Hellmann. Este coeficiente se elige en función del tipo de terreno. Frecuentemente se usa el valor de $1/7$ para terrenos abiertos. Además, es necesario considerar que este parámetro puede variar para un mismo sitio desde un valor de $1/7$ durante el día hasta $1/2$ durante la noche. A la Ecuación (6) también se le conoce como la *Ley de Potencia* y cuando el valor de α es igual a $1/7$, se le conoce como la *Ley de Potencia de un Séptimo* [16]. La Tabla 1 presenta valores de coeficientes de fricción para distintos tipos de terreno.

Tabla 1. Coeficientes de fricción para diferentes tipos de terreno.

Tipo de terreno	Coefficiente de fricción α
Lagos, océano, superficies suaves y duras	0.10
Césped	0.15
Terrenos de cultivo, setos o vallas y arbustos	0.20
Campos boscosos con muchos árboles	0.25
Pueblo pequeño con algunos árboles y arbustos	0.30
Área de la ciudad con edificios altos	0.40

Por otra parte, la extrapolación del recurso eólico se puede realizar mediante la *Ley de Perfil Logarítmico* del viento,

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{z_0}\right)} \quad (7)$$

en donde z_0 es el coeficiente de longitud de rugosidad en metros. Este coeficiente se define en función del tipo de terreno, espaciamiento y de rugosidades y toma valores en el rango 0.0002 hasta 1.6. Estos valores pueden encontrarse en tablas, los cuales son valores aproximados ya que las características del terreno pueden cambiar constantemente. La variación de este coeficiente se debe al hecho de que los lugares de medición o monitoreo pueden ser tierras de uso agrícola y obviamente la longitud de los cultivos es variable. Sin embargo, una vez que se han calculado las velocidades a otra alturas se puede aplicar la ecuación para calcular la potencia o energía promedio. Las Tablas 2, 3 y 4 c contienen los valores de rugosidades más comúnmente utilizados [16]. En este trabajo se realizaron las extrapolaciones con la *Ley de Perfil Logarítmico* aplicando diferentes valores de longitud de rugosidad. Los valores de rugosidad se estimaron empíricamente con ayuda de las imágenes satelitales de Google Earth en cada sitio de análisis.

También es importante considerar que así como se usa una rosa de vientos para trazar el mapa de la cantidad de energía procedente de diferentes direcciones, se puede usar una rosa de rugosidades para describir la rugosidad del terreno en diferentes direcciones del sitio de emplazamiento de una turbina eólica. Por lo tanto, se pueden realizar cálculos más exactos de la producción de energía en lugares próximos a la estación de medición, conociendo la longitud de rugosidad del terreno en cuestión.

Tabla 2. Clasificación de rugosidad y valores de coeficiente de rugosidad para diversos terrenos.

Clase de rugosidad	Descripción	Longitud de rugosidad $z_0(m)$
0	Superficie del agua	0.0002
1	Áreas abiertas con muy poca protección contra el viento	0.03
2	Terreno agrícola con algo de protección contra el viento de más de 1km de distancia de separación.	0.1
3	Distritos urbanos y terrenos agrícolas con mucha protección contra el viento	0.4
4	Ciudades grandes o bosques	1.6

Tabla 3. Valores del coeficiente de rugosidad para diversos tipos de terreno.

Tipos de terreno	$z_0(mm)$
Muy suave, hielo o lodo	0.01
Mar abierto en calma	0.20
Mar picado	0.5
Superficie de nieve	3.00
Pasto quebrado	10.00
Campo preparado para cultivo	30.00
Cultivo	50.00

Tabla 3. Valores del coeficiente de rugosidad para diversos tipos de terreno (Cont.).

Tipos de terreno	z_0(mm)
Pocos árboles, hileras de árboles con pocas construcciones	250.00
Bosques, tierras cubiertas con árboles	500.00
Centros de ciudades con edificios altos	3000.00

Tabla 4. Clases y longitudes de rugosidad dadas por la “Danish Wind Industry Association”.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad (m)	Tipo de paisaje
0	0.0002	Superficie de agua
0.5	0.0024	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pista de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0.03	Área agrícola abierta sin cercado ni setos, con edificios muy dispersos. Solo colinas suavemente redondas.
1.5	0.055	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250m
2	0.1	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500m
2.5	0.2	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250m
3	0.4	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos y altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y desigual.
3.5	0.8	Ciudades más grandes con edificios altos.
4	1.6	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos.

2.5 Sumario

En este capítulo se describieron brevemente los principios del movimiento de las masas de aire producido por la energía transmitida por el sol. Además se presentaron los factores que afectan la velocidad del viento sobre la superficie terrestre. Se presentaron las ecuaciones básicas que describen la energía cinética contenida en el viento y la energía producida por una turbina eólica. Para conocer la cantidad de energía proporcionada por el viento se extrapolan los datos a diversas alturas usando la ley de perfil logarítmico y diferentes longitudes de rugosidad apropiadas para cada sitio. Se utiliza la distribución weibull para representar los datos en cada análisis, ya que es la más apropiada para estudiar un conjunto de datos muy dispersos.

Capítulo 3 Características del Estado de Michoacán

3.1 Geografía

La Figura 5 muestra la ubicación geográfica y división municipal del Estado de Michoacán de Ocampo. El Estado está ubicado entre las latitudes 20° 24' y 17° 55', y entre las longitudes 100° 04' y 103° 44'. El Estado de Michoacán se ubica en el centro-oeste del territorio mexicano, colindando con los Estados de Colima y Jalisco al Noroeste, Guanajuato y Querétaro al Norte, con el Estado de México y Guerrero al Oeste y con el Océano Pacífico al Suroeste. Posee una superficie de 58,585km², lo cual representa el 3% de la superficie de todo el país. Esta extensión territorial lo coloca en el lugar número 16 entre las 32 entidades federativas. La entidad está formada por 113 municipios y su capital es la ciudad de Morelia.

La orografía de Michoacán es una de las más accidentadas de México, contiene numerosos volcanes que forman parte del Eje Volcánico Transversal (44.98% de su superficie) y de la Sierra Madre del Sur también conocida como Sierra de Coalcomán (55.02% de la superficie). La Figura 6 presenta el mapa de relieve del Estado de Michoacán. Esta vasta demarcación cuenta con altas y encrespadas montañas cubiertas de bosques, rica flora y fauna, con clima apropiado para hábitat y multiplicación de animales y plantas, así como numerosos ríos y arroyos, lagos, lagunas y manantiales. La altitud del Estado oscila entre 0 y 3840m sobre el nivel del mar (msnm), teniendo como principales elevaciones las siguientes:

- Pico de Tancítaro: 3840 msnm
- Cerro de San Andrés: 3600 msnm
- Cerro de Patamban: 3500 msnm
- Cerro El Campanario: 3420 msnm
- Cerro del Pílon: 3400 msnm
- Cerro El Tecolote: 3360 msnm
- Cerro San Isidro: 3350 msnm
- Cerro del Águila (Paracho): 3340 msnm
- Cerro La Nieve : 3330 msnm
- Cerro Zirate: 3320 msnm
- Cerro Cherán: 3300 msnm
- Volcán del Parícutín: 2800 msnm

El Estado de Michoacán cuenta con 228km de costa, siendo sus costas una de las más montañosas y accidentadas del país. Los principales lagos del Estado son el lago de Cuitzeo, el lago de Pátzcuaro, el lago de Zirahuén, una parte del lago de Chápala y la Presa Infiernillo. Su río más importante es el río Lerma el cual nace en el Estado de México y abastece a la presa Tepuxtepec para regar las tierras del valle de Maravatío y producir energía eléctrica. Le sigue en importancia el río Tepalcatepec.

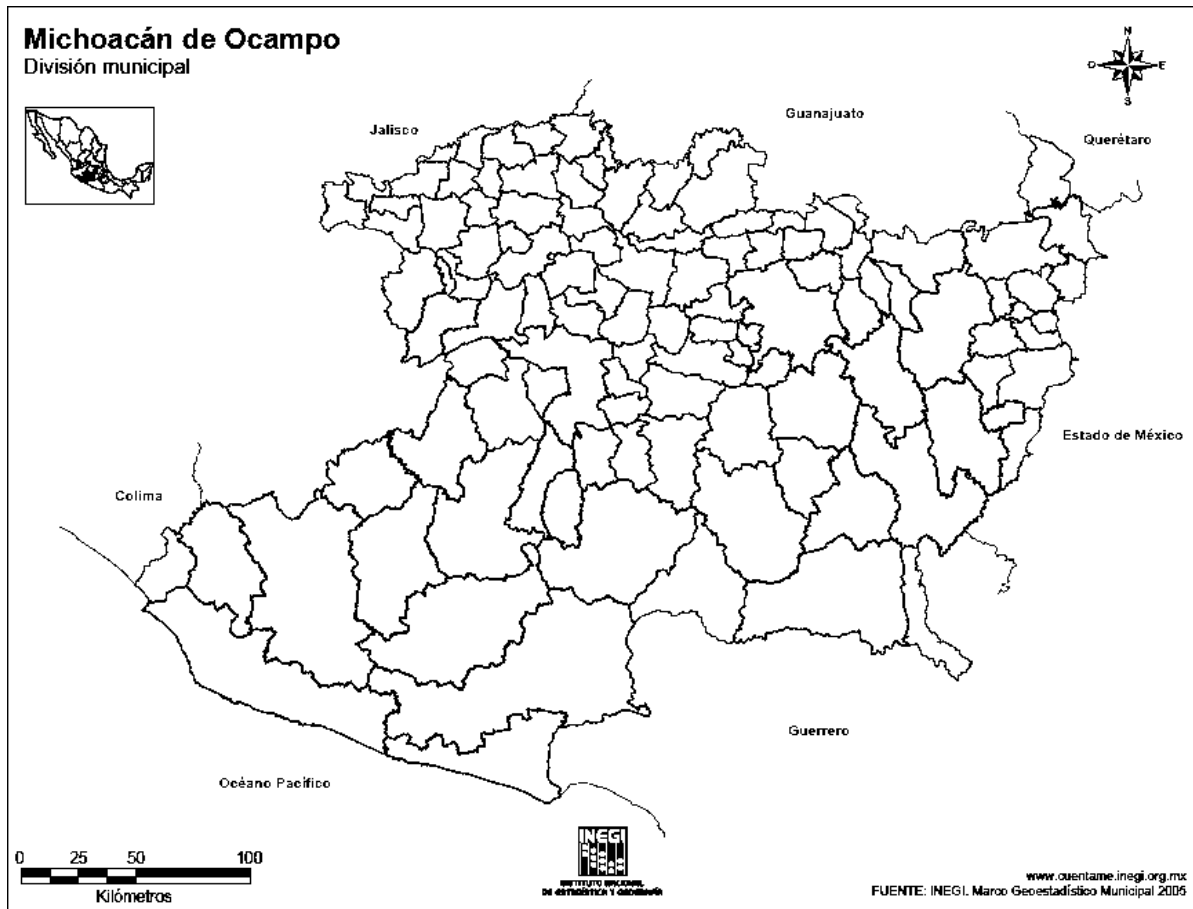


Figura 5. División municipal del Estado de Michoacán.

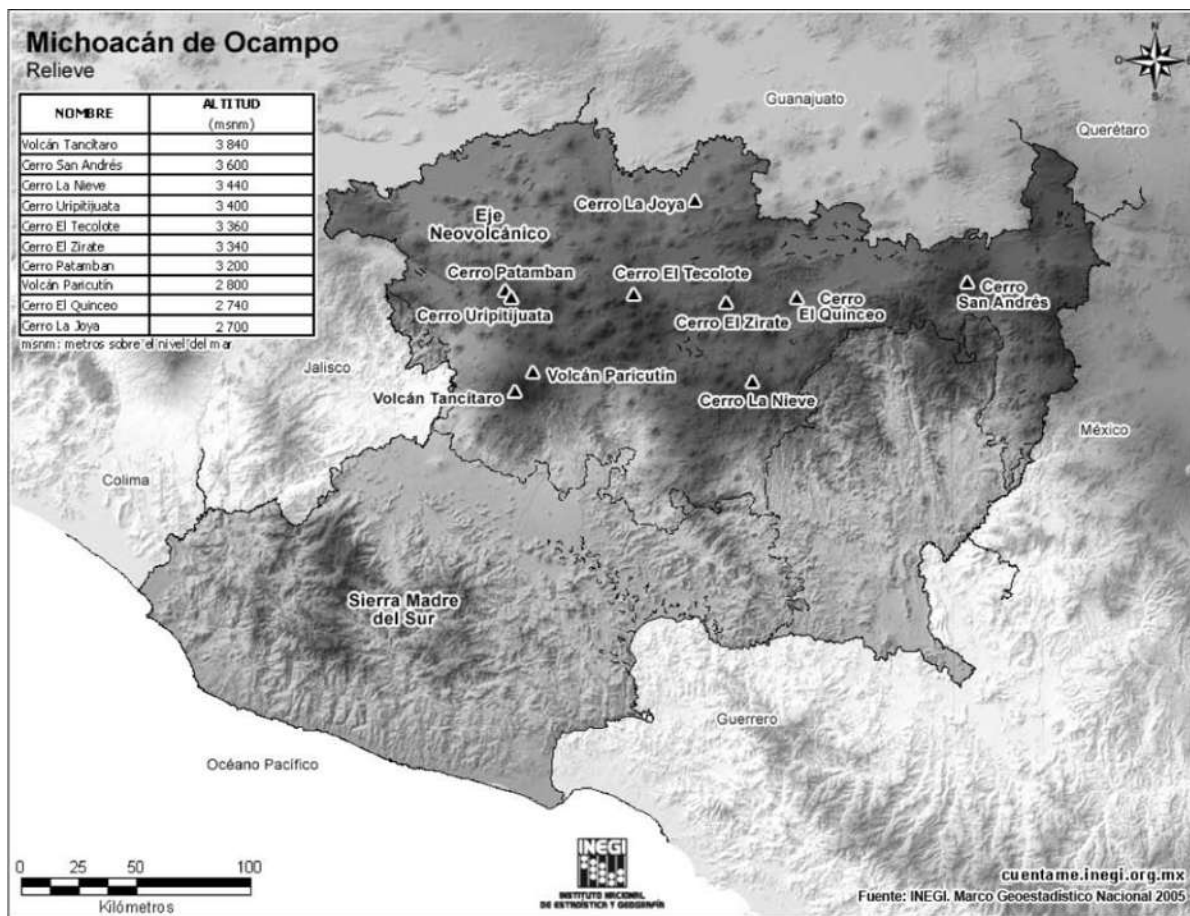


Figura 6. Mapa de relieve del Estado de Michoacán.

Según datos arrojados por el 2° Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), hasta el año 2010 el Estado de Michoacán contaba con una población total de 4,352,037 habitantes, con una densidad de población de $66.2 \text{ hab}/\text{km}^2$ [17].

3.2 Clima

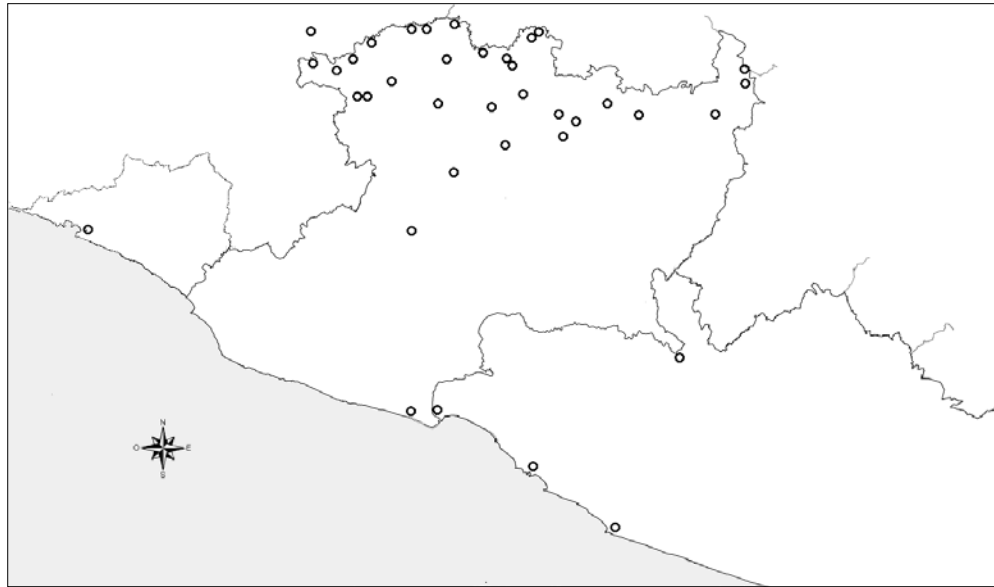
En Michoacán se tiene una precipitación media anual de 806 mm, lo cual constituye a la entidad como la decimosexta más lluviosa del país. Por otra parte, la temperatura promedio es de 22.2°C , teniendo como extremo temperaturas mínimas anuales de 14.7°C y temperaturas máximas de 29.6°C , lo cual la constituye en la decimo tercer entidad más caliente del país.

3.3 Datos del recurso eólico en Michoacán

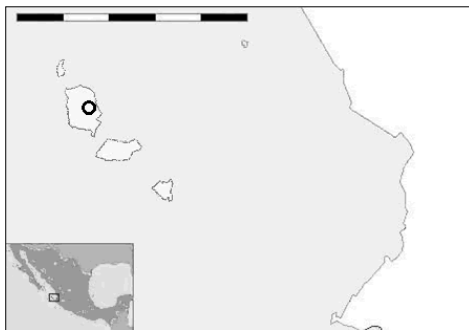
La adecuada evaluación del recurso eólico depende en gran medida de la calidad y cantidad de datos disponibles de velocidad y dirección del viento. En esta tesis se consultaron varias bases de datos de observaciones superficiales que abarcan varios años de registro. Los datos eólicos superficiales de alta calidad pueden proveer el mejor indicador de la magnitud y distribución del recurso eólico en un sitio específico. Sin embargo, la calidad de los datos superficiales provenientes de estaciones meteorológicas varía y frecuentemente son poco confiables con fines de evaluación del recurso eólico.

En esta tesis se procesaron las bases de datos de velocidad y dirección de viento en 40 estaciones meteorológicas pertenecientes a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y de la Secretaría de Marina (SEMAR). La Figura 7 ilustra la ubicación geográfica de cada una de las estaciones meteorológicas, en la Figura 7(a) se presenta la distribución de las estaciones en el Estado de Colima, Michoacán, Guerrero y Jalisco, en la Figura 7(b) se presenta la ubicación de la estación en la Isla María Madre, en la Figura 7(c) se presenta la ubicación de la estación en la Isla Clarión y en la Figura 7(d) se presenta la ubicación de la estación en la Isla Socorro, se puede apreciar 3 estaciones meteorológicas mar adentro en el Océano Pacífico, 4 estaciones en el Estado de Guerrero, 1 estación en el Estado de Colima y 1 estación en el Estado de Jalisco. Mientras que la Tabla 5 enlista la ubicación en términos de longitud y latitud para cada una de las estaciones.

Los administradores de las bases de datos antes mencionadas han informado que las estaciones meteorológicas se calibran y revisan de forma regular cada año. Por lo tanto, se considera que la calidad de los datos del viento de estas estaciones meteorológicas es aceptable. Sin embargo, la presencia de edificios y arboles cerca de la estación meteorológica y la degradación del equipo de medición puede afectar las mediciones registradas en dichas estaciones. Por esta razón los estudios realizados con los datos por estas estaciones no son necesariamente un indicador preciso del recurso eólico en el sitio de estudio. Sin embargo, los resultados obtenidos con estos datos si permiten generar estudios preliminares del recurso eólico que permitan ubicar posibles sitios de interés para realizar estudios detallados.



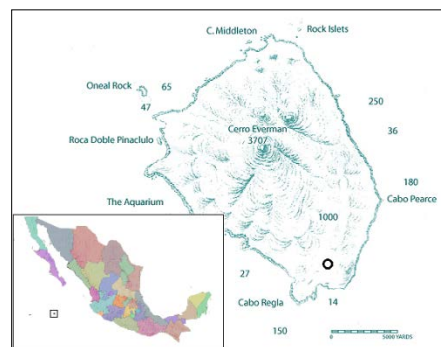
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7. Ubicación de las estaciones meteorológicas en: a).- el Estado de Colima, Michoacán, Guerrero y Jalisco, b).- la Isla María Madre, c).- la Isla Clarión y d).- la Isla Socorro.

Tabla 5. Estaciones meteorológicas en el Estado de Michoacán y mar adentro [18].

Organismo administrador	Estación	Ubicación		Altitud (m)
		Longitud	Latitud	
SEMAR	Isla Clarión	114°44'03''	18°20'18''	3
	Isla Madre	106°32'13''	21°37'47''	37
	Isla Socorro	114°44'00''	18°20'30''	35
	Lázaro Cárdenas	102°11'02''	17°56'23''	116
	Manzanillo	104°17'52''	19°04'09''	3
	Morelia	101°12'00''	19°42'00''	1913
	Puerto Vicente	101°03'28''	17°16'22''	30
SMN	Angamacutiro	101°43'21''	20°07'31''	1730
	Apatzingan	102°22'18''	19°04'58''	282
	Cd. Altamirano	100°39'30''	18°21'02''	251
	Petalcalco	102°07'23''	17°59'04''	53
	Tizapan	103°02'38''	20°10'10''	1503
	Uruapan	102°04'48''	19°25'12''	1606
	Zihuatanejo	101°33'17''	17°38'42''	5
Organismo de Cuenca-Lerma-Santiago Pacifico de la Comisión Nacional del Agua	Aristeo Mercado	101°40'11''	19°55'32''	2004
	Cointzio	101°15'35''	19°37'42''	2024
	Corrales	101°51'46''	20°12'42''	1578
	La Palma	102°46'06''	20°08'43''	1526
	La Piedad	102°00'14''	20°21'13''	1905
	Lago de Cuitzeo	101°04'03''	19°54'00''	1831
	Lago de Pátzcuaro	101°36'59''	19°50'09''	2042
	Laguna Fresno	100°24'04''	19°50'09''	2052
	Mal País	100°52'41''	19°50'30''	1835
	Maltaraña	102°39'17''	20°13'44''	1516
Markazuza	101°36'00''	20°18'00''	1707	

Tabla 5. Estaciones meteorológicas en el Estado de Michoacán y mar adentro (Cont.).

Organismo administrador	Estación	Ubicación		Altitud (m)
		Longitud	Latitud	
Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacifico de la Comisión Nacional del Agua	Melchor Ocampo	101°43'17''	10°07'40''	1716
	Mezcala	103°01'10''	20°20'14''	1524
	presa 3 Mezquites	100°37'08''	20°16'40''	1688
	Presa Gonzalo	102°36'05''	19°57'33''	1591
	Presa Jaripo	102°25'53''	20°18'11''	1539
	Presa la Cofradía	101°35'06''	20°03'56''	1912
	Presa la Noria	102°06'07''	20°11'15''	1771
	Presa Urepetiro	102°08'13''	19°57'41''	1743
	San Antonio Guaracha	102°34'45''	19°57'47''	1591
	San Cristóbal	102°17'00''	20°20'00''	1551
	Temascales	100°08'55''	20°03'36''	2344
	Tepuxtepec	100°13'44''	20°00'07''	2337
	Tercer Mundo	101°17'53''	19°45'54''	2466
	Yurecuaro	102°14'57''	20°20'21''	1538
	Zacapu	101°46'2''	19°49'4''	1977

Las estaciones meteorológicas son básicamente de dos tipos las cuales se describen a continuación:

3.3.1 Estación Meteorológica Automática

La Estación Meteorológica Automática (EMAS) es un conjunto de dispositivos eléctricos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de forma automática. Está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios en donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de

algunas variables meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables.

Esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas por estación. La hora que se utiliza para registrar los datos es el horario del Tiempo Universal Coordinado (TUC). Por esta razón se debe tener en consideración este factor para la correcta interpretación de los datos [19].

La estación incorpora sensores de velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa, radiación solar y precipitación. La Figura 8 describe los tipos de estructuras utilizadas en este tipo de estaciones.

3.3.2 Estación sinóptica meteorológica

Una Estación Sinóptica Meteorológica (ESIME) es un conjunto de dispositivos eléctricos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de manera automática. Este tipo de estaciones meteorológicas miden las mismas variables que una estación EMAS realizan una recopilación de datos y generan archivos con el promedio de cada 10 minutos y generan un mensaje sinóptico. Los mensajes sinópticos son reportes que se generan simultáneamente en cada uno los observatorios cada tres horas y presentan información meteorológica de tiempo presente y pasado de manera codificada. Los mensajes sinópticos se rigen por el tiempo universal coordinado [19].

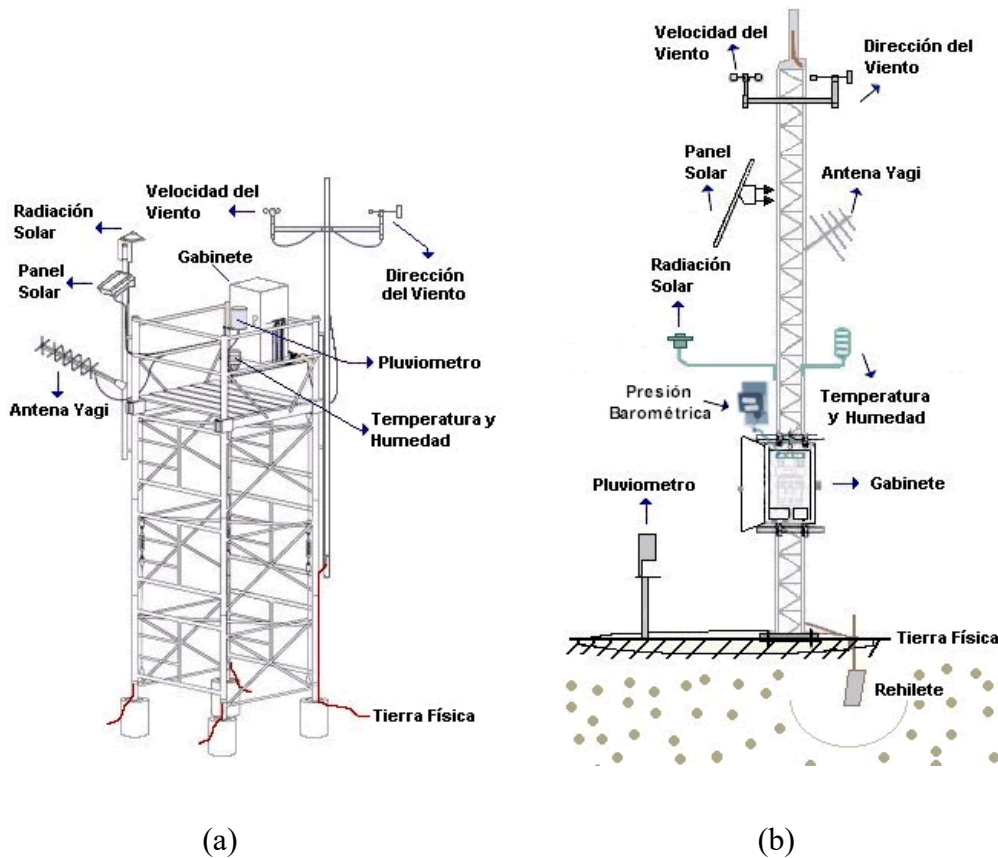


Figura 8. Estructuras utilizadas en las estaciones meteorológicas automáticas: a).- estructura tipo andamio y b).- estructura tipo torre triangular.

Las Estaciones Sinópticas Meteorológicas se encuentran ubicadas exclusivamente en los observatorios meteorológicos. Las ESIME's contienen un software que permite hacer los cálculos correspondientes de las variables que se reportan en un mensaje sinóptico. La Figura 9 muestra la distribución de los sensores en una estructura de tipo torre triangular. En esta figura se puede apreciar la altura de cada sensor sobre el nivel del suelo.

3.4 Selección de datos de entrada

El asistente OWC Wizard del paquete WAsP que permite preparar los datos de entrada solo acepta archivos de texto con los valores de velocidad y dirección de viento dispuestos en pares. Sin embargo,

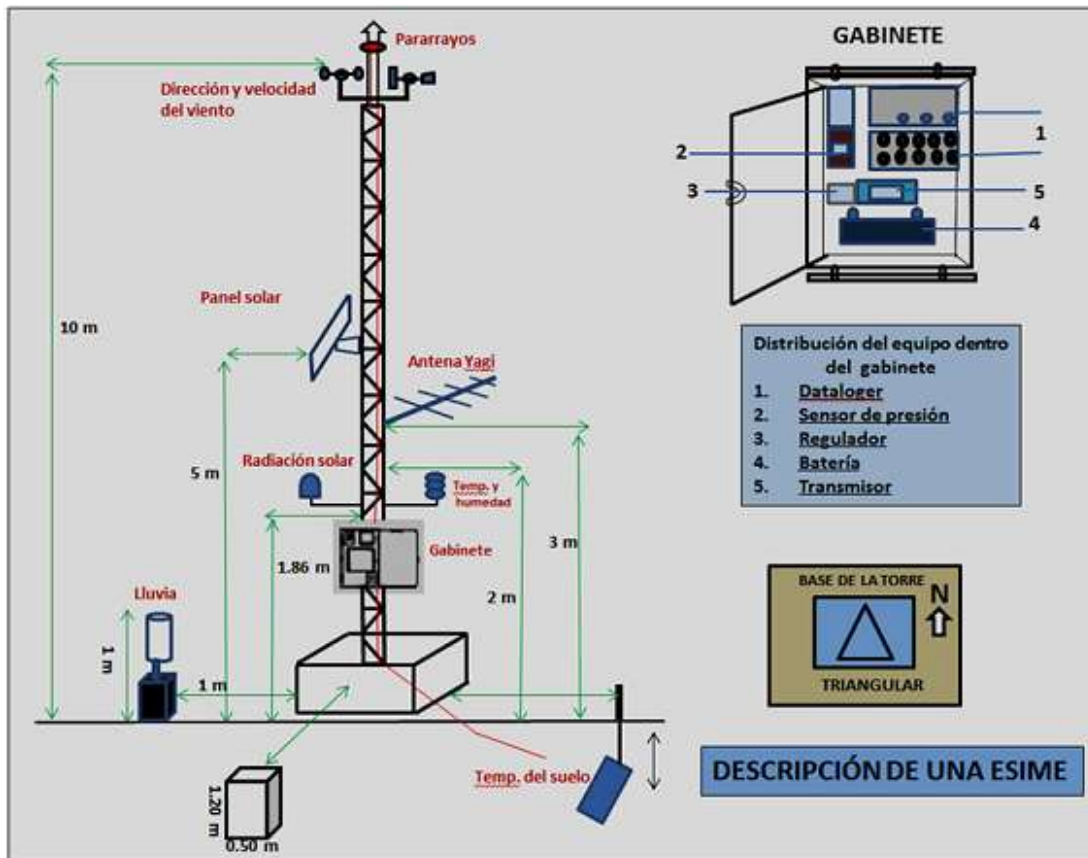


Figura 9. Distribución de los sensores en la estación meteorológica ESIME.

las bases de datos obtenidas de cada una de las estaciones meteorológicas se encuentran en archivos de hoja de cálculo con extensión .XLS ó extensión .CVC La Figura 10 muestra un ejemplo de un archivo de una estación meteorológica, en donde se puede apreciar que además de la velocidad y dirección del viento existen otras columnas con información de otras variables ambientales. Por lo tanto, se elaboró un programa en la plataforma Java con el fin de adecuar la información al formato solicitado por el programa WASP y para filtrar algunos datos medidos que son inadecuados. Un valor no adecuado se refiere a un valor de velocidad o dirección del viento que es repetido, omitido o se registra con un valor fuera del rango permitido. En los casos en donde las mediciones son evidentemente erróneas, entonces se eliminan y no se consideran para ser procesadas por el programa WASP.

La Figura 11 muestra el diagrama de flujo del programa que se diseñó para extraer los datos de velocidad y dirección del viento de los archivos en formato de hoja de cálculo. El código básicamente accede al archivo de cálculo definido en la ubicación de entrada y procesa el primer renglón de datos extrayendo los valores de Fecha, Hora, Dirección y Velocidad de Viento. Se verifica que cada uno de los campos contenga los valores adecuados y en caso de no ser así se desechan los valores de este renglón. Una vez extraídos los valores se aplica la función de extrapolación con los parámetros H , H_0 y Z_0 definidos al inicio del programa y se almacena en una nueva variable. Una vez realizado el cálculo se guardan estos valores en un documento de texto definido en la ubicación de salida siendo separados por un espacio sencillo y el programa continua realizando esta operación hasta extraer todos los valores de cada renglón en el archivo de cálculo.

Una vez aplicado el código a cada una de las bases de datos, se generan archivos de texto que ordenan la información de la velocidad y dirección del viento como se muestra en la Figura 12. En esta figura se puede apreciar que cada columna es separada por un espacio sencillo. Además, cada renglón muestra la fecha, hora de registro, dirección de velocidad, magnitud de velocidad y extrapolación de velocidad del viento a 80m de altura.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1		- Isla Clarion -										
2												
3	Fecha hora	Precipitación	Temperatu	Humedad	Presion Atm	Dirección	Dirección	Velocidad	Velocidad del Viento Maximo			
4	01/07/2001 00:00	0	27.4	74	1012.3	47	6	8.4	13			
5	01/07/2001 00:15	0	27	75	1012.2	40	31	8.4	15.5			
6	01/07/2001 00:30	0	26.4	77	1012	52	64	8.9	15.8			
7	01/07/2001 00:45	0	26.4	78	1012.1	33	43	7.2	11.4			
8	01/07/2001 01:00	0	26.4	78	1012.1	34	34	8.9	14.2			
9	01/07/2001 01:15	0	26.2	78	1012.2	29	19	6.8	12.7			
10	01/07/2001 01:30	0	26.1	79	1012.3	32	35	7.9	12.7			
11	01/07/2001 01:45	0	25.7	81	1012.5	51	45	9.1	14.2			
12	01/07/2001 02:00	0	25.5	82	1012.6	48	54	10.7	14.9			
13	01/07/2001 02:15	0	25.3	83	1012.7	44	56	8.1	13			
14	01/07/2001 02:30	0	25.1	83	1012.7	34	36	7.2	14.2			

Figura 10. Lecturas registradas por una estación meteorológica y reportadas en un archivo de hoja de cálculo.

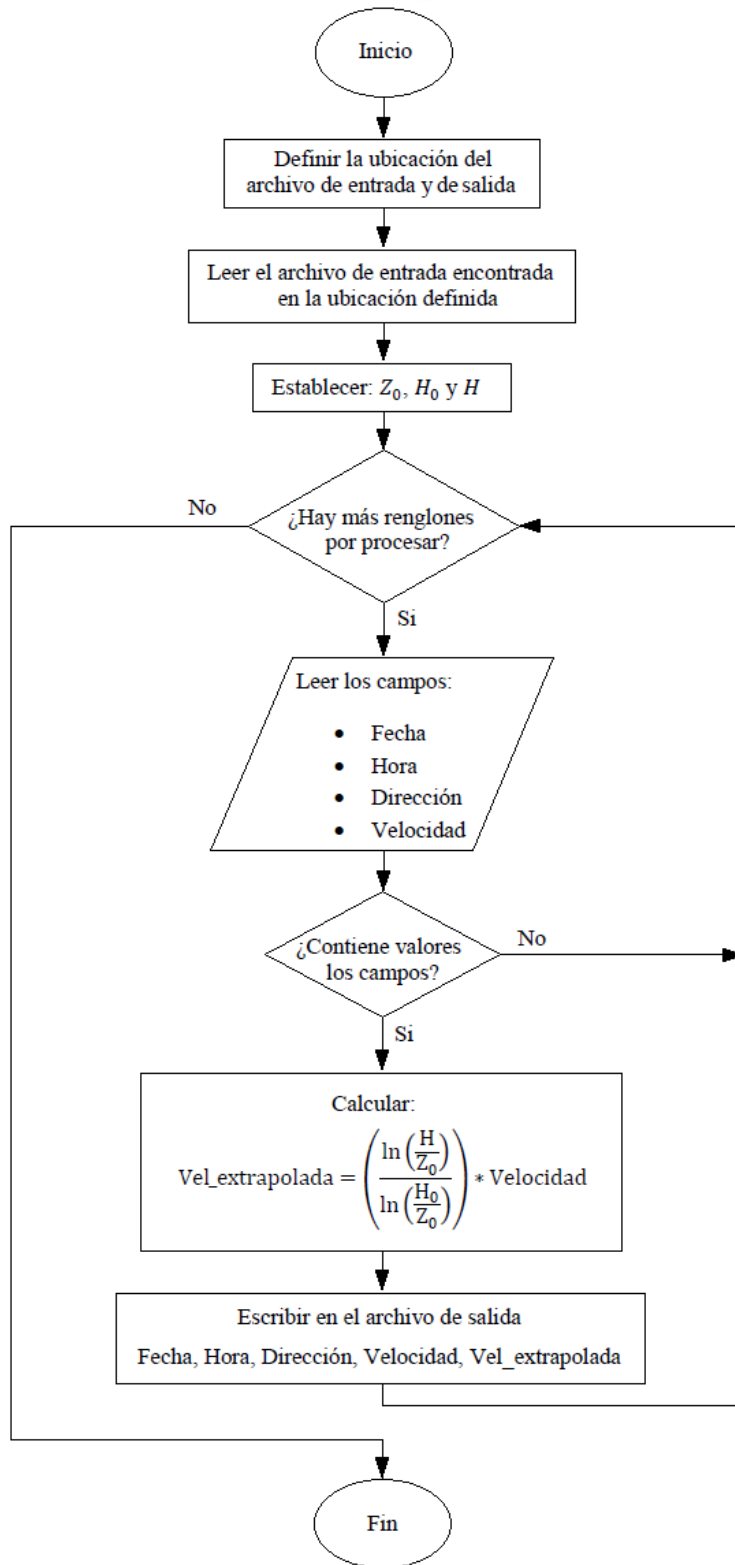


Figura 11. Diagrama de flujo del código del programa en Java.

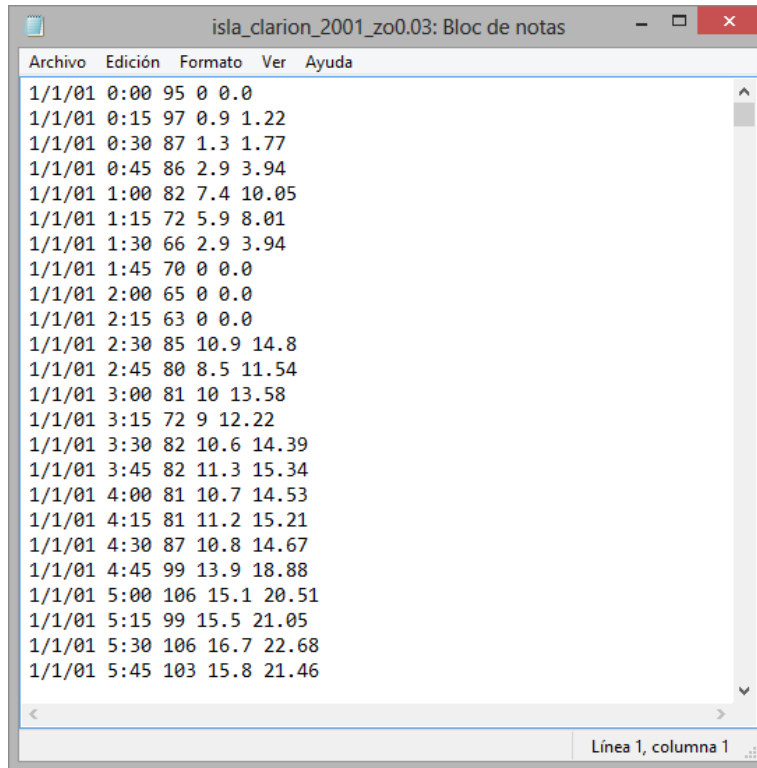


Figura 12. Archivo de salida con los valores filtrados y acondicionados para su análisis en WASP.

3.5 Sumario

En este capítulo se presentó una descripción del Estado de Michoacán, su ubicación geográfica, orografía y características climatológicas. Además, se presentó la descripción de las estaciones meteorológicas, su funcionamiento y variables medidas. Se presentaron las 40 estaciones utilizadas en este trabajo de tesis, indicando el organismo al que pertenecen, la ubicación en latitud, longitud y altitud sobre el nivel del mar. Así mismo, se describe el algoritmo desarrollado en Java para filtrar y acondicionar las mediciones de las bases de datos.

Capítulo 4 Resultados de cada estación meteorológica

En este capítulo se presentan los análisis por año de los datos medidos utilizando el software WAsP. Se ha seleccionado un subconjunto de estaciones de medición representativas para reportarse en este capítulo. Este subgrupo está constituido por las estaciones Isla Clarión, Lázaro Cárdenas, Puerto Vicente y Tepuxtepec. El estudio detallado del resto de estaciones analizadas que incluye 40 estaciones de medición se puede consultar en la página Web <http://dep.fie.umich.mx/~norberto/index.php?id=evaluacion-del-recurso-eolico-en-el-estado-de-michoacan-identificacion-preliminar>. Para cada estación se muestra una tabla con el porcentaje de datos disponibles para cada año medido. Las estaciones meteorológicas pertenecientes al Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacífico (OCLSP) registraron los valores de velocidad y dirección cada hora, por lo cual se tendría idealmente en un año un total de 8760 muestras. Por su parte, las estaciones de la Secretaría de Marina realizaron el registro de los valores de velocidad y dirección cada 15min, por lo cual se cuenta idealmente con un total de 35040 muestras por año y las estaciones meteorológicas pertenecientes a la Comisión Nacional del Agua realizaron los registros cada 10min por lo cual se cuenta idealmente con un total de 52560 muestras por año. Sin embargo, en ningún año se cuenta con el 100% de las muestras, debido a errores al momento de registrar los datos. Además, para cada estación se reporta una gráfica con los valores de velocidad y dirección usados en el estudio, una tabla que resume los valores medios de velocidad y densidad de potencia, la rosa de vientos y el diagrama de Weibull correspondiente.

Para cada una de las estaciones, se presenta primeramente el análisis a 10m (valores de viento a la altura del anemómetro) únicamente del último año. Enseguida, se muestra el análisis de cada uno de los años y extrapolados a una altura de 80m usando la ley de perfil logarítmico. Para cada una de las estaciones se propuso un factor de rugosidad según el tipo de terreno mostrado por la imagen de satélite. Tomando en cuenta las Tablas 1 y 2 se eligieron los factores de rugosidad que se presentan en la Tabla 6 para cada estación.

Tabla 6. Factor de rugosidad para la extrapolación de velocidad de viento

Organismo administrador	Estación	Factor de rugosidad (Z_0)
SEMAR	Isla Clarión	0.03
	Isla Madre	0.2
	Isla Socorro	0.15
	Lázaro Cárdenas	0.25
	Manzanillo	0.15
	Morelia	0.4
	Puerto Vicente	0.25
SMN	Angamacutiro	0.2
	Apatzingan	0.2
	Cd. Altamirano	0.4
	Petacalco	0.25
	Tizapan	0.2
	Uruapan	0.4
	Zihuatanejo	1.6
Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico de la Comisión Nacional del Agua	Aristeo Mercado	0.2
	Cointzio	0.225
	Corrales	0.2
	La Palma	0.2
	La Piedad	0.225
	Lago de Cuitzeo	0.1
	Lago de Pátzcuaro	0.2
	Laguna Fresno	0.2
	Mal País	0.2
	Maltaraña	0.2
	Markazuza	0.2
	Melchor Ocampo	0.2
	Mezcala	0.2
	Presas 3 Mezquites	0.2
Presas Gonzalo	0.2	
Presas Jaripo	0.2	

Tabla 6. Factor de rugosidad para la extrapolación de velocidad de viento (Cont.)

Organismo administrador	Estación	Factor de rugosidad (Z_0)
Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacifico de la Comisión Nacional del Agua	Presa La Cofradía	0.2
	Presa la Noria	0.2
	Presa Urepetiro	0.15
	San Antonio Guaracha	0.2
	San Cristóbal	1.0
	Temascales	0.2
	Tepuxtepec	0.15
	Tercer Mundo	0.2
	Yurecuaro	0.2
	Zacapu	0.225

4.1 Estación Isla Clarión

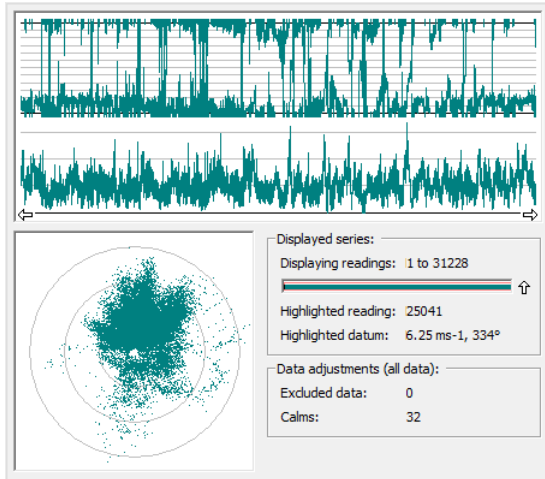
A continuación se muestra el análisis correspondiente a la estación Isla Clarión. La Tabla 7 resume los porcentajes anuales de datos disponibles para esta estación. De esta tabla se puede apreciar que el porcentaje de datos disponible se degradó de 62.89% a 20.65% del año 2000 a 2007. Además, no se tuvieron registros durante el año 2008. A partir del año 2009 se observa un porcentaje de datos disponible por arriba del 79%. Cabe hacer mención que en el año 2009 se observó una situación particular en el registro de la dirección. A partir de la fecha 01/05/2009 hasta el 30/09/2009 la dirección de la velocidad se mantuvo constante. Sin embargo, la velocidad se registró de forma regular.

Tabla 7. Porcentaje de datos útiles en los estudios de la estación Isla Clarión.

Estación Isla Clarión		
Año	Número de datos por año	Porcentaje por año
2000	22045	62.89%
2001	14731	42.02%
2002	18072	51.54%
2003	13541	38.63%
2004	13032	37.18%
2005	7867	22.43%
2006	10393	29.65%
2007	7239	20.65%
2008	Faltan los registros del 2008	
2009	31072	88.67%
2010	27810	79.36%
2011	31228	89.12%

4.1.1 Resultados obtenidos con mediciones realizadas a 10m año 2011

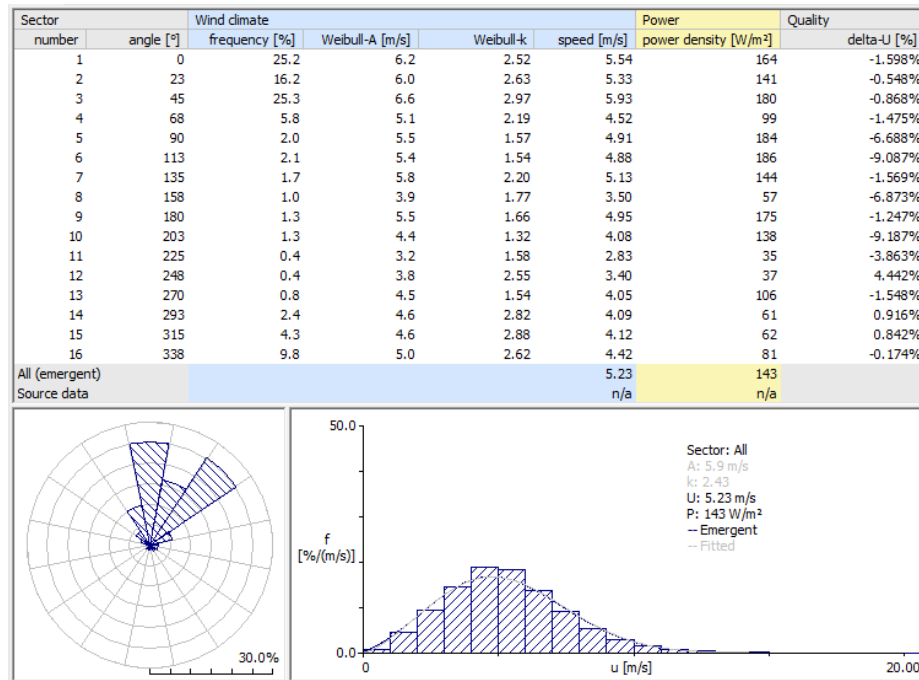
La Figura 13 presenta los resultados obtenidos a una altura de 10m para el año 2011. De acuerdo a la rosa de vientos reportada en la Figura 13(c), los vientos de las direcciones ubicadas en los sectores 1, 2 y 3 presentan la frecuencia más alta. Además, la velocidad y densidad de potencia medias reportadas en la Figura 13(b) son del orden de 5.2 m/s y 141 W/m^2 , respectivamente.



(a)

Estación Isla Clarión 2011 a 10m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	5.29	141.73
Ajuste de Weibull	5.26	143.41
Discrepancia	0.54%	1.18%

(b)

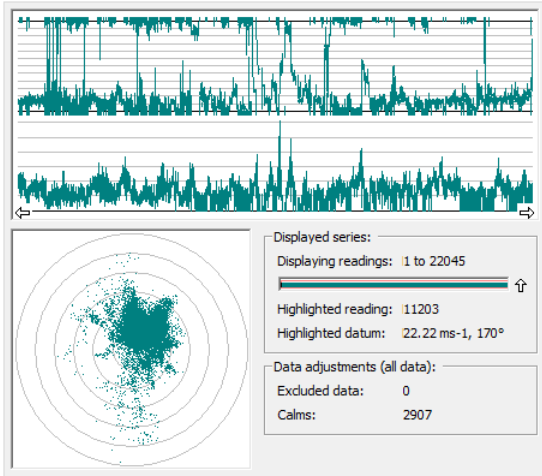


(c)

Figura 13. Resultados para la estación Isla Clarión año 2011 a 10m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

4.1.2 Resultados obtenidos mediante la extrapolación a 80m

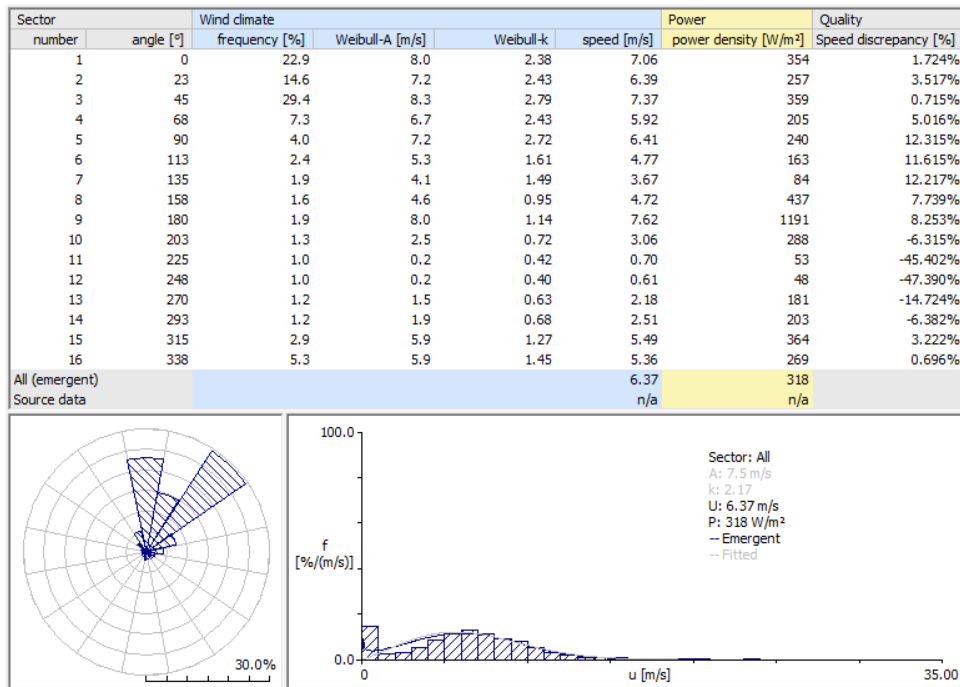
La Figura 14 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2000.



(a)

Estación Isla Clarión 2000 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	6.16	317.34
Ajuste de Weibull	6.65	318.31
Discrepancia	8.00%	0.31%

(b)



(c)

Figura 14. Resultados para la estación Isla Clarión año 2000 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

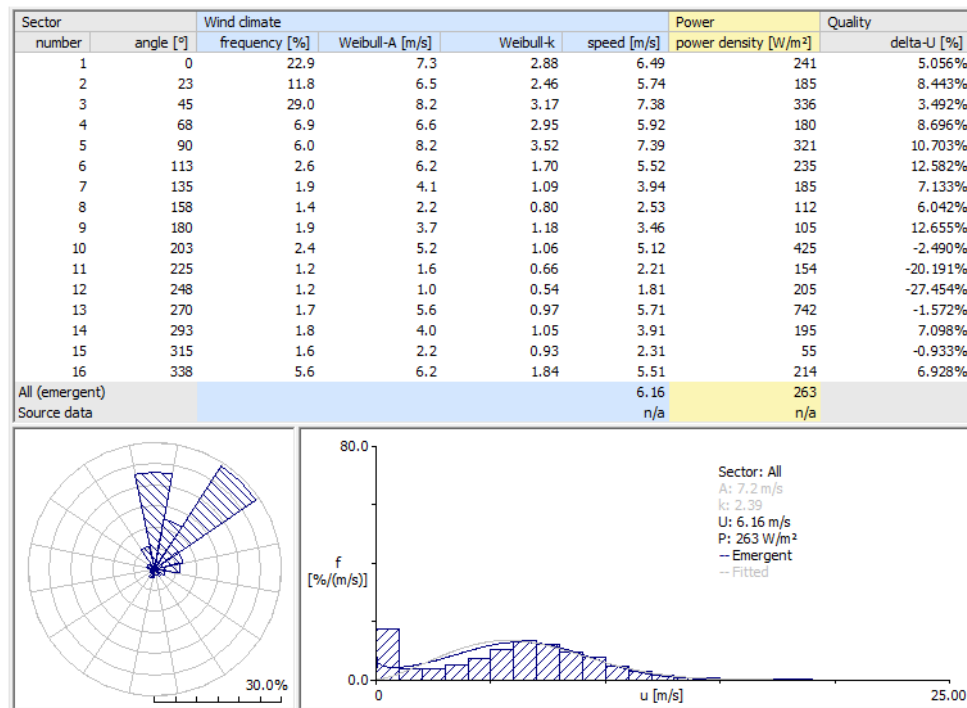
La Figura 15 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2001.



(a)

Estación Isla Clarión 2001 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	5.79	262.26
Ajuste de Weibull	6.4	262.72
Discrepancia	10.61%	0.17%

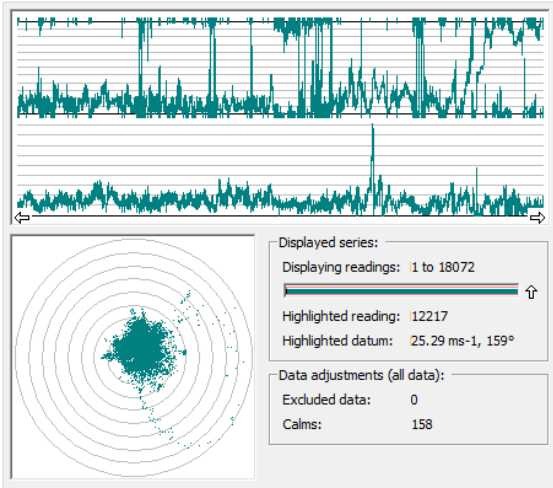
(b)



(c)

Figura 15. Resultados para la estación Isla Clarión año 2001 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

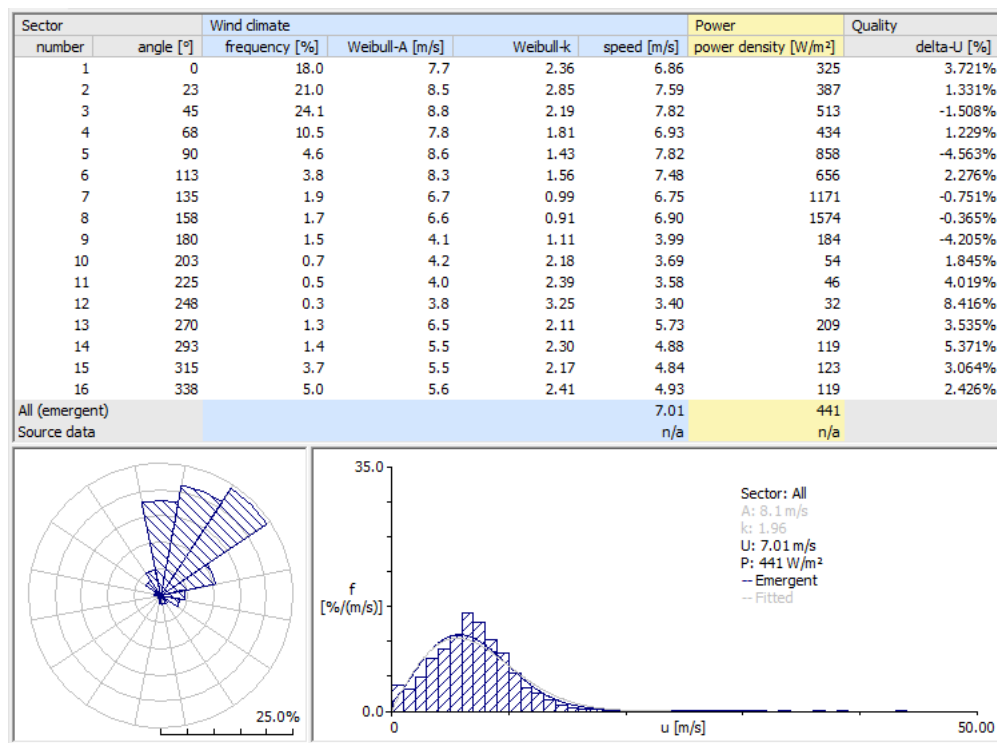
La Figura 16 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2002.



(a)

Estación Isla Clarión 2002 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	6.96	440.19
Ajuste de Weibull	7.17	440.81
Discrepancia	2.99%	0.14%

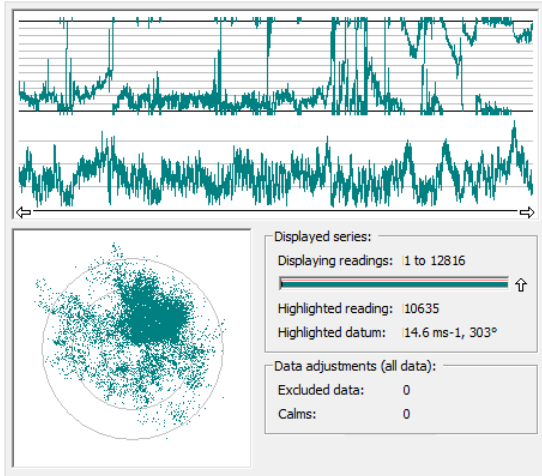
(b)



(c)

Figura 16. Resultados para la estación Isla Clarión año 2002 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

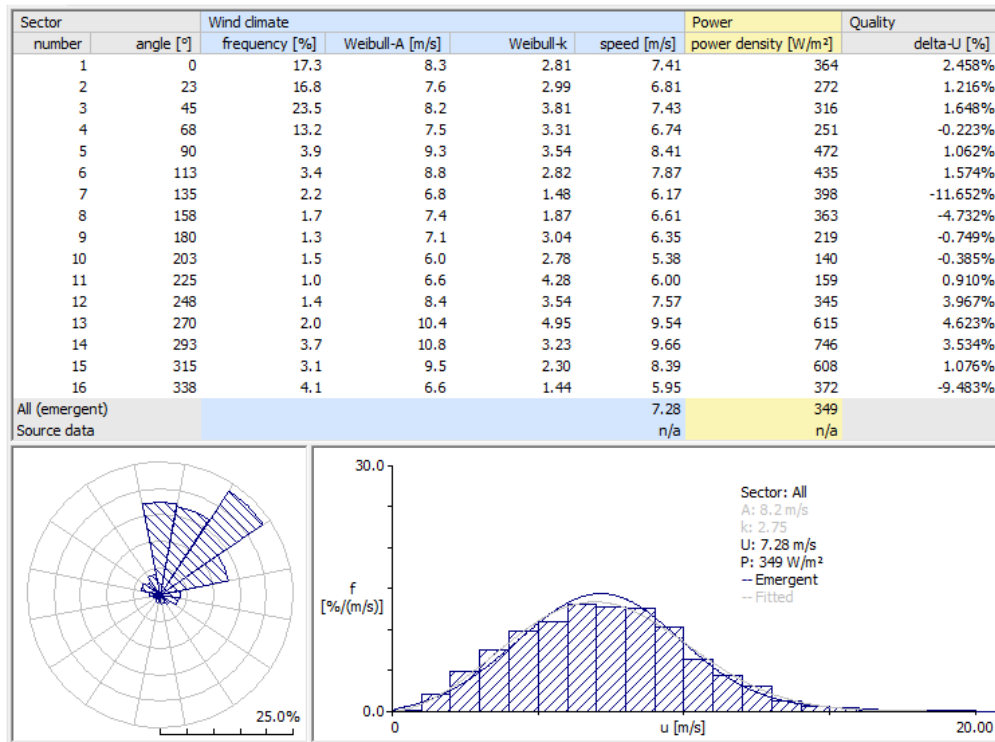
La Figura 17 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2003.



(a)

Estación Isla Clarión 2003 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	7.22	347.89
Ajuste de Weibull	7.28	349.52
Discrepancia	0.78%	0.47%

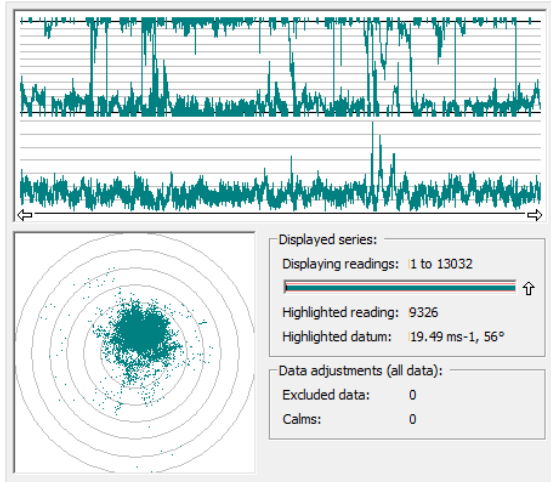
(b)



(c)

Figura 17. Resultados para la estación Isla Clarión año 2003 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

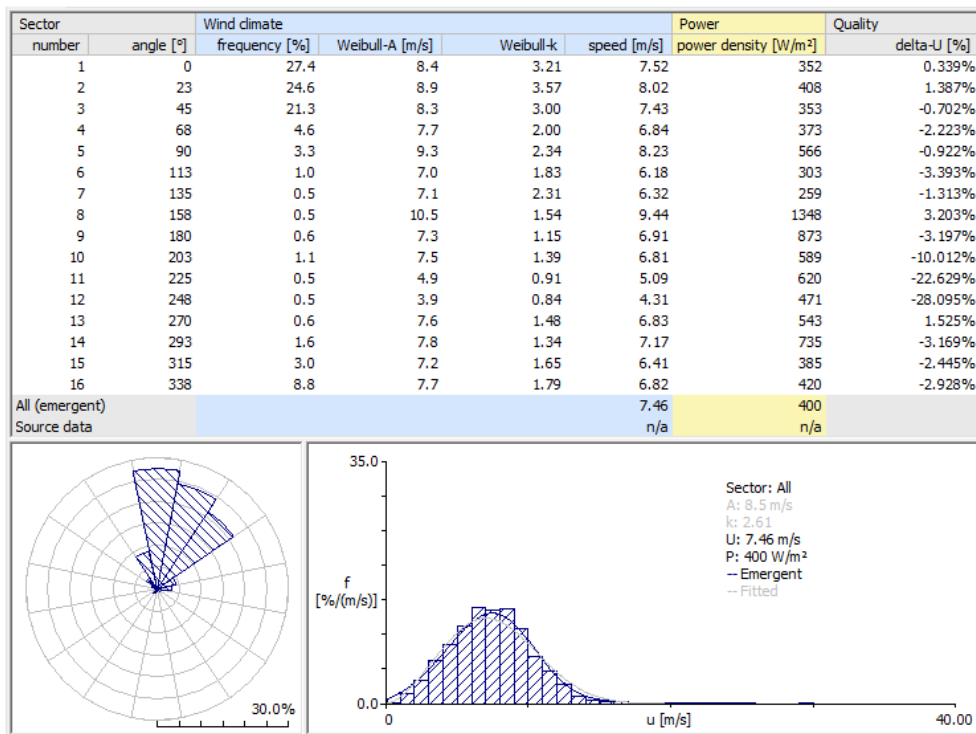
La Figura 18 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2004.



(a)

Estación Isla Clarión 2004 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	7.5	399.53
Ajuste de Weibull	7.53	400.57
Discrepancia	0.38%	0.30%

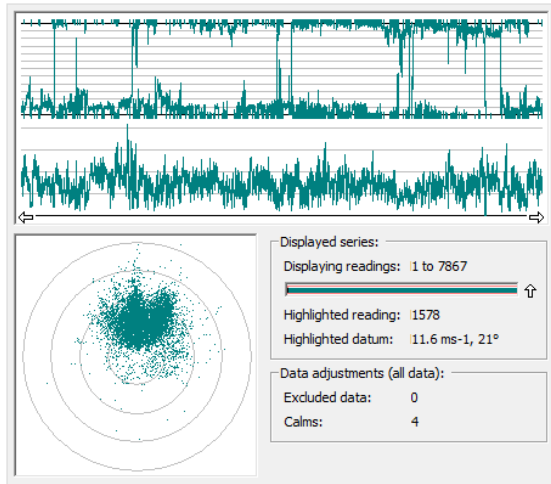
(b)



(c)

Figura 18. Resultados para la estación Isla Clarión año 2004 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

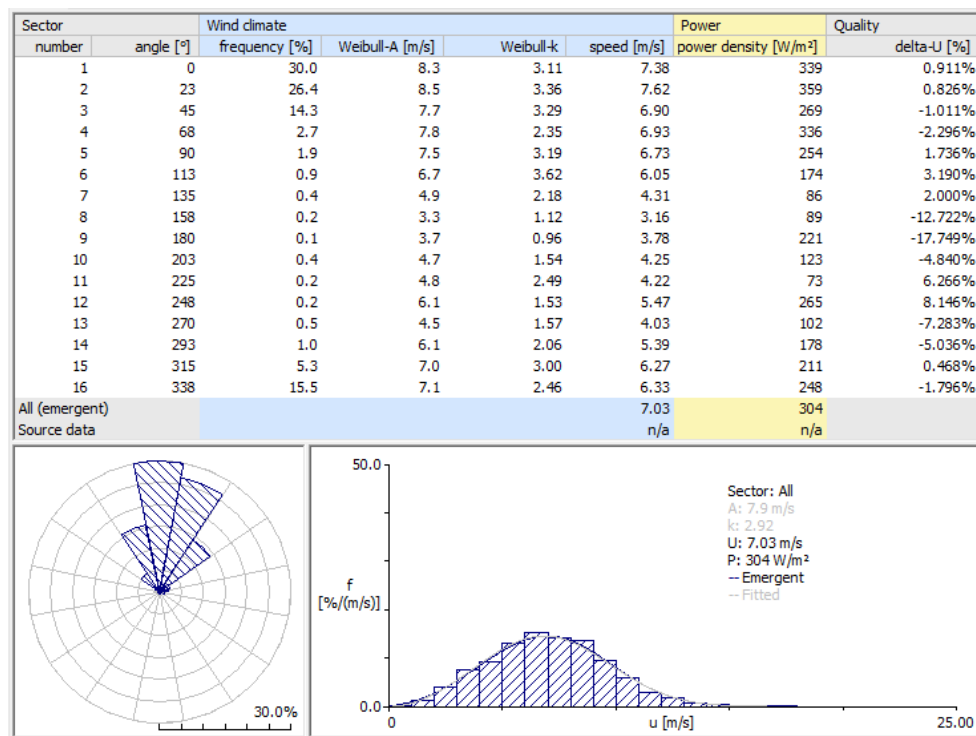
La Figura 19 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2005.



(a)

Estación Isla Clarión 2005 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	7.02	303.02
Ajuste de Weibull	7.04	304.36
Discrepancia	0.22%	0.44%

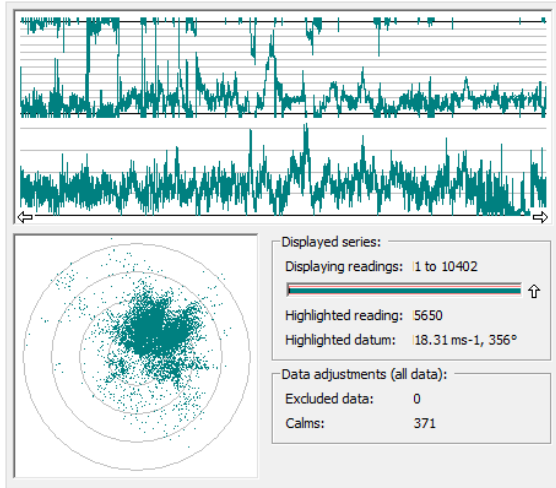
(b)



(c)

Figura 19. Resultados para la estación Isla Clarión año 2005 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

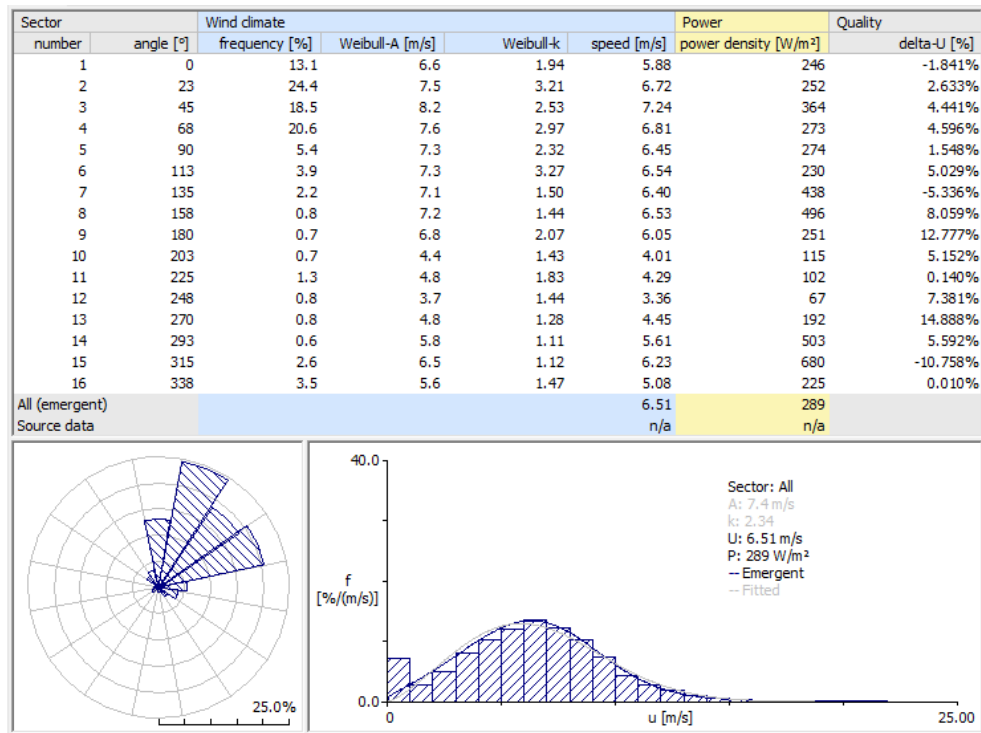
La Figura 20 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2006.



(a)

Estación Isla Clarión 2006 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	6.34	287.61
Ajuste de Weibull	6.58	289.33
Discrepancia	3.79%	0.60%

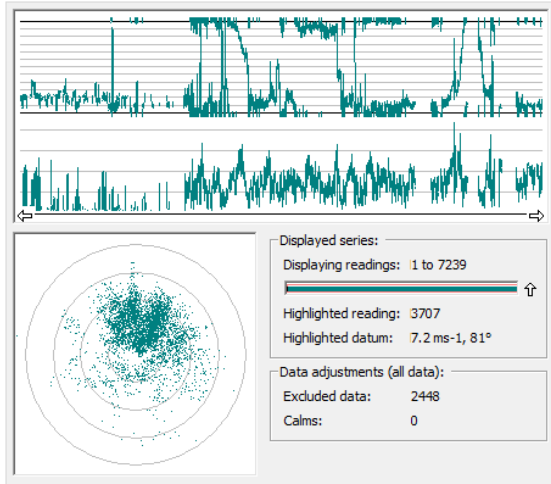
(b)



(c)

Figura 20. Resultados para la estación Isla Clarión año 2006 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

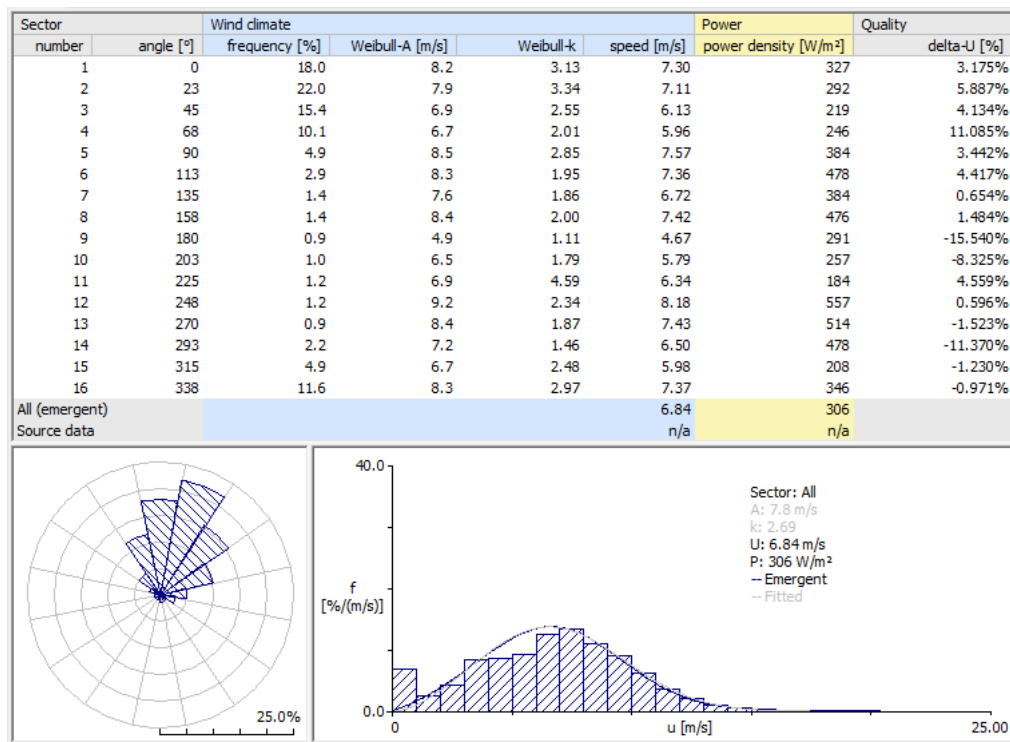
La Figura 21 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2007.



(a)

Estación Isla Clarión 2007 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	6.64	305.63
Ajuste de Weibull	6.93	306.22
Discrepancia	4.39%	0.19%

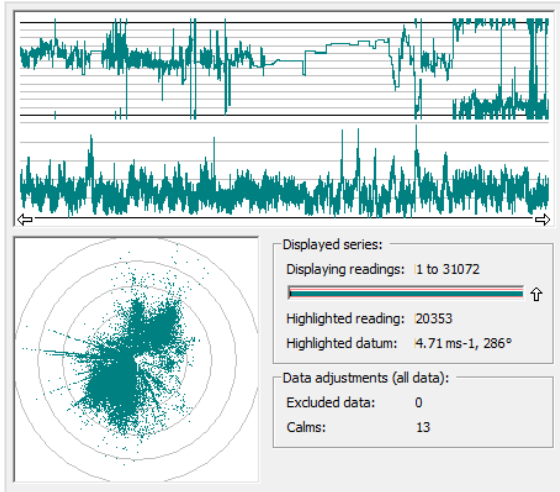
(b)



(c)

Figura 21. Resultados para la estación Isla Clarión año 2007 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

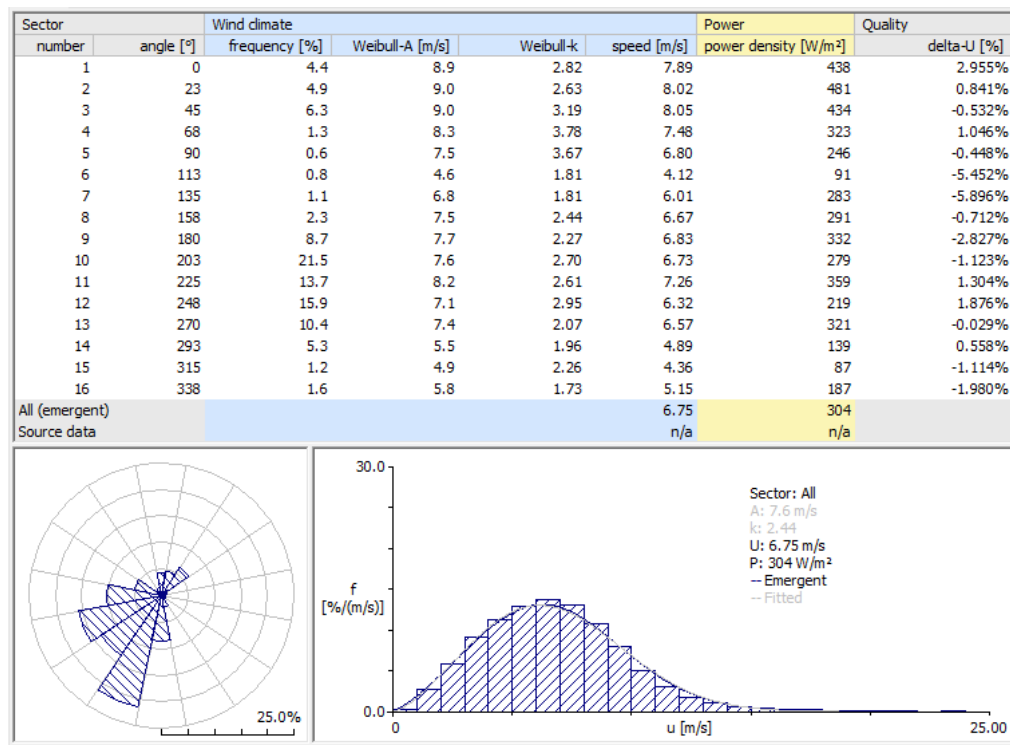
La Figura 22 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2009.



(a)

Estación Isla Clarión 2009 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	6.76	303.78
Ajuste de Weibull	6.77	304.23
Discrepancia	0.05%	0.15%

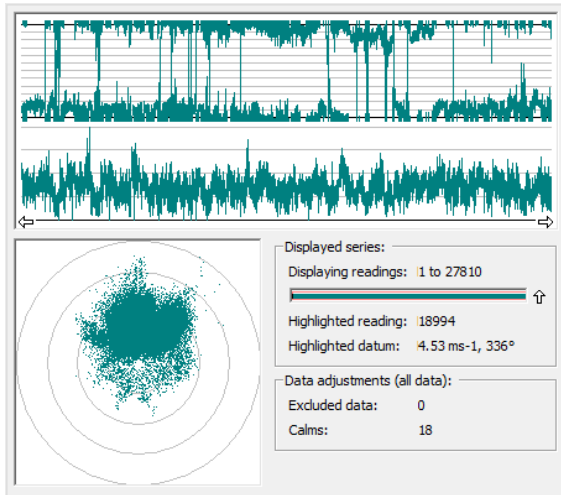
(b)



(c)

Figura 22. Resultados para la estación Isla Clarión año 2009 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

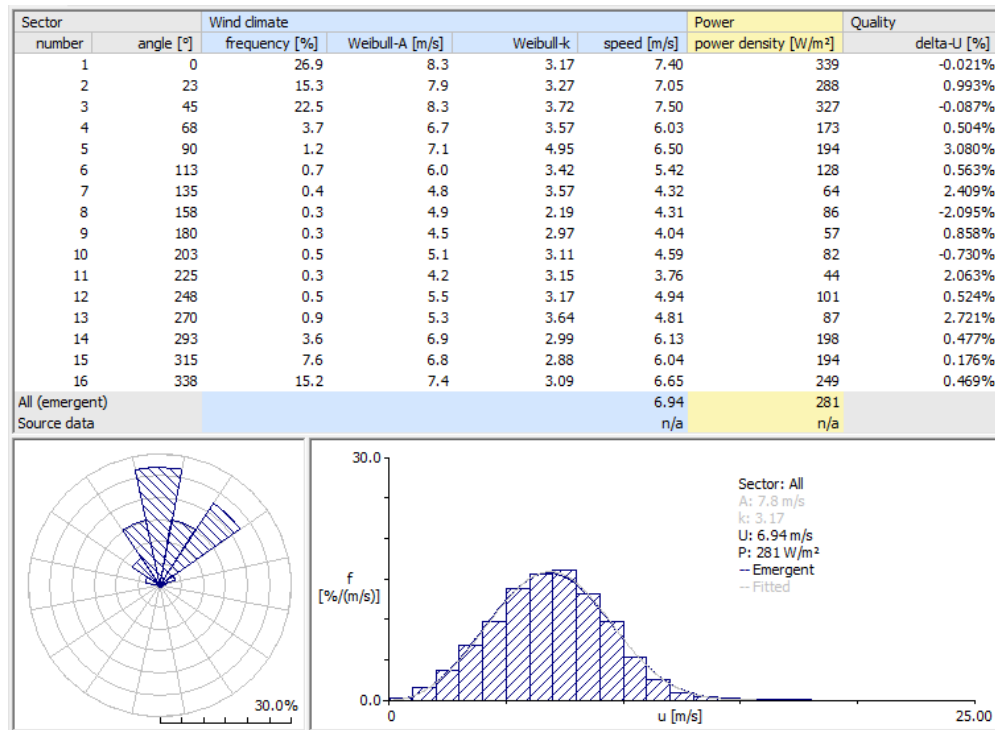
La Figura 23 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2010.



(a)

Estación Isla Clarión 2010 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	6.92	280.45
Ajuste de Weibull	6.96	281.01
Discrepancia	0.50%	0.20%

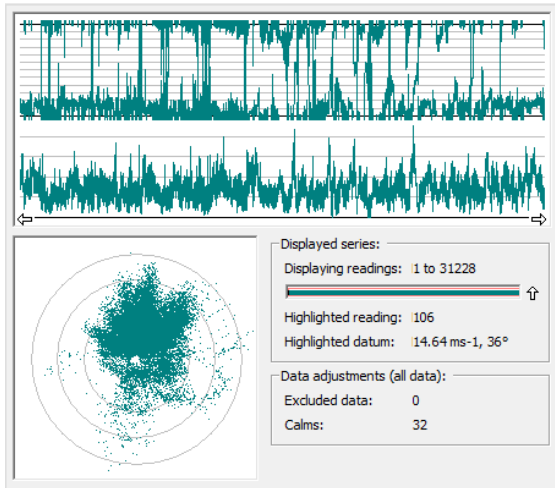
(b)



(c)

Figura 23. Resultados para la estación Isla Clarión año 2010 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

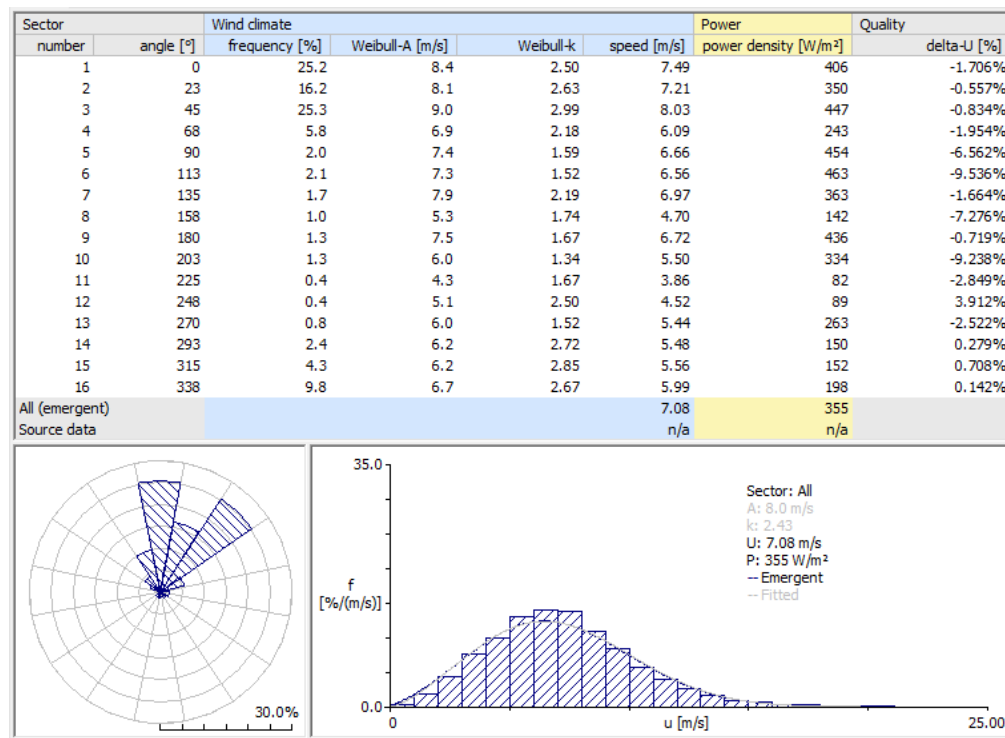
La Figura 24 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2011.



(a)

Estación Isla Clarión 2011 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	7.18	354.93
Ajuste de Weibull	7.12	355.47
Discrepancia	0.88%	0.15%

(b)



(c)

Figura 24. Resultados para la estación Isla Clarión año 2011 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.



Figura 25. Vista aérea del sitio de la estación Isla Clarión.

La Figura 25 muestra la vista aérea del sitio de ubicación de la estación Isla Clarión. Se puede apreciar que la ubicación de la estación, según las coordenadas que se pueden consultar en la página de la Secretaria de Marina se encuentra localizada con la letra A. De acuerdo a la herramienta Google-Maps este punto está localizado cercano a la playa de la Isla Clarión pero dentro del mar.

Los resultados extrapolados reportados en las Figuras 14 a 24 muestran de forma consistente la presencia de un recurso eólico relevante en los sectores 1, 2, 3 y 16 de las rosas de vientos. Cabe resaltar que la rosa de vientos de la Figura 22 indica que los vientos se ubican en los sectores 10, 11, 12 y 13. Este cambio en este año se debe a que el sensor de dirección se mantuvo constante durante un intervalo considerable del año. Sin embargo, la velocidad se registró de manera adecuada de tal manera que se calculó el potencial eólico incluyendo estas muestras. Los valores medios de velocidad y densidad de potencia para los últimos 3 años se encuentran por arriba de los $7m/s$ y $340 W/m^2$, respectivamente.

4.2 Estación Lázaro Cárdenas

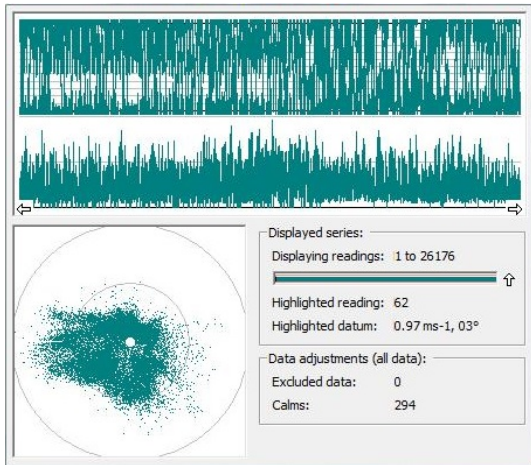
La Tabla 8 presenta los porcentajes de datos anuales disponibles para la estación ubicada en Lázaro Cárdenas. En la tabla se puede apreciar que no existen registros para el año 2008. Además el porcentaje de datos disponible es menor al 45% para los años 2004 a 2007, mientras que para los años 2009 a 2011 es superior al 53%. A continuación se presentan los resultados obtenidos con el programa WAsP usando los datos medidos en la estación de Lázaro Cárdenas a una altura de 10m y con datos extrapolados a 80m.

Tabla 8. Porcentaje de datos útiles en los estudios de la estación Lázaro Cárdenas

Estación Lázaro Cárdenas		
Año	Número de datos por año	Porcentaje por año
2004	8791	25.08%
2005	14297	40.80%
2006	15660	44.69%
2007	12369	35.29%
2008	Faltan los registros del 2008	
2009	18660	53.25%
2010	30786	87.85%
2011	26176	74.7%

4.2.1 Resultados obtenidos con mediciones realizadas a 10m año 2011

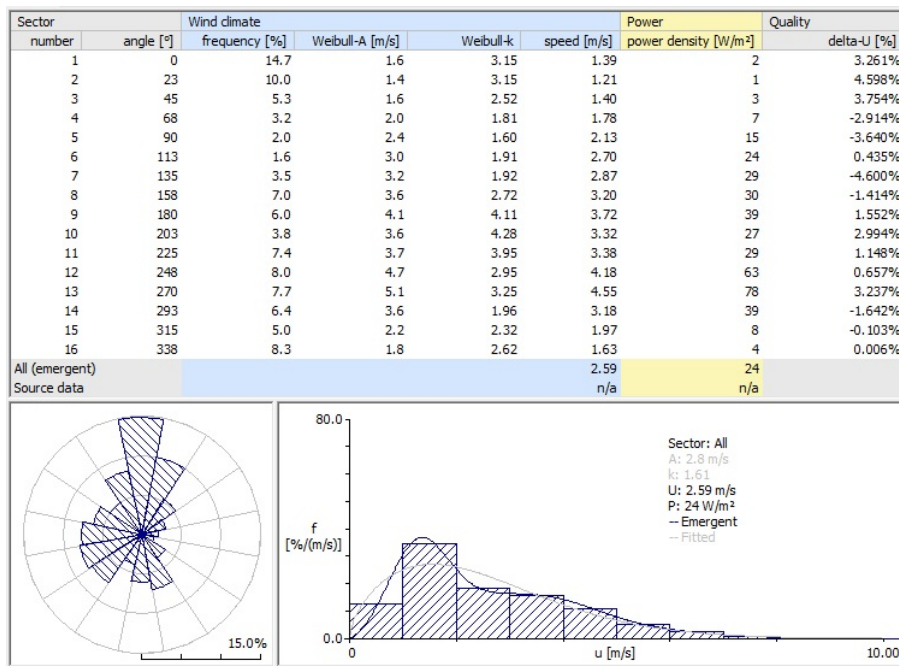
La Figura 26 presenta los resultados obtenidos a una altura de 10m para el año 2011. La Figura 26(a) presenta las mediciones correspondientes a la velocidad y dirección de viento en el tiempo, la Figura 26(b) presenta los valores medios de velocidad de viento y densidad de potencia en el orden de 2.5m/s y 24W/m^2 , respectivamente. Finalmente en la Figura 26(c) se puede apreciar en el cuadro de resumen y la rosa de vientos que la frecuencia de los vientos dominantes se encuentra en los sectores 1 y 2.



(a)

Estación Lázaro Cárdenas 2011 a 10m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	2.55	23.87
Ajuste de Weibull	2.53	24.42
Discrepancia	0.84%	2.27%

(b)

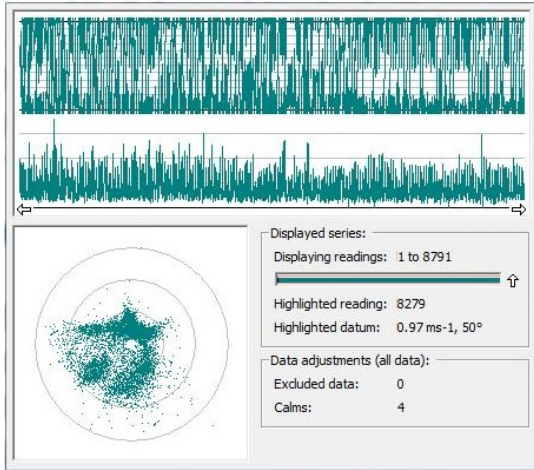


(c)

Figura 26. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2011 a 10m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

4.2.2 Resultados obtenidos mediante la extrapolación a 80m

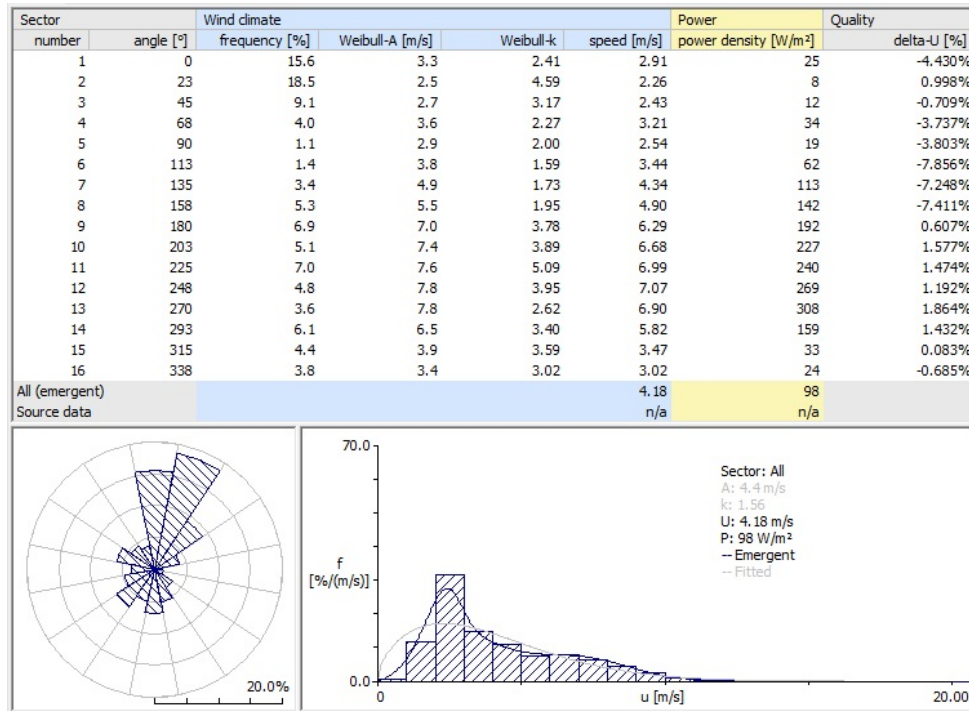
La Figura 27 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2004.



(a)

Estación Lázaro Cárdenas 2004 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	4.2	97.41
Ajuste de Weibull	3.49	97.95
Discrepancia	5.71%	0.55%

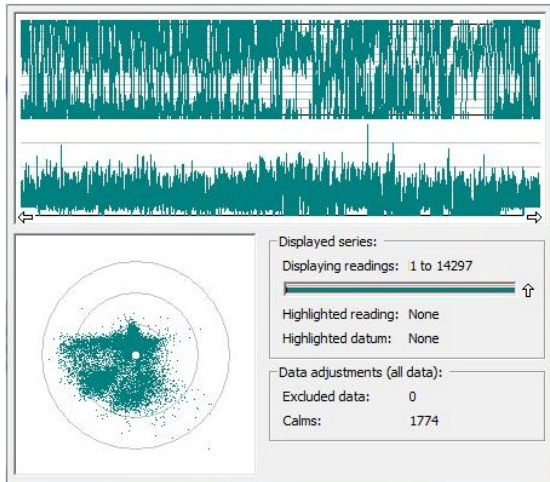
(b)



(c)

Figura 27. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2004 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

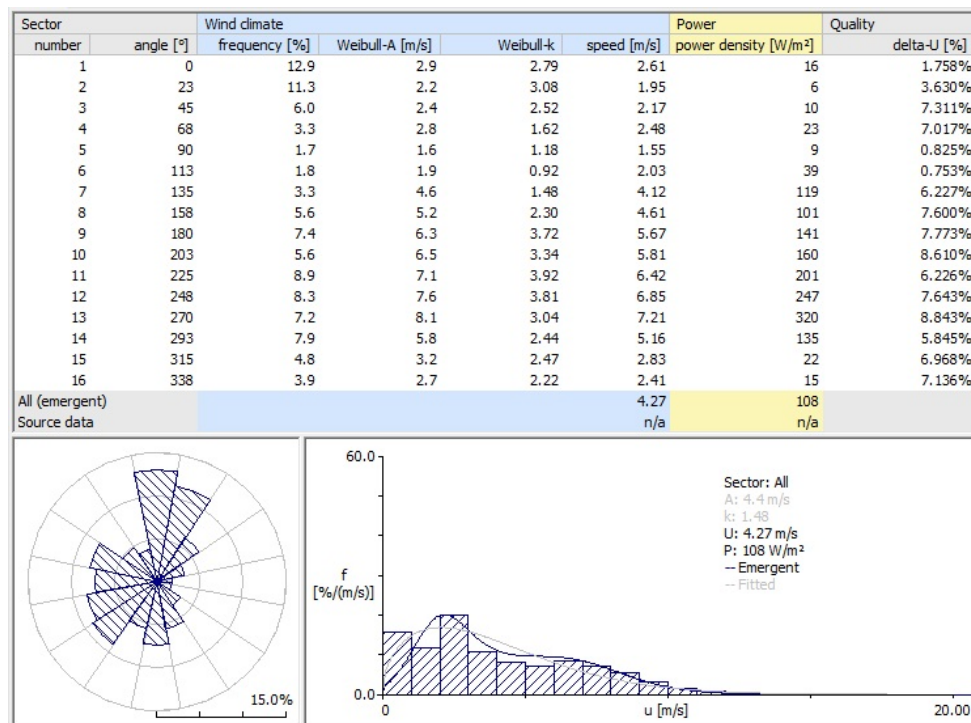
La Figura 28 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2005.



(a)

Estación Lázaro Cárdenas 2005 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	3.95	107.54
Ajuste de Weibull	3.98	107.74
Discrepancia	0.85%	0.18%

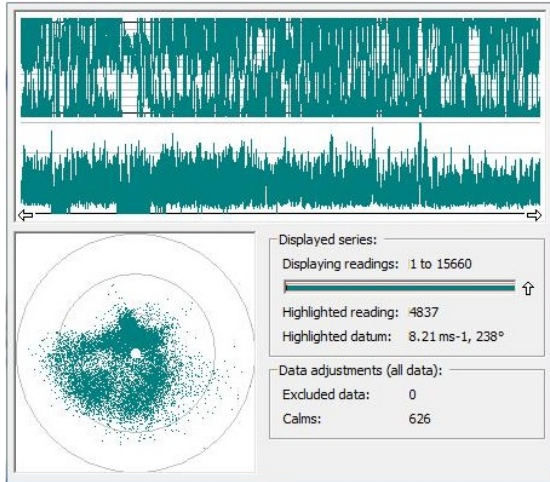
(b)



(c)

Figura 28. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2005 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

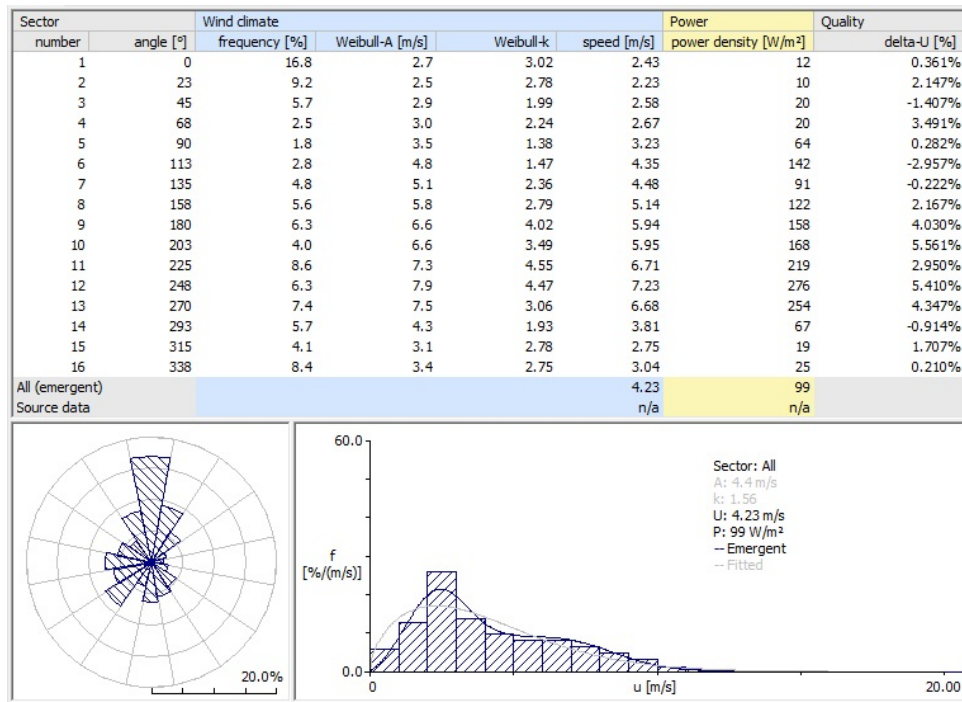
La Figura 29 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2006.



(a)

Estación Lázaro Cárdenas 2006 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	4.11	98.59
Ajuste de Weibull	3.98	99.19
Discrepancia	3.25%	0.61%

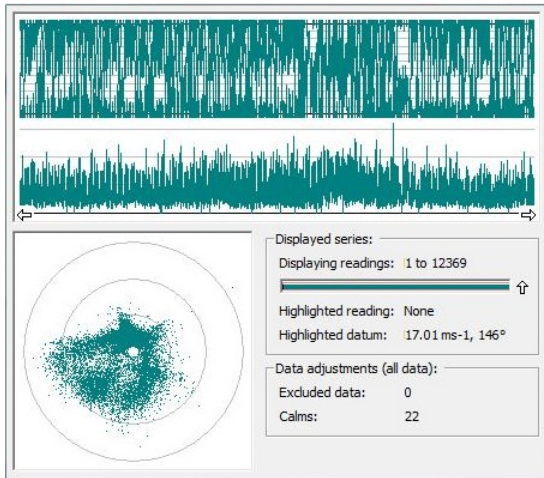
(b)



(c)

Figura 29. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2006 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

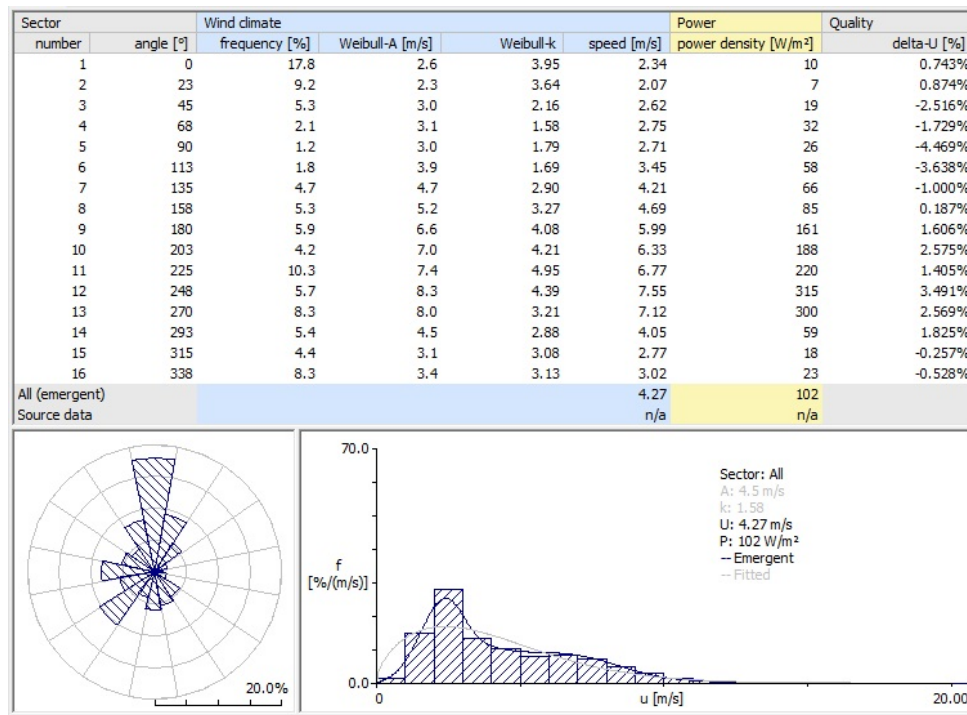
La Figura 30 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2007.



(a)

Estación Lázaro Cárdenas 2007 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	4.22	100.91
Ajuste de Weibull	4.04	101.75
Discrepancia	4.40%	0.84%

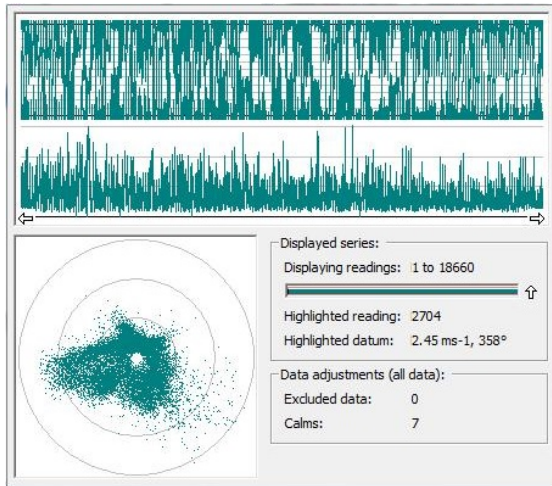
(b)



(c)

Figura 30. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2007 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

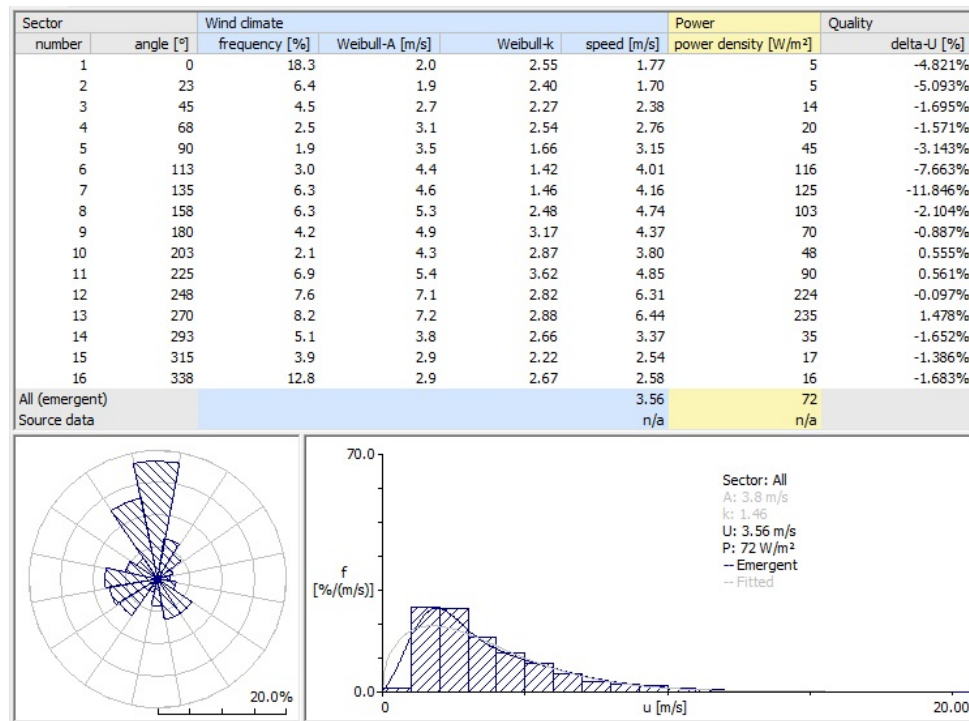
La Figura 31 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2009.



(a)

Estación Lázaro Cárdenas 2009 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	3.65	71.46
Ajuste de Weibull	3.47	72.17
Discrepancia	5.09%	0.99%

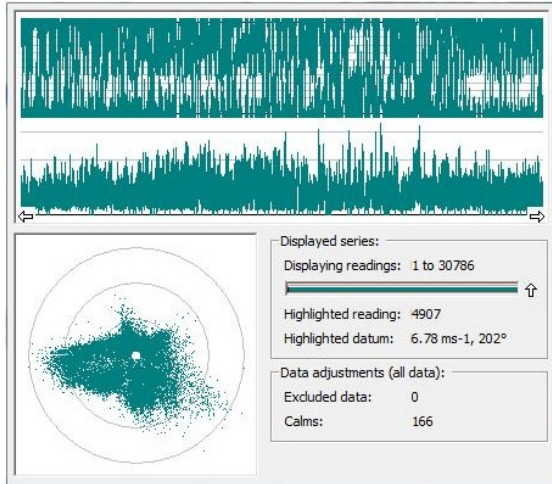
(b)



(c)

Figura 31. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2009 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

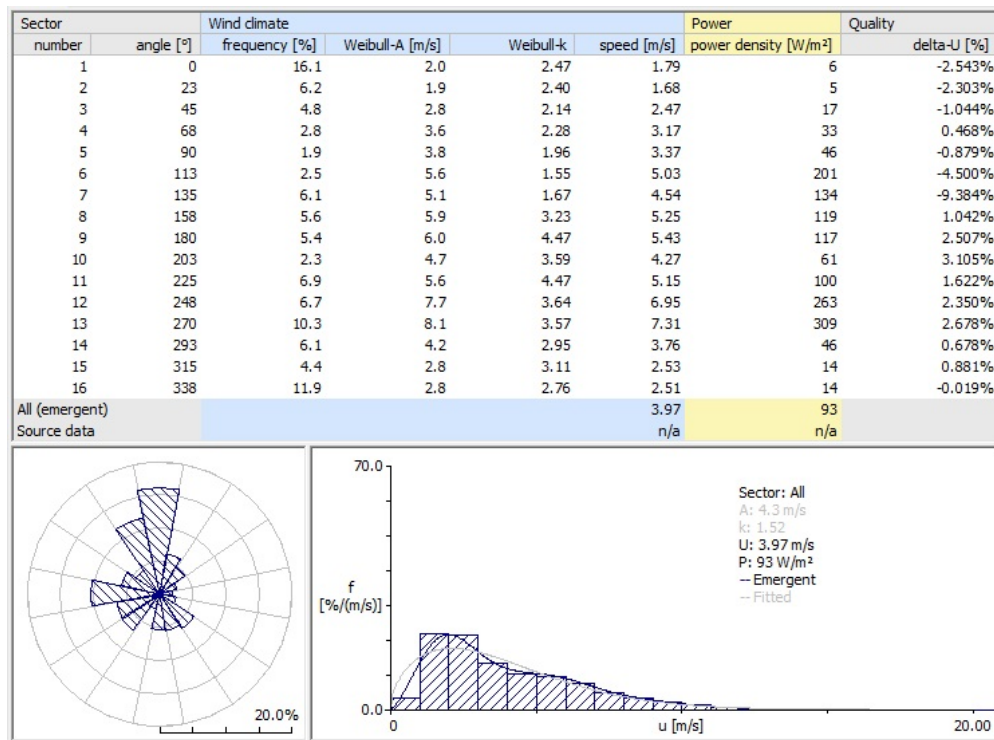
La Figura 32 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2010.



(a)

Estación Lázaro Cárdenas 2010 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	3.98	93.09
Ajuste de Weibull	3.84	93.06
Discrepancia	3.40%	0.03%

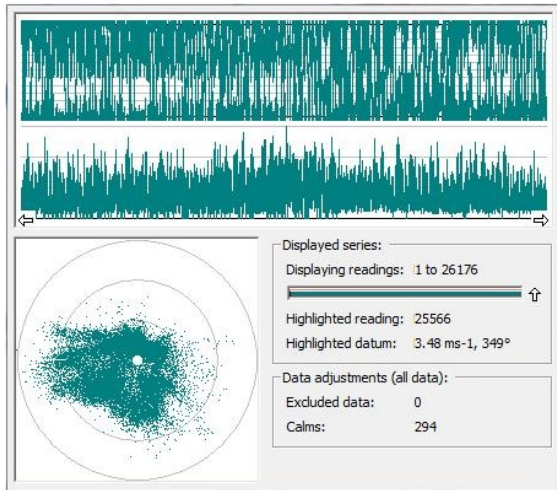
(b)



(c)

Figura 32. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2010 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

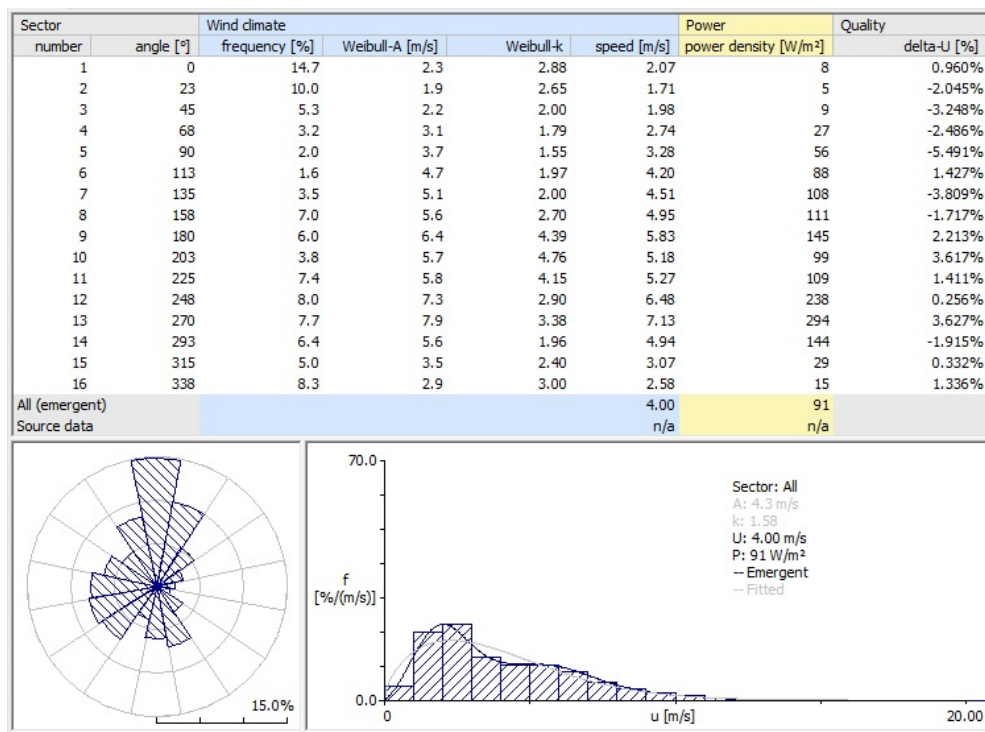
La Figura 33 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2011.



(a)

Estación Lázaro Cárdenas 2011 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	3.99	91.28
Ajuste de Weibull	3.9	91.22
Discrepancia	2.43%	0.07%

(b)



(c)

Figura 33. Resultados para la estación Lázaro Cárdenas año 2011 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.



Figura 34. Vista aérea del sitio de ubicación de la estación Lázaro Cárdenas.

En la Figura 34 se presenta la vista aérea de la ubicación de la estación de Lázaro Cárdenas. Los resultados extrapolados presentados en las Figuras 27 a la 33 muestran los valores medios de velocidad de viento y densidad de potencia, los cuales son del orden de $3.9m/s$ y $91W/m^2$, respectivamente. Además, de acuerdo a las rosas de vientos, los vientos que se presentan con mayor frecuencia se ubican en los sectores 1, 2 y 16.

4.3 Estación Puerto Vicente

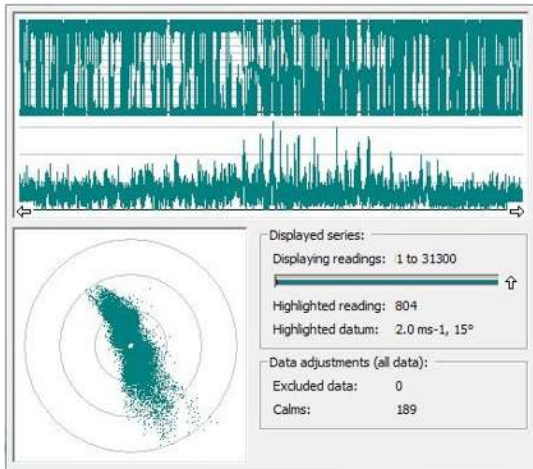
La Tabla 9 presenta los porcentajes de datos disponibles para la evaluación del recurso eólico en la estación Puerto Vicente. Se puede apreciar que del año 2000 al 2009 se cuentan con porcentajes menores a 65% y en los años 2010 y 2011 se cuenta con porcentajes mayores a 85%. Además en un intervalo de tiempo de los años 2003 y 2004 el sensor de dirección registró un valor continuo en una sola dirección y esto se ve reflejado en la rosa de viento de dichos años. Sin embargo, la velocidad se registró de manera correcta de tal manera que se puede estimar el potencial eólico para estos años. Por su parte, los años 2006 y 2008 presenta un incremento importante de calmas con un total de 2750 y 5585, respectivamente, mientras que el resto de los años presentan entre 8 y 984 calmas. Por lo tanto, se excluyeron las calmas en los análisis de los años 2006 y 2008.

Tabla 9. Porcentaje de datos útiles en los estudios de la estación Puerto Vicente.

Estación Puerto Vicente		
Año	Número de datos por año	Porcentaje por año
2000	2601	7.42%
2001	21955	62.65%
2002	15782	45.03%
2003	18217	51.98%
2004	12876	36.74%
2005	14462	41.27%
2006	16900	48.23%
2007	13203	37.67%
2008	18898	53.93%
2009	18321	52.28%
2010	30785	87.85%
2011	31300	89.32%

4.3.1 Resultados obtenidos con mediciones realizadas a 10m año 2011

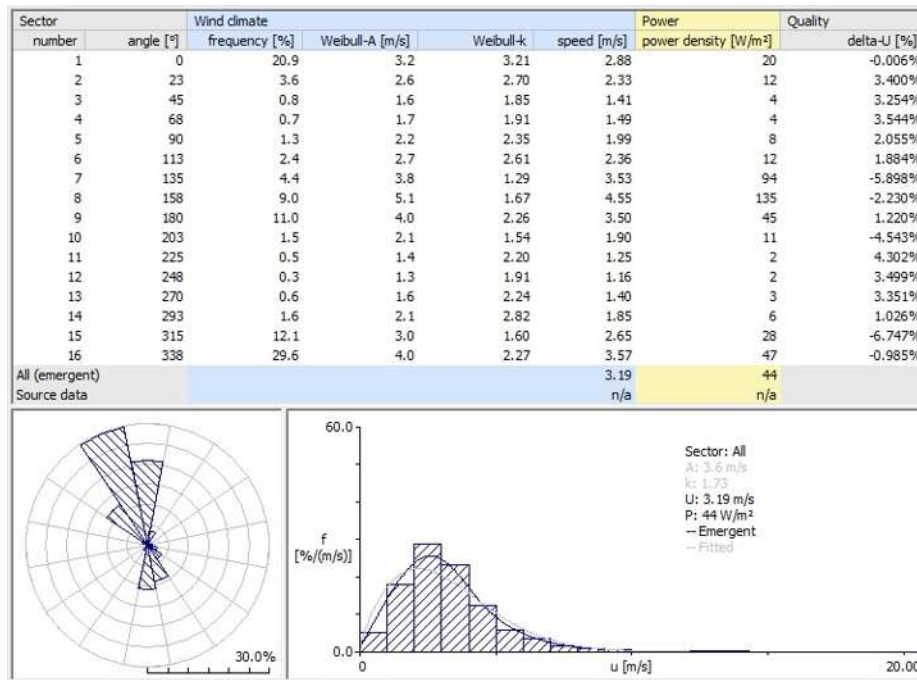
La Figura 35 presenta los resultados obtenidos a una altura de 10m para el año 2011. Se observa en la Figura 35(a) la grafica de la dirección y velocidad de viento en el tiempo. Además se puede apreciar de la Figura 35(b) que la velocidad y densidad de potencia media presenta valores del orden de $3.2m/s$ y $43.2W/m^2$, respectivamente. Por su parte, la Figura 35(c) indica que la dirección del viento predominante se ubica en los sectores 1, 9, 15 y 16 de la rosa de vientos.



(a)

Estación Puerto Vicente 2011 a 10m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	3.22	43.22
Ajuste de Weibull	3.17	43.91
Discrepancia	1.54%	1.60%

(b)

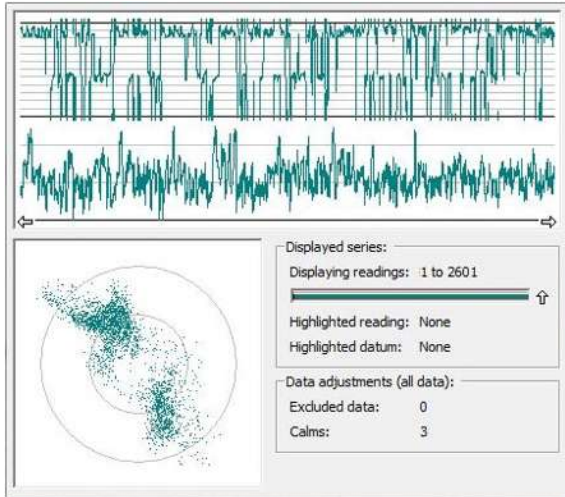


(c)

Figura 35. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2011 a 10m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

4.3.2 Resultados obtenidos mediante la extrapolación a 80m

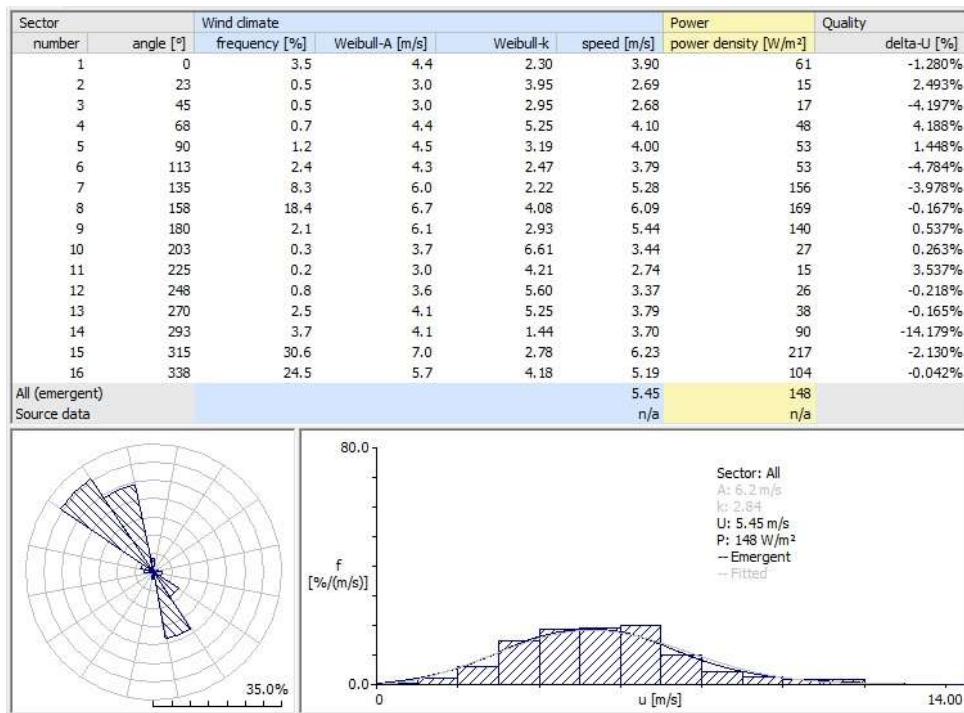
La Figura 36 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2000.



(a)

Estación Puerto Vicente 2000 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	5.56	148.99
Ajuste de Weibull	5.5	148.19
Discrepancia	0.95%	0.54%

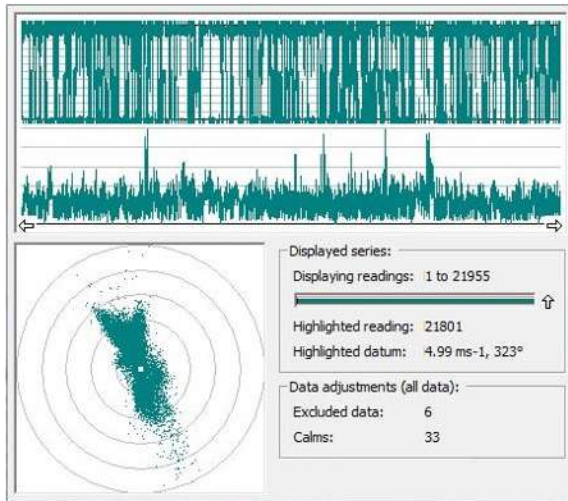
(b)



(c)

Figura 36. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2000 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

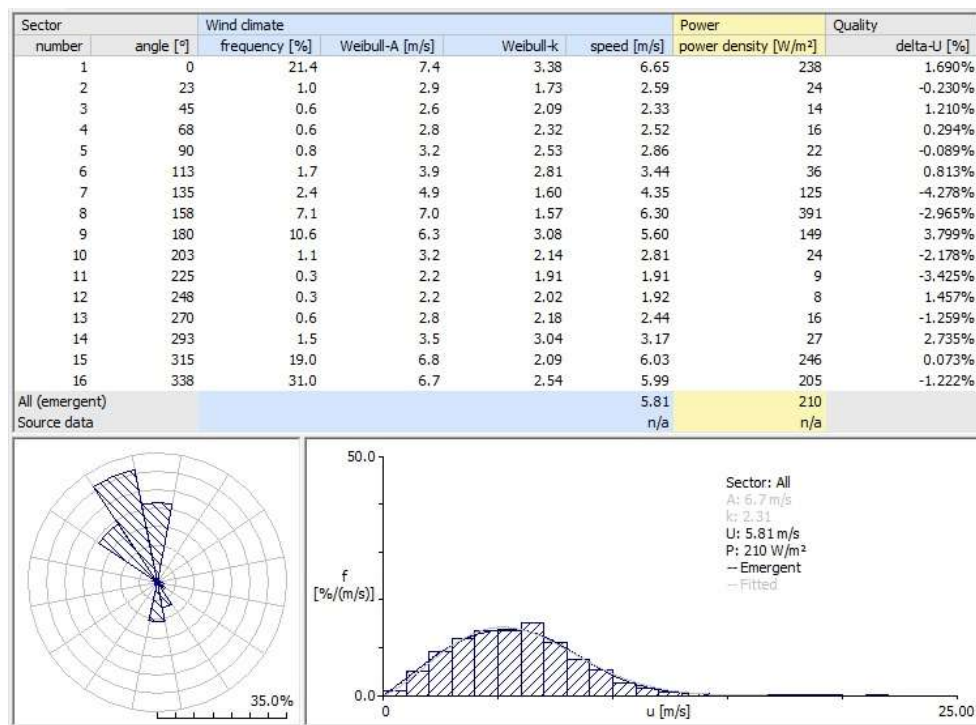
La Figura 37 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2001.



(a)

Estación Puerto Vicente 2001 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	5.82	209.98
Ajuste de Weibull	5.89	210.11
Discrepancia	1.34%	0.06%

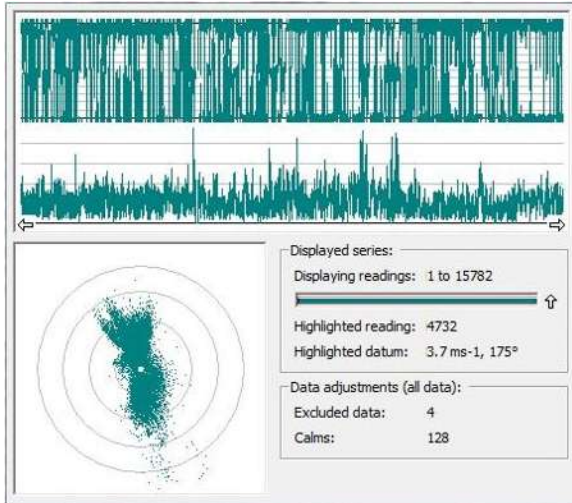
(b)



(c)

Figura 37. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2001 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

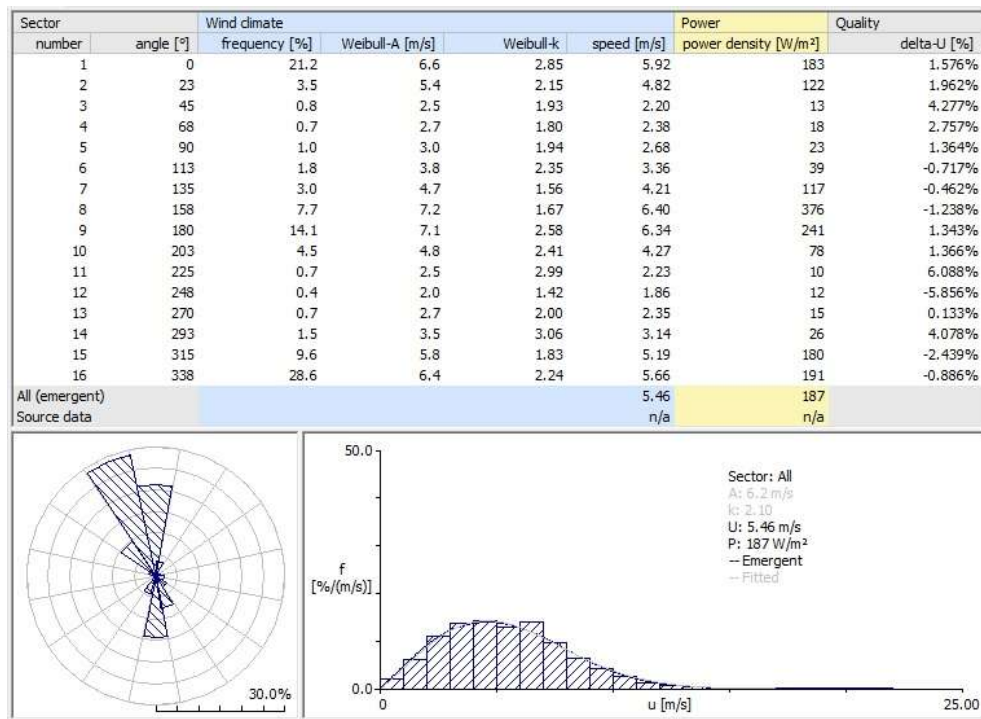
La Figura 38 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2002.



(a)

Estación Puerto Vicente 2002 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	5.42	186.33
Ajuste de Weibull	5.52	187.08
Discrepancia	1.11%	0.40%

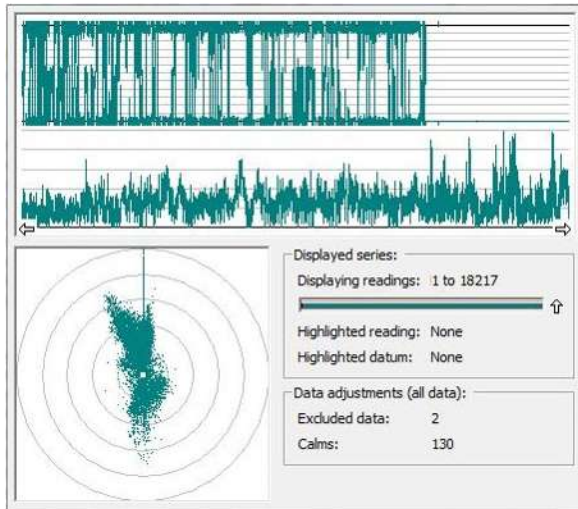
(b)



(c)

Figura 38. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2002 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

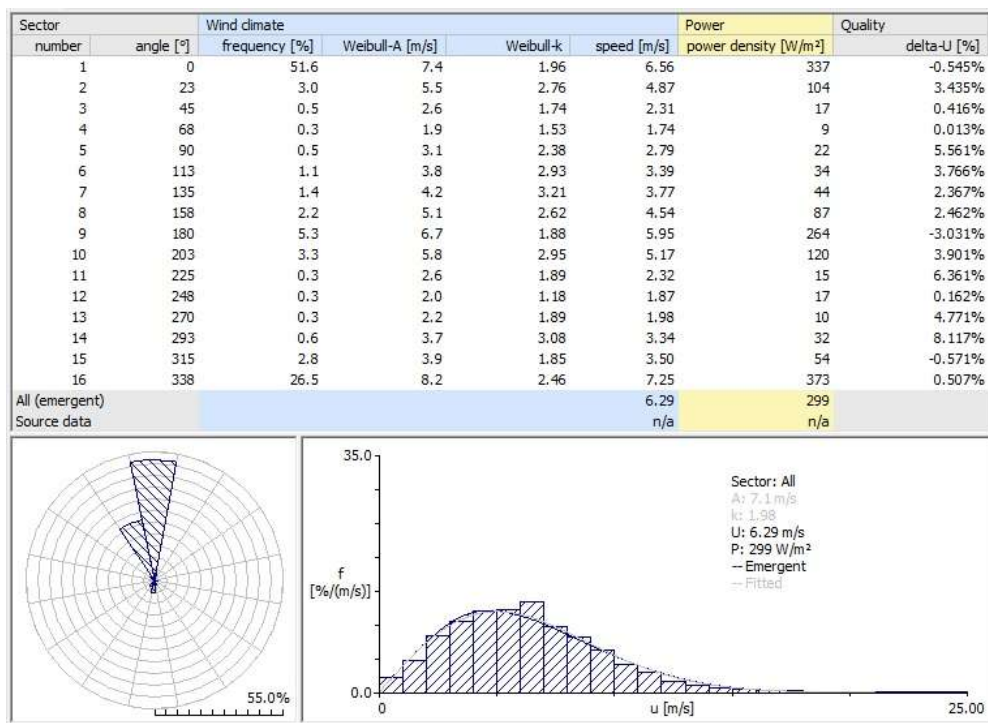
La Figura 39 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2003.



(a)

Estación Puerto Vicente 2003 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	6.3	298.57
Ajuste de Weibull	6.33	298.91
Discrepancia	0.40%	0.11%

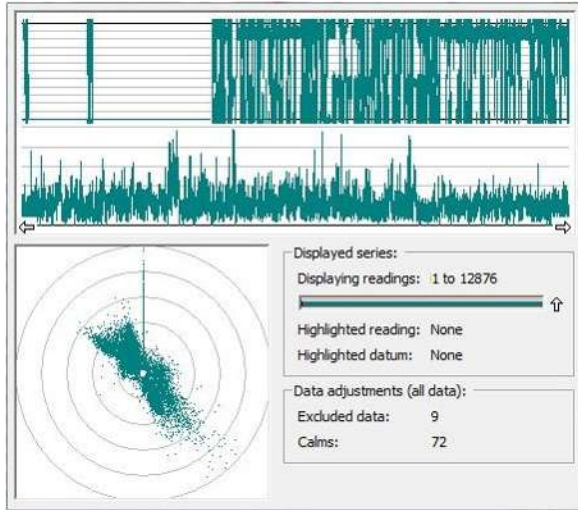
(b)



(c)

Figura 39 Resultados para la estación Puerto Vicente año 2003 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

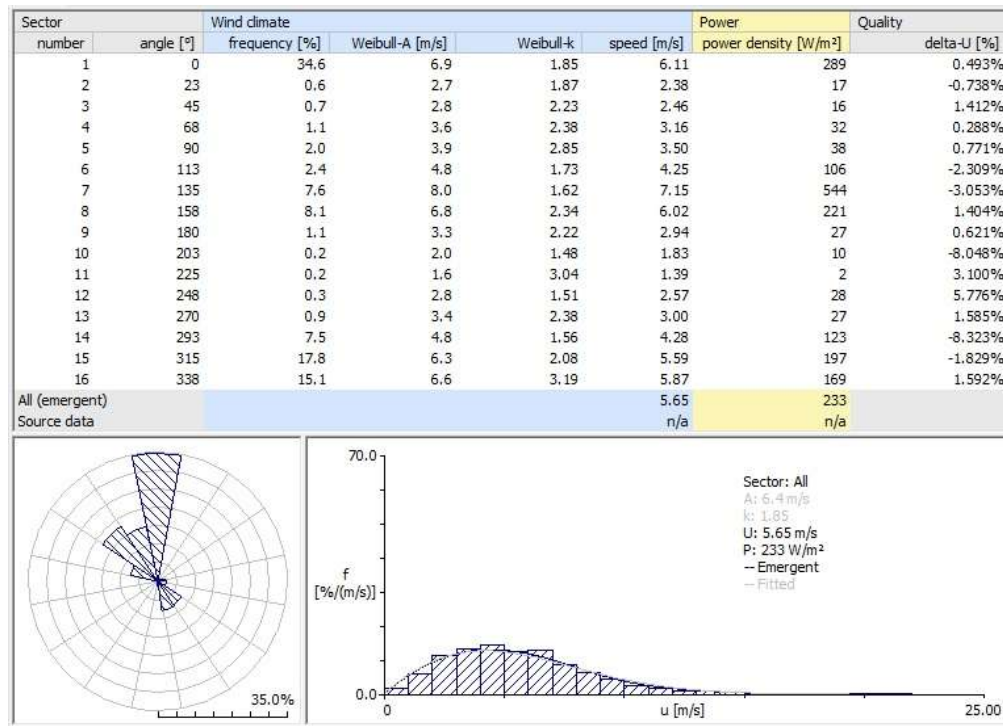
La Figura 40 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2004.



(a)

Estación Puerto Vicente 2004 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	5.68	231.87
Ajuste de Weibull	5.69	233.2
Discrepancia	0.11%	0.57%

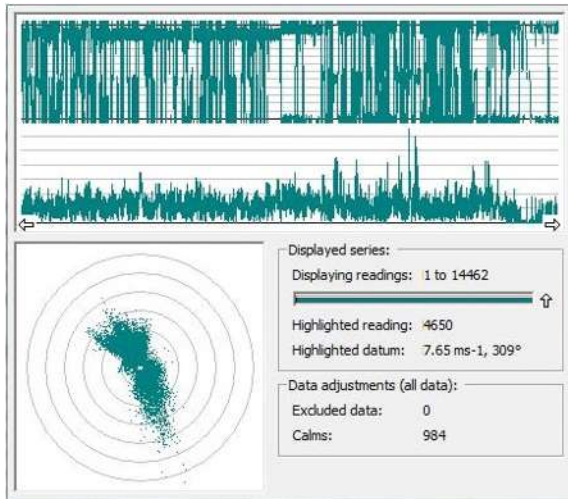
(b)



(c)

Figura 40. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2004 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

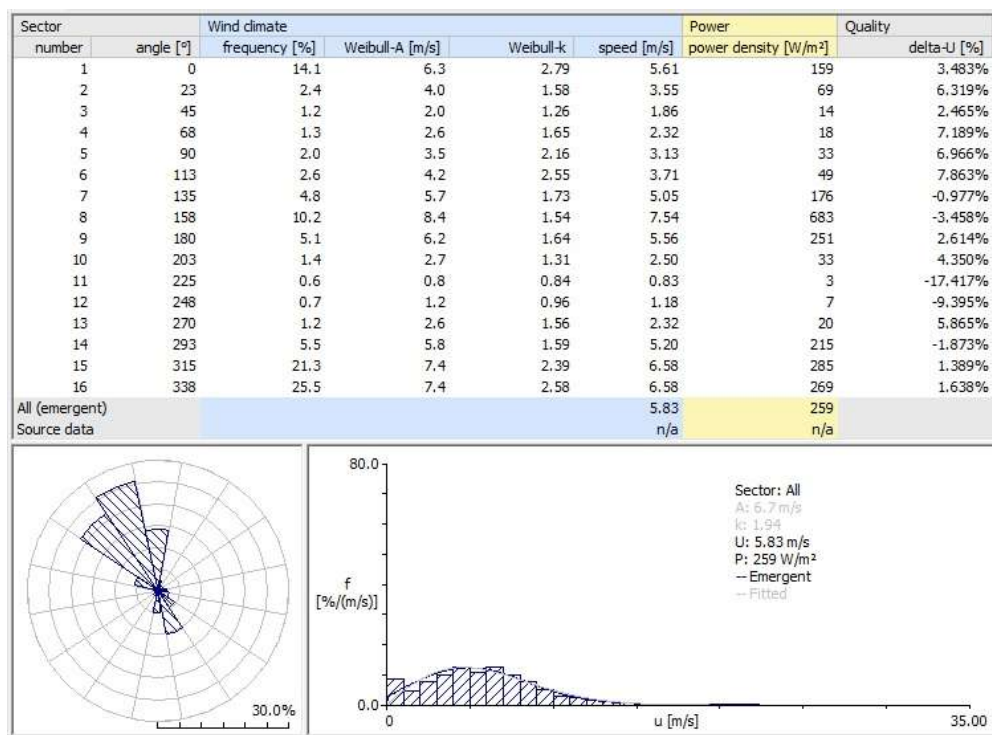
La Figura 41 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2005.



(a)

Estación Puerto Vicente 2005 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	5.74	258.71
Ajuste de Weibull	5.99	259.43
Discrepancia	4.32%	0.28%

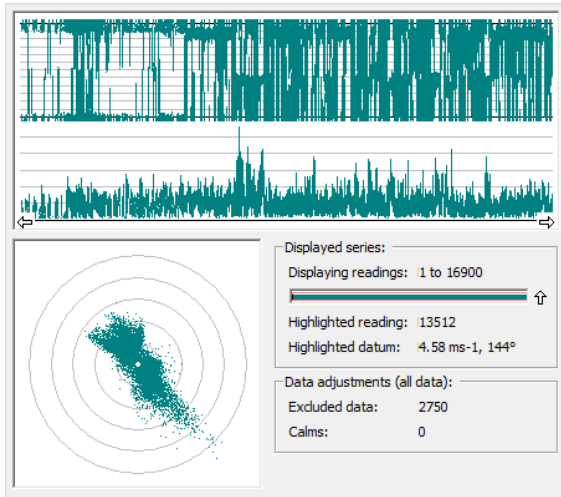
(b)



(c)

Figura 41. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2005 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

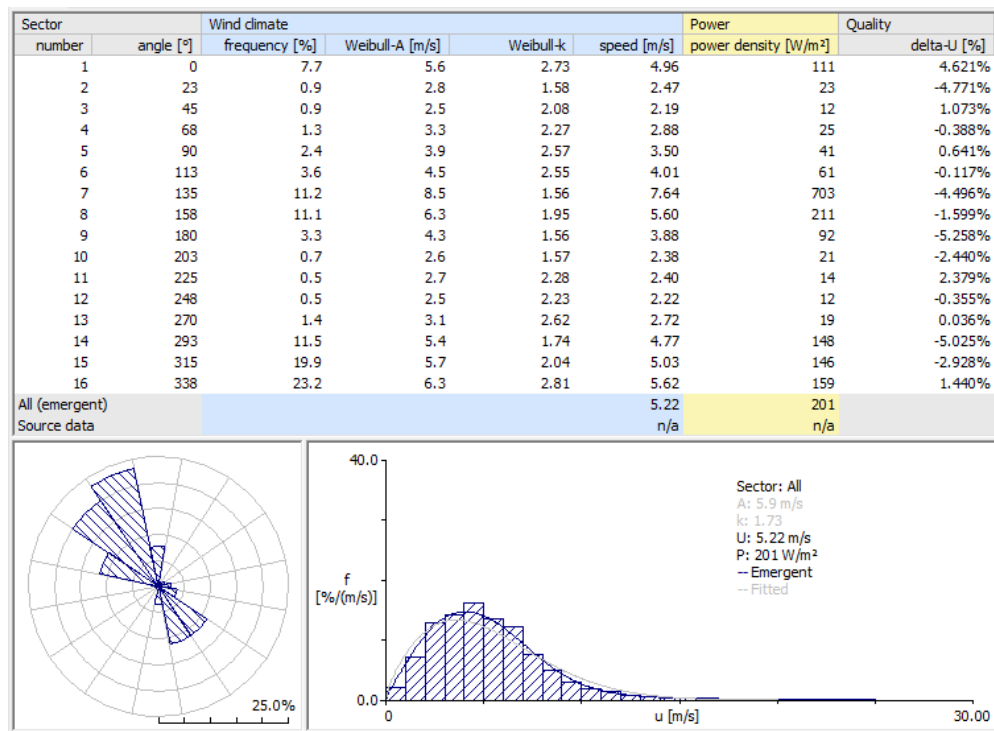
La Figura 42 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2006.



(a)

Estación Puerto Vicente 2006 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	5.31	200.29
Ajuste de Weibull	5.27	200.72
Discrepancia	0.82%	0.21%

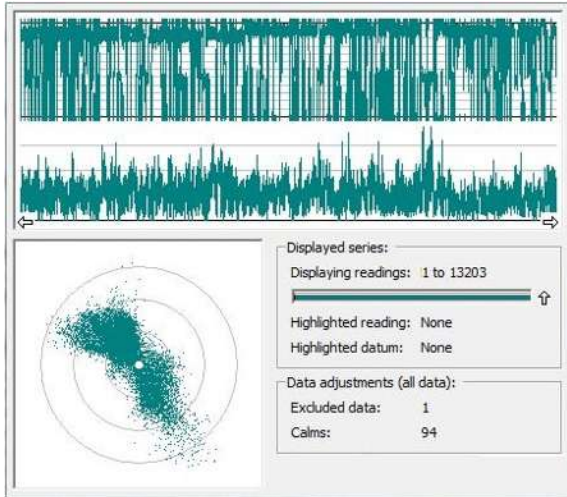
(b)



(c)

Figura 42. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2006 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

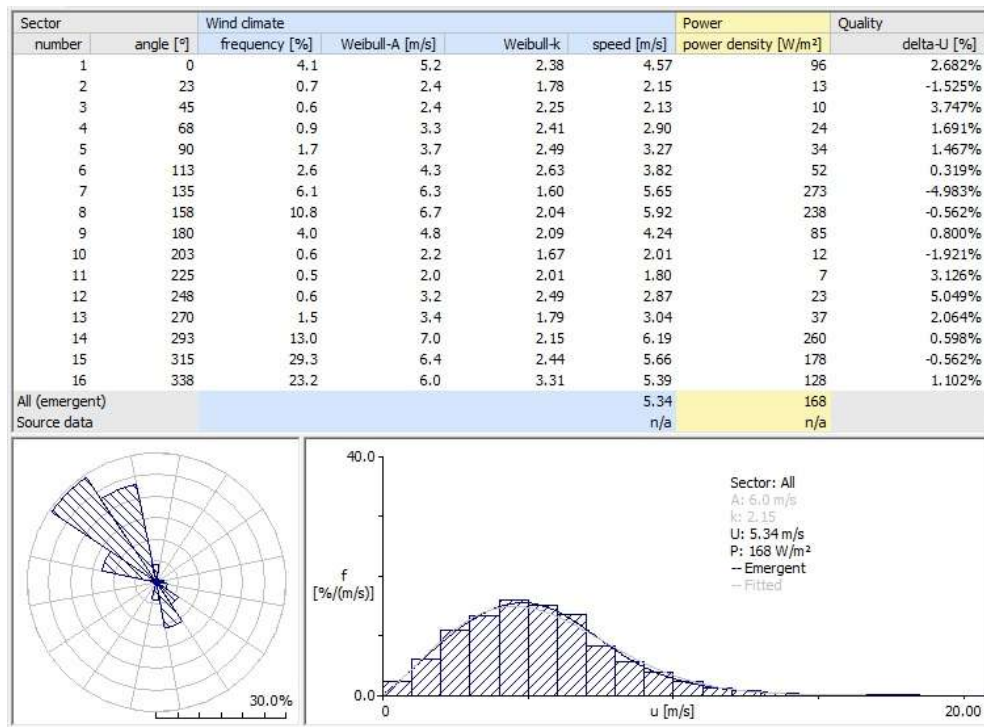
La Figura 43 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2007.



(a)

Estación Puerto Vicente 2007 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	5.34	167.44
Ajuste de Weibull	5.36	168.14
Discrepancia	0.30%	0.42%

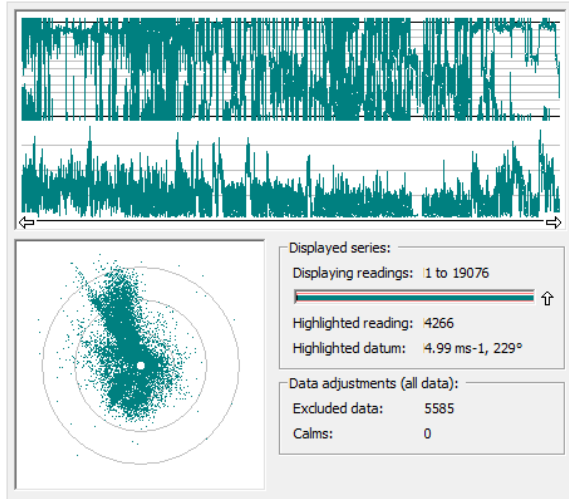
(b)



(c)

Figura 43. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2007 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

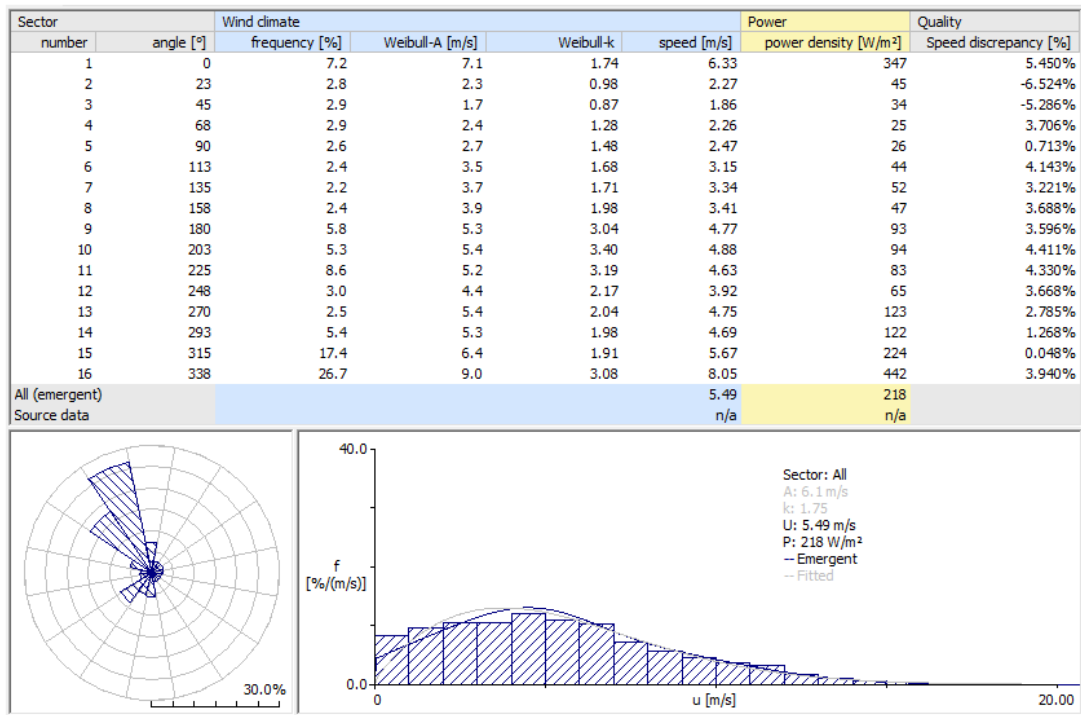
La Figura 44 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2008.



(a)

Estación Puerto Vicente 2008 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	5.35	217.61
Ajuste de Weibull	5.44	218.23
Discrepancia	1.71%	0.28%

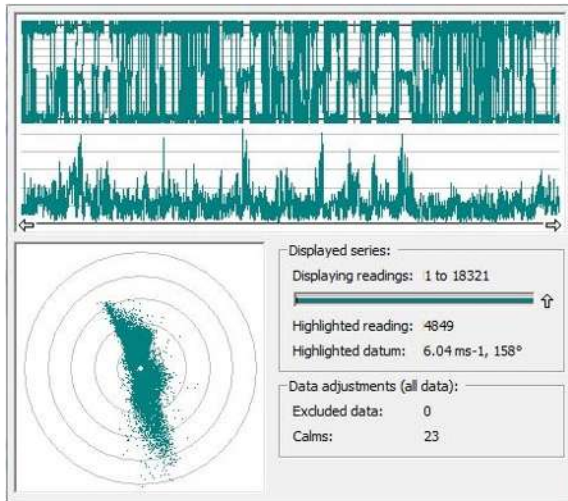
(b)



(c)

Figura 44. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2008 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

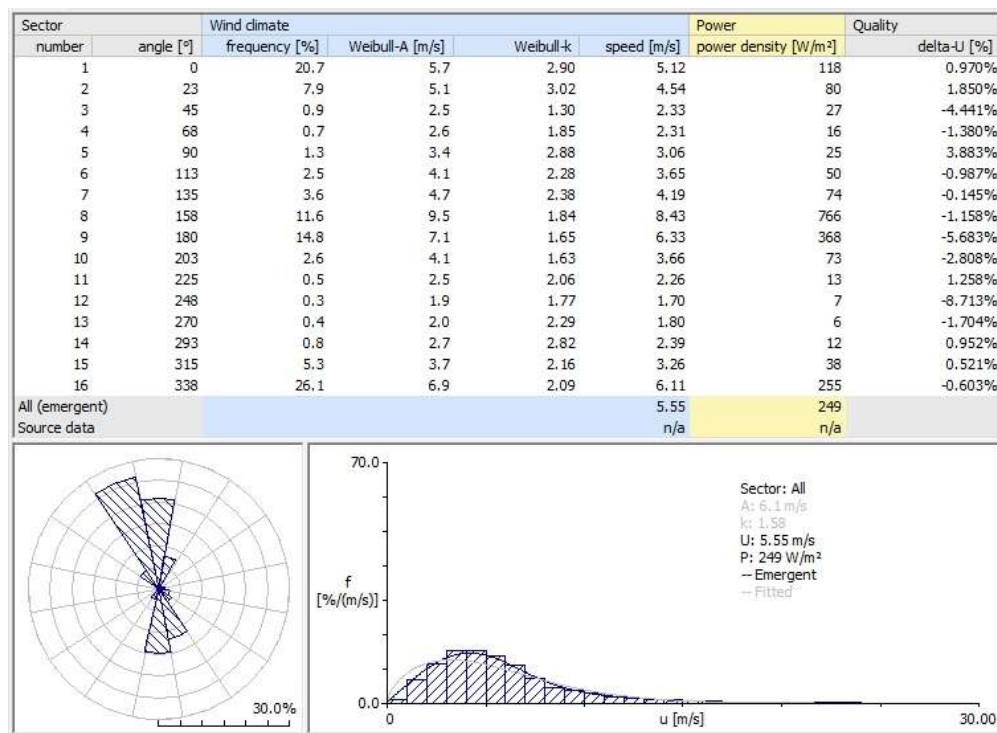
La Figura 45 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2009.



(a)

Estación Puerto Vicente 2009 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	5.63	249.62
Ajuste de Weibull	5.45	249.1
Discrepancia	3.31%	0.21%

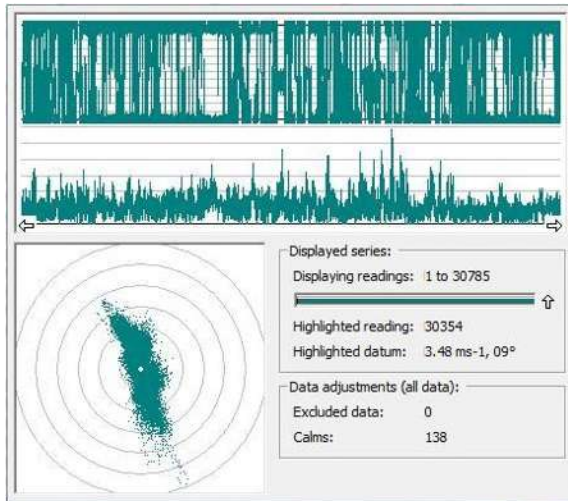
(b)



(c)

Figura 45. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2009 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

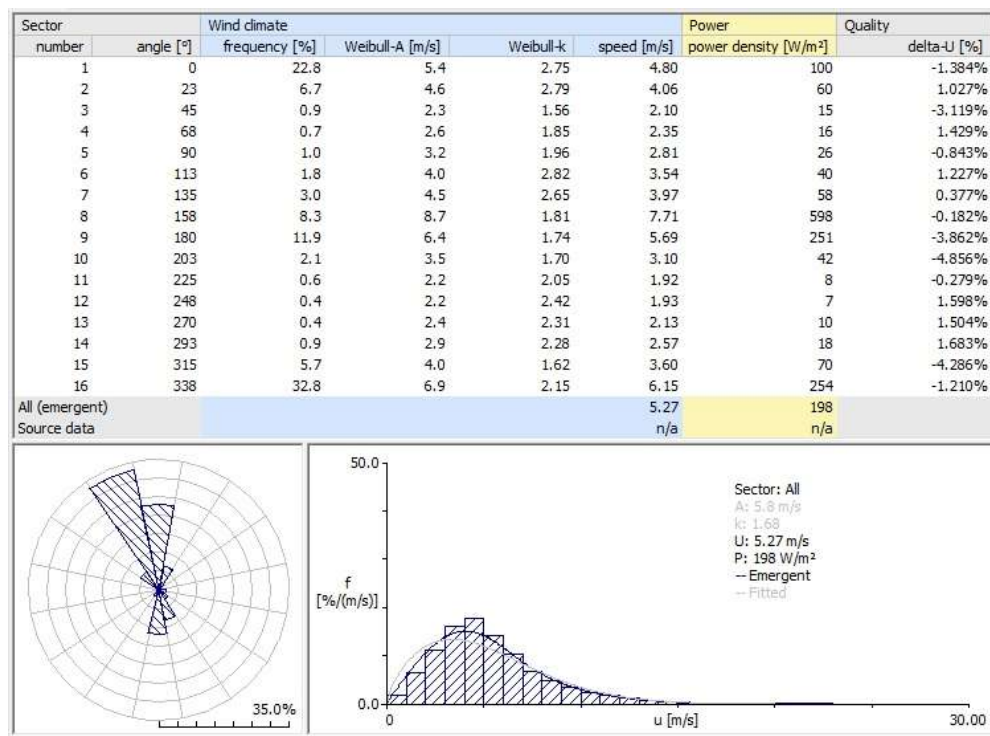
La Figura 46 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2010.



(a)

Estación Puerto Vicente 2010 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	5.36	198.19
Ajuste de Weibull	5.18	198.07
Discrepancia	3.36%	0.07%

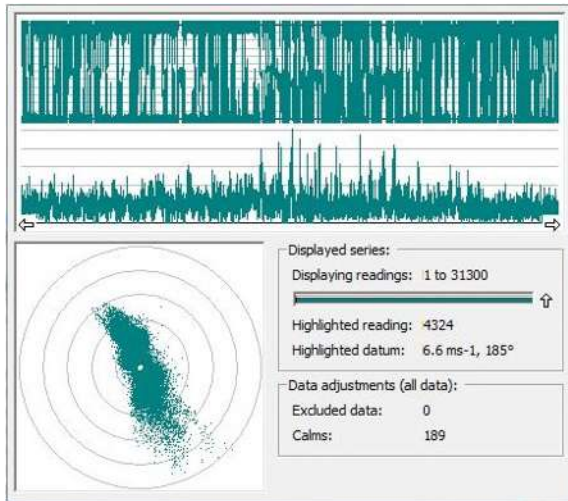
(b)



(c)

Figura 46. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2010 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

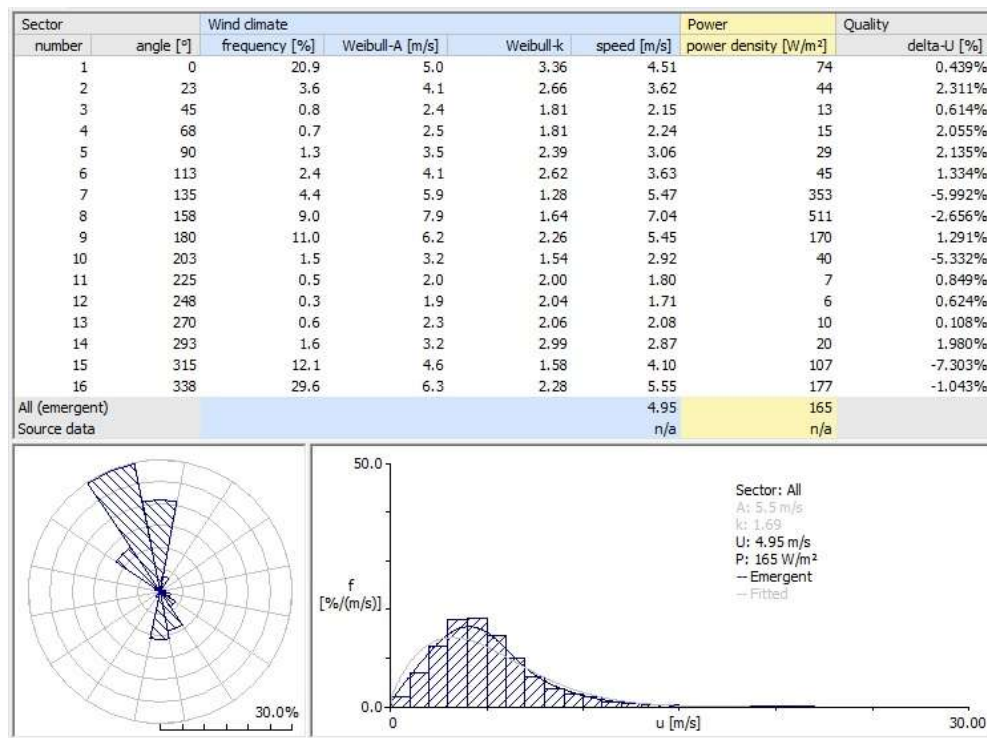
La Figura 47 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2011.



(a)

Estación de Puerto Vicente 2011 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	5.04	165.26
Ajuste de Weibull	4.89	165.02
Discrepancia	2.91%	0.14%

(b)



(c)

Figura 47. Resultados para la estación Puerto Vicente año 2011 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

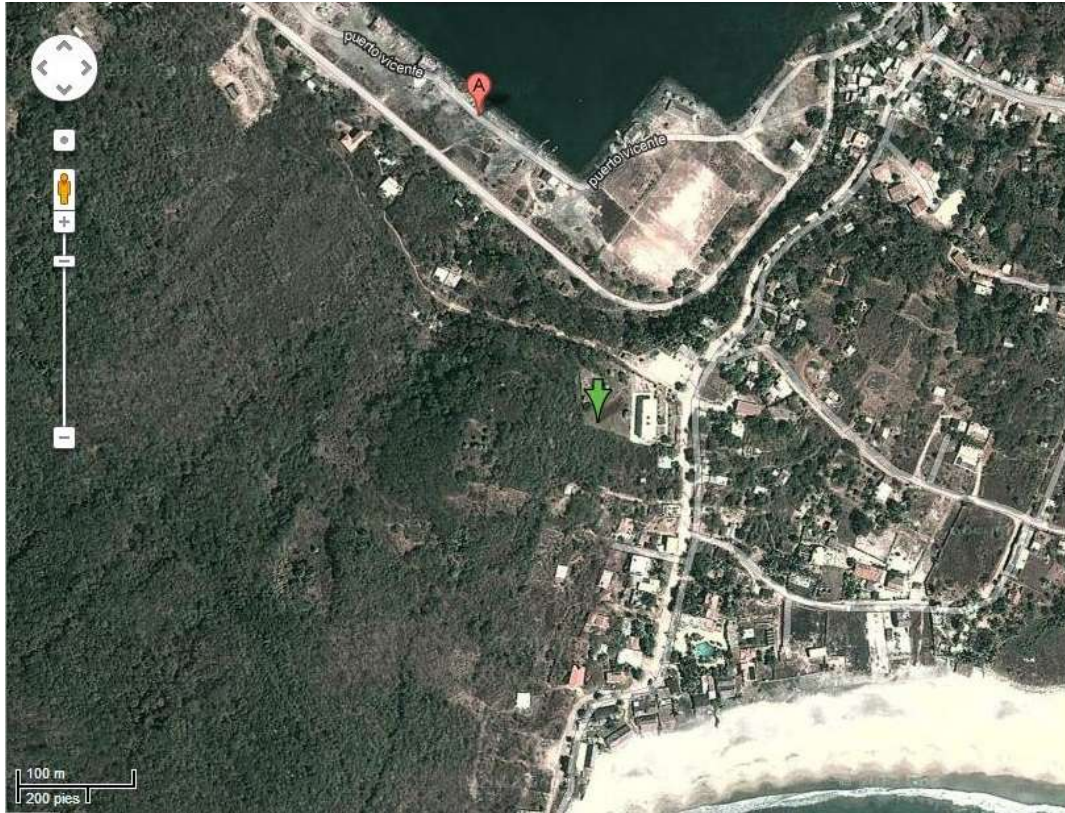


Figura 48. Vista aérea de la ubicación de la estación Puerto Vicente.

La Figura 48 presenta la ubicación de la estación de medición Puerto Vicente. Los resultados reportados del análisis de datos extrapolados indican que los valores medios de velocidad de viento y densidad de potencia se encuentran en el orden de $5m/s$ y $200W/m^2$, respectivamente, el cual es un recurso eólico considerable.

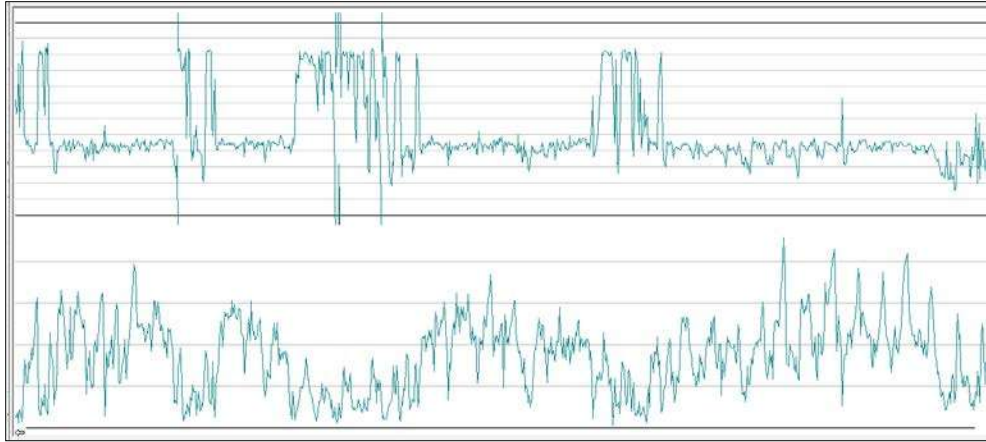
La dirección de los vientos predominantes se ubica en las secciones 1, 8, 9, 15 y 16 en las rosas de vientos. El comportamiento del viento es muy interesante en este sitio de medición pues los vientos no son tan dispersos, se presentan en pocas direcciones de manera constante. Además, se presentan en los 5 sectores antes mencionados de la rosas de vientos velocidades de viento superiores a $5m/s$.

4.4 Estación Tepuxtepec.

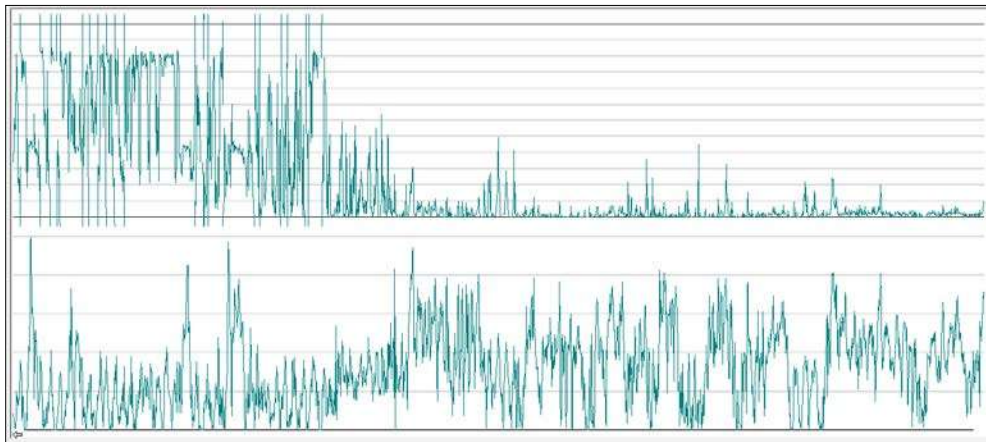
La Tabla 10 presenta los porcentajes de datos anuales utilizados en la estimación del potencial eólico de la estación Tepuxtepec. En la tabla se puede apreciar que del año 2007 a 2008 el porcentaje de datos se degradó de 86.7% a 63%. Por su parte del año 2009 a 2011 el porcentaje de muestras se degradó de 99.6% a 60.87%. En los análisis para los años 2007 y 2008 con OWC Wizard de la estación Tepuxtepec se estableció la velocidad mínima reportada como velocidad de calma. Para el año 2007 la velocidad mínima reportada es de 0.13m/s y se estableció una velocidad de calma de 0.2m/s. Para el año 2008 la velocidad mínima reportada es de 0.04m/s y se estableció una velocidad de calma de 0.1m/s. Por su parte con el resto de los años no fue necesario realizar cambios en sus análisis. Además, para los años 2010 y 2011 la rosas de vientos cambian respecto a las rosas de vientos de los años 2007, 2008 y 2009, esto puede deberse a un mal funcionamiento del sensor de dirección, ya que se muestran intervalos continuos en el registro de la dirección. En la Figura 49(a) se muestra un intervalo en donde el registro de la dirección y velocidad de viento en función del tiempo del año 2010. Para el año 2011 es más evidente este comportamiento en el sensor de dirección pues la mitad del registro de datos se realizó en el rango entre 0° y 30°, tal como se muestra en la Figura 49(b).

Tabla 10. Porcentaje de datos útiles en los estudios de la estación Tepuxtepec.

Estación Tepuxtepec		
Año	Número de datos por año	Porcentaje por año
2007	7599	86.74%
2008	5522	63.03%
2009	8731	99.66%
2010	8407	95.97%
2011	5327	60.81%



(a)



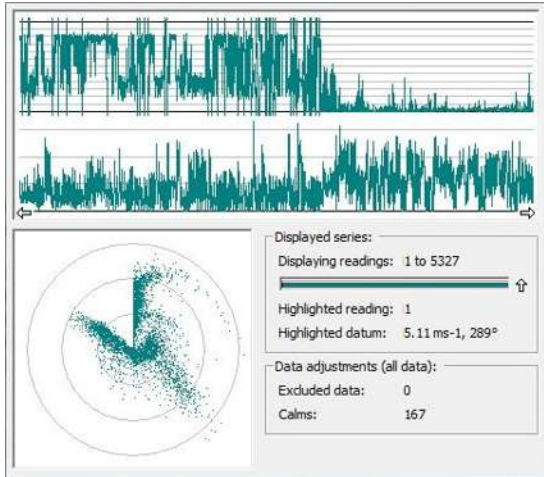
(b)

Figura 49. Dirección y velocidad de viento en el tiempo a).- estación Tepuxtepec año 2010 y b).- estación Tepuxtepec año 2011.

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el programa WAsP usando los datos medidos en la estación Tepuxtepec a una altura de 10m y con datos extrapolados a 80m.

4.4.1 Resultados obtenidos con mediciones realizadas a 10m año 2011

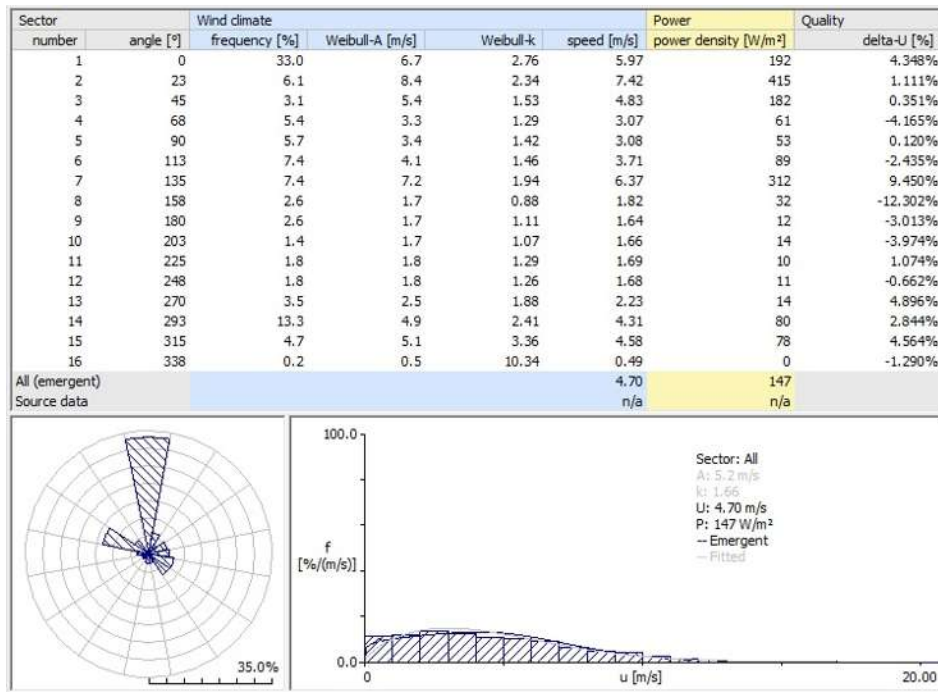
La Figura 50 presenta los resultados obtenidos a una altura de 10m para el año 2011. De acuerdo de la rosa de vientos reportada en la Figura 50(c), los vientos de las direcciones ubicadas en los sectores 1 y 14 presentan la frecuencia más alta. Además, la velocidad y densidad de potencia medias reportadas en la Figura 50(b) son del orden de 4.53m/s y 144.83W/m^2 , respectivamente.



(a)

Estación Tepuxtepec 2011 a 10m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	4.53	144.83
Ajuste de Weibull	4.66	146.88
Discrepancia	2.99%	1.41%

(b)

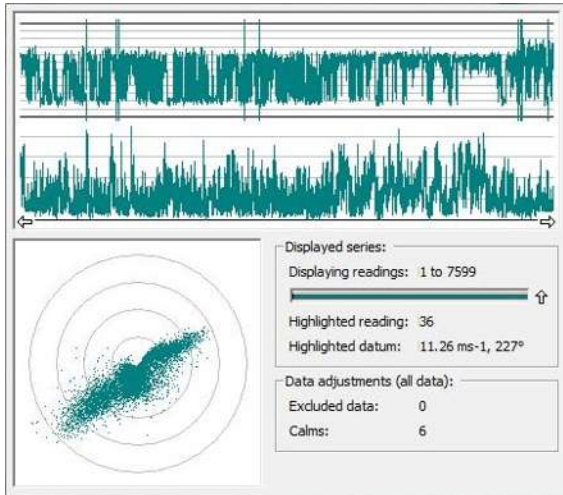


(c)

Figura 50. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2011 a 10m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

4.4.2 Resultados obtenidos mediante la extrapolación a 80m

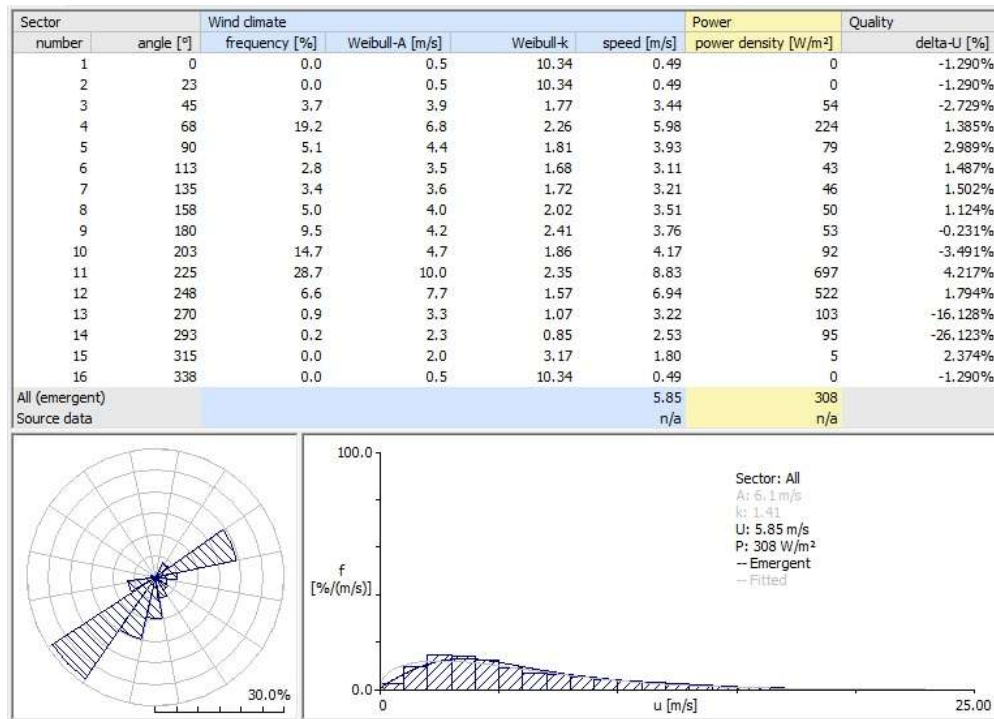
La Figura 51 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2007.



(a)

Estación Tepuxtepec 2007 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	5.75	307.3
Ajuste de Weibull	5.53	308.56
Discrepancia	3.94%	0.41%

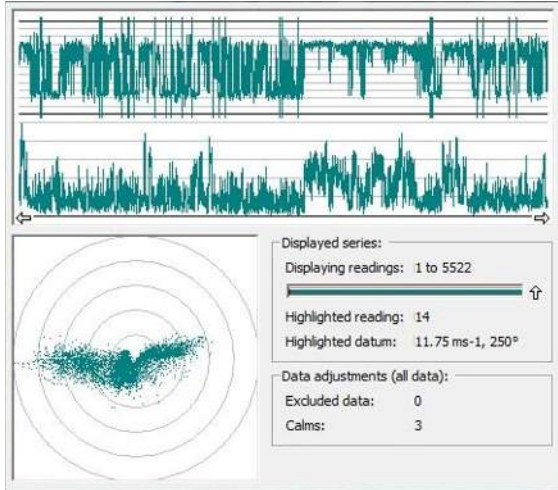
(b)



(c)

Figura 51. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2007 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

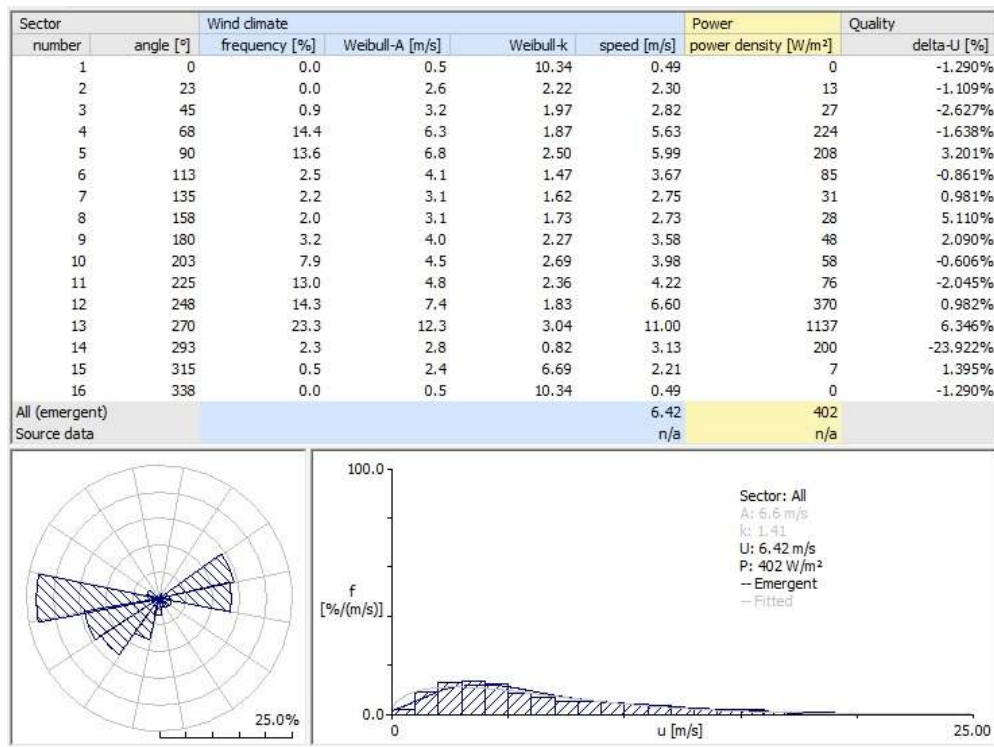
La Figura 52 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2008.



(a)

Estación Tepuxtepec 2008 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	6.29	402.69
Ajuste de Weibull	6.03	402.78
Discrepancia	4.04%	0.02%

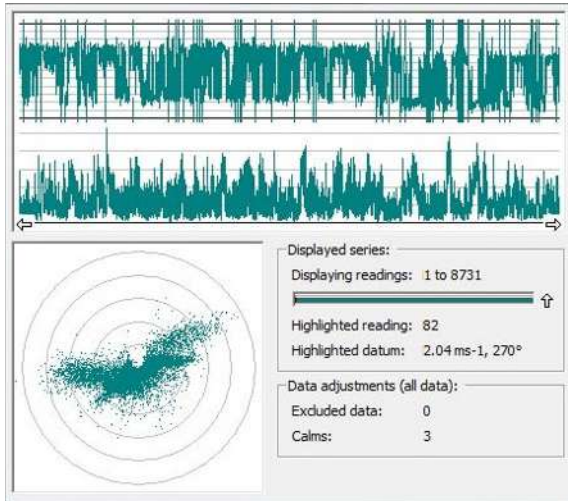
(b)



(c)

Figura 52. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2008 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

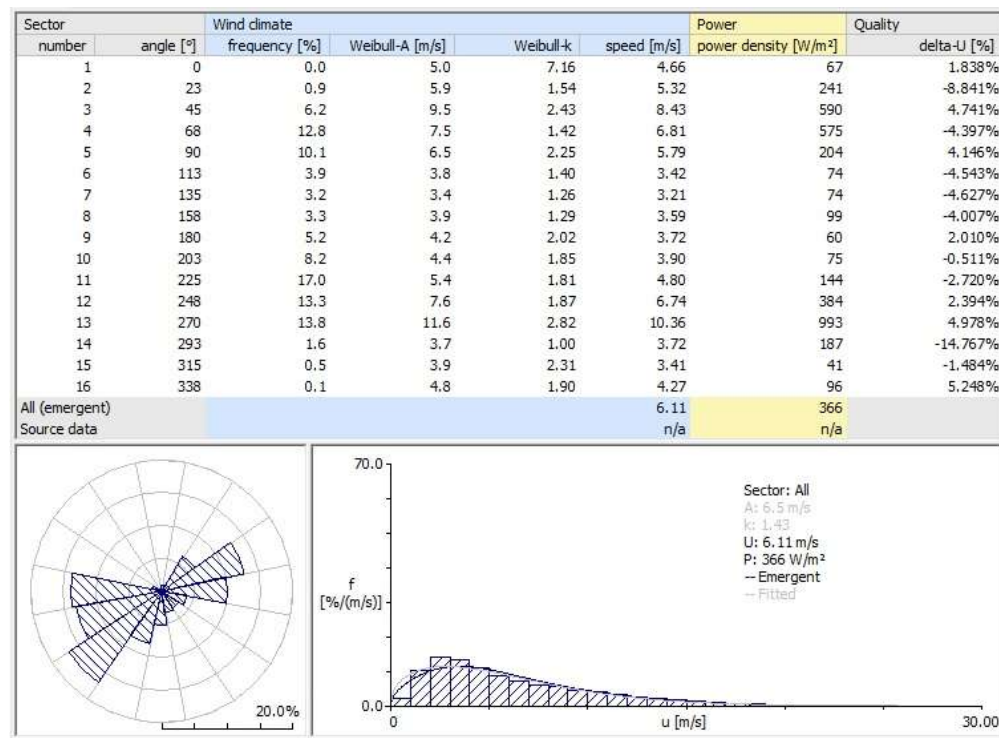
La Figura 53 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2009.



(a)

Estación Tepuxtepec 2009 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	6.07	365.25
Ajuste de Weibull	5.9	366.58
Discrepancia	2.89%	0.36%

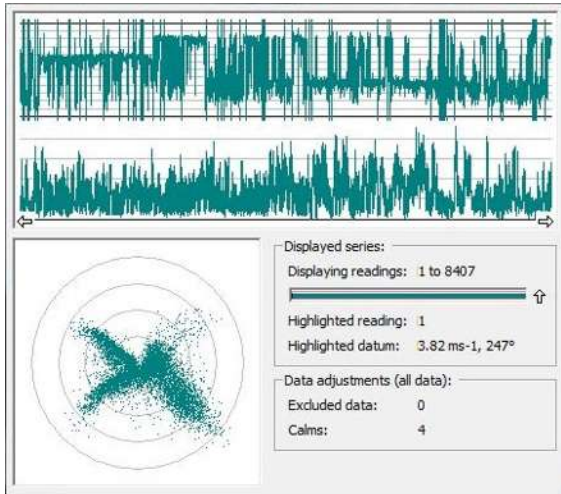
(b)



(c)

Figura 53. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2009 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

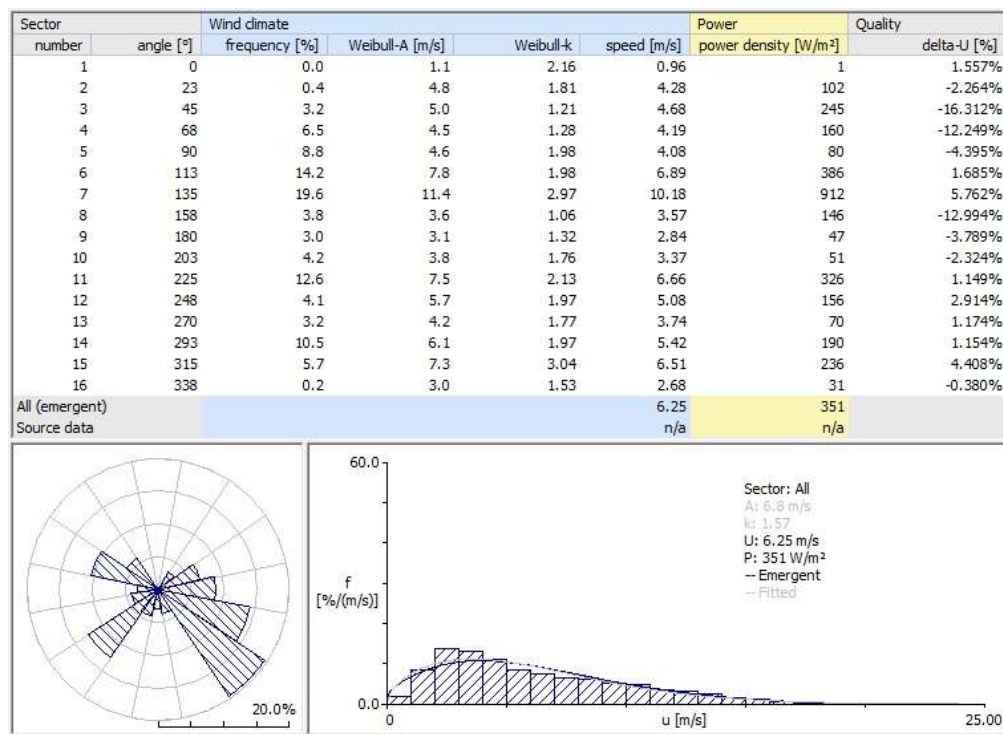
La Figura 54 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2010.



(a)

Estación Tepuxtepec 2010 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m^2)
Medido	6.19	350.45
Ajuste de Weibull	6.08	351.63
Discrepancia	1.78%	0.34%

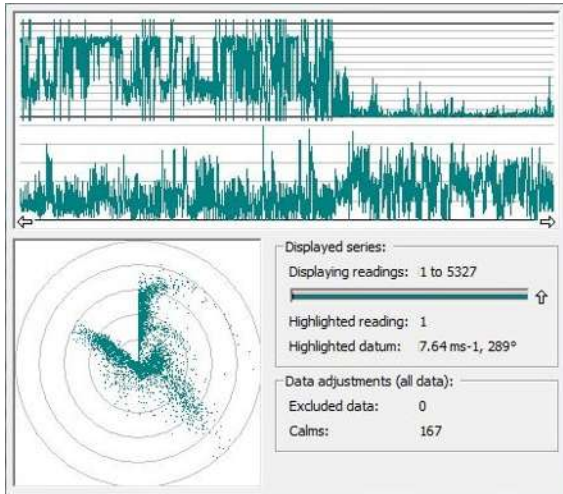
(b)



(c)

Figura 54. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2010 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.

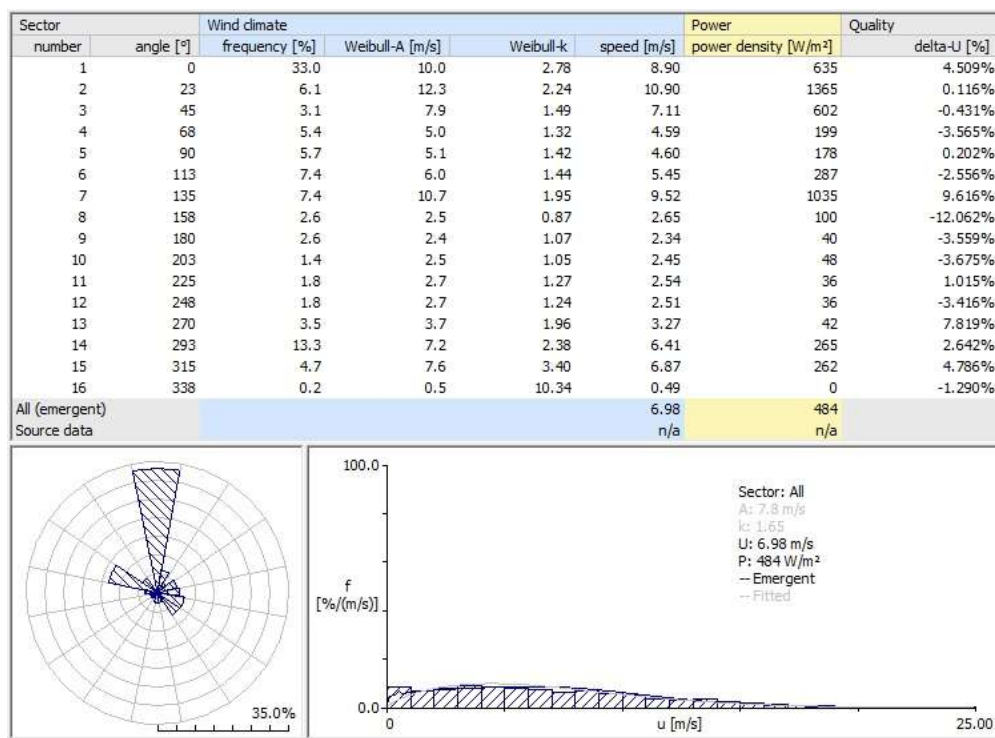
La Figura 55 presenta los resultados obtenidos mediante extrapolación a una altura de 80m para el año 2011.



(a)

Estación Tepuxtepec 2011 a 80m		
	Velocidad media (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
Medido	6.77	484.07
Ajuste de Weibull	6.94	484.76
Discrepancia	2.42%	0.14%

(b)



(c)

Figura 55. Resultados para la estación Tepuxtepec año 2011 a 80m a).- datos medidos, b).- valores medios y c).- rosa de vientos y distribución de Weibull.



Figura 56. Vista aérea de la ubicación de la estación Tepuxtepec.

La Figura 56 muestra la vista aérea del sitio de ubicación de la estación Tepuxtepec. Los resultados extrapolados reportados en las Figuras 51 a 55 muestran de forma consistente la presencia de un recurso eólico relevante. Los valores medios de velocidad y densidad de potencia se encuentran por arriba de los $5.7m/s$ y $307W/m^2$, respectivamente. Por su parte la dirección de los vientos predominantes en las rosas de vientos no es representativa, puesto que en la mayoría de las figuras reportadas cambia. Sin embargo, en las Figuras 52 y 53 son similares y coinciden en los sectores 4, 5, 11, 12 y 13.

4.5 Conclusiones

En este capítulo se presentó el factor de rugosidad utilizado en la extrapolación de cada una de las estaciones meteorológicas. Además se presentaron los resultados del análisis de datos medidos para un subgrupo de estaciones meteorológicas. Para cada una de las estaciones se presentaron los porcentajes

de datos anuales disponibles, para la mayoría de las estaciones pertenecientes a la SEMAR se cuenta con porcentajes de datos anuales menores a 60% de los años 2000 a 2008 y de los años 2009 a 2011 se cuenta con porcentajes por arriba del 80%. Además, cada una de las estaciones meteorológicas perteneciente al SMN se cuentan en la mayoría de sus años con porcentajes superiores a 90%. En la mayoría de las estaciones meteorológicas de ambas instituciones se cuenta con registros desde el año 2000. Por su parte las estaciones pertenecientes a la OCLSP cuentan con registros desde el año 2007 y en cada una de las estaciones pertenecientes a esta institución se cuenta con una cantidad de datos anuales mayor a 80%. También se presentaron gráficas de dirección y velocidad de viento en función del tiempo de cada uno de los años de cada estación, en estas gráficas se observaron patrones repetitivos del comportamiento de la dirección y del viento, lo cual permitió identificar anomalías en los registros de dirección. Las estaciones que presentaron estas anomalías en sus registros son:

- Estación Isla Clarión 2007 y 2009
- Estación Isla Socorro 2011
- Estación Puerto Vicente 2003, 2004, 2006 y 2008
- Estación Angamacutiro del 2007 al 2011
- Estación Petacalco 2011
- Estación Tizapan del 2004 al 2006
- Estación Corrales 2007 y 2009
- Estación Lago de Cuitzeo del 2007 al 2011
- Estación Lago de Pátzcuaro 2010 y 2011
- Estación Tepuxtepec 2010 y 2011
- Estación Yurecuaro 2007

De cada uno de los análisis se obtuvieron los valores medios de velocidad de viento y densidad de potencia de los cuales se pudo apreciar que las 6 estaciones con mayor recurso eólico son las estaciones: Isla Clarión, Tepuxtepec, Isla Socorro, Puerto Vicente, Laguna Fresno y Presa la Noria. Así también, se presentaron los histogramas de la distribución de frecuencias de la velocidad del viento y la rosa de vientos de cada uno de los años.

Capítulo 5 Resultados del potencial eólico

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados de las estimaciones del recurso eólico para el Estado de Michoacán. Los resultados detallados de cada uno de los análisis anuales de las estaciones meteorológicas se resumen y se clasifican dependiendo de las características del viento.

5.1 Promedio de velocidades y densidad de potencia

La Tabla 11 presenta la clasificación del potencial eólico en términos de la velocidad y densidad de potencia medias para aplicaciones a escala comercial [20][21]. Se puede apreciar que con el propósito de simplificar la caracterización del potencial eólico, se proponen siete clases de viento. El recurso eólico de clase 4 y mayores se consideran adecuados para desarrollos a escala comercial, mientras que los recursos de clase 2 y mayores son suficientes para aplicaciones rurales o sin conexión a la red eléctrica.

Tabla 11. Clasificación del viento usada en Estados Unidos de Norteamérica.

Clase	A 30m de altura			A 50m de altura		
	Velocidad del viento (<i>m/s</i>)	Densidad de Potencia del viento (<i>W/m²</i>)	Consideración del recurso eólico	Velocidad del viento (<i>m/s</i>)	Densidad de Potencia del viento (<i>W/m²</i>)	Consideración del recurso eólico
1	0 – 5.1	0 – 160	-----	0 – 5.6	0 – 200	Pobre
2	5.1 – 5.9	160 – 240	Escaso	5.6 – 6.4	200 – 300	Escaso
3	5.9 – 6.5	240 – 320	Moderado	6.4 – 7.0	300 – 400	Moderado
4	5.6 – 7.0	320 – 400	Bueno	7.0 – 7.5	400 – 500	Bueno
5	7.0 – 7.4	400 – 480	Excelente	7.5 – 8.0	500 – 600	Excelente
6	7.4 – 8.2	480 – 640	Destacado	8.0 – 8.8	600 – 800	Destacado
7	8.2 – 11.0	640 – 1600	Soberbio	8.8 – 11.9	800 - 2000	Soberbio

Los mapas eólicos se describen en términos de la densidad de potencia del viento en lugar de la velocidad del viento. La densidad de potencia del viento es un mejor indicador del recurso disponible ya que incorpora los efectos de la distribución de la frecuencia de la velocidad del viento, la dependencia de la potencia del viento sobre la densidad del viento, así como también el cubo de la velocidad del viento. Para evaluar el potencial eólico de un sitio se utiliza una clasificación de potencia del viento basada en los rangos de densidad de potencia disponible en el viento (Ver Tabla 11). La clasificación es válida para aplicaciones a escala comercial que van de pobre a excelente. Por ejemplo, un sitio con recurso anual promedio de aproximadamente de 7 m/seg o 400 W/m^2 a una altura de 50m arriba del nivel del suelo representa un sitio bueno para aplicaciones a nivel comercial. Los lugares con niveles del recurso eólico menores pueden ser viables para aplicaciones de electrificación rural o en pequeñas poblaciones, en donde el recurso eólico es de 200 W/m^2 y aproximadamente 5.5 m/seg a 50m de altura sobre el nivel del suelo (ver Tabla 11).

Los resultados reportados en esta sección son un resumen de los resultados arrojados por el software WAsP con los datos de viento extrapolados a 80m de altura. La Tabla 12 muestra las velocidades medias y la Tabla 13 muestra la densidad de potencia media por año para cada una de las estaciones analizadas. Los resultados reportados en estas tablas se han ordenado de forma descendente.

Debido a que la densidad del aire es diferente para cada sitio en donde las ubican las estaciones meteorológicas, se introduce un factor de corrección de la densidad de potencia. Este factor de corrección se obtiene del cociente de densidades (ρ/ρ_0), en donde ρ es la densidad del viento en el lugar de monitoreo y ρ_0 es la densidad estándar con un valor de 1.225 kg/m^3 . Para obtener el valor de la densidad del viento en el lugar de medición (ρ) se utilizó una herramienta del paquete WAsP llamada “Air Density Calculator”, la cual proporciona la densidad del aire en kg/m^3 al proporcionar la temperatura en grados centígrados y la altitud sobre el nivel del mar del sitio de interés.

Los resultados reportados en la Tabla 13 indican que los 10 mejores sitios con recurso eólico son Isla Clarión, Tepuxtepec, Puerto Vicente, Isla Socorro, Laguna Fresno, Tercer Mundo, Presa la Noria, Presa 3 Mezquites, Presa Urepetiro y Tizapan. Sobresalen los sitios de Isla Clarión con 7 m/s y 380.6 W/m^2 y Tepuxtepec con 6.2 m/s y 291 W/m^2 , respectivamente.

Tabla 12. Promedio de velocidades medias de datos extrapolados a 80m

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Promedio
Isla Clarión	6.58	6.19	7.44	7.6	8.02	7.5	6.78	4.7	*	7.23	7.4	8.03	7.07
Tepuxtepec	*	*	*	*	*	*	*	5.75	6.29	6.07	6.19	6.77	6.214
Puerto Vicente	5.56	5.82	5.42	6.3	5.68	5.74	5.31	5.34	5.35	5.63	5.36	5.04	5.54
Isla Socorro	4.77	5.17	5.88	5.48	5.23	5.58	5.26	5.67	*	5.47	5.64	5.5	5.42
Laguna Fresno	*	*	*	*	*	*	*	*	5.05	5.3	5.55	5.43	5.33
Tercer Mundo	*	*	*	*	*	*	*	*	5.31	4.78	4.99	5.03	5.02
Presa la Noria	*	*	*	*	*	*	*	*	*	4.97	4.91	5.12	5
Presa 3 Mezquites	*	*	*	*	*	*	*	*	*	4.47	4.82	4.88	4.72
Tizapan	5.05	4.98	4.87	4.7	4.91	3.92	3.24	4.85	4.74	4.48	4.98	4.95	4.63
Presa Urepetiro	*	*	*	*	*	*	*	*	*	4.36	4.49	4.69	4.51
Zihuatanejo	*	*	*	*	*	*	*	*	4.46	4.54	4.37	4.45	4.455
Lázaro Cárdenas	*	*	*	*	4.2	3.95	4.11	4.22	*	3.65	3.98	3.99	4.01
Presa Gonzalo	*	*	*	*	*	*	*	*	*	3.85	3.72	4.03	3.86
Aristeo Mercado	*	*	*	*	*	*	*	3.76	3.95	3.71	3.85	3.91	3.83
Presa la Cofradía	*	*	*	*	*	*	*	*	*	3.8	3.8	3.88	3.82
Melchor Ocampo	*	*	*	*	*	*	*	*	3.63	3.8	3.83	3.96	3.8
Temascales	*	*	*	*	*	*	*	3.78	4.06	3.89	3.38	3.21	3.66
Presa Jaripo	*	*	*	*	*	*	*	*	*	3.55	3.64	3.74	3.64
Cointzio	*	*	*	*	*	*	*	3.41	3.58	3.64	3.74	3.65	3.6
Isla Madre	*	*	*	*	3.53	3.57	3.52	3.63	*	3.37	3.65	3.75	3.58
San Cristóbal	*	*	*	*	*	*	*	3.33	3.53	3.49	3.73	3.82	3.58
Petalcalco	*	*	*	3.67	3.62	3.62	3.19	3.4	3.53	3.91	3.51	2.39	3.42

Tabla 12. Promedio de velocidades medias de datos extrapolados a 80m (Cont.)

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Promedio
Lago de Cuitzeo	*	*	*	*	*	*	*	3.32	3.45	3.33	3.36	3.23	3.338
San Antonio Guaracha	*	*	*	*	*	*	*	*	3.11	3.28	3.43	*	3.27
Angamacutiro	3.84	3.94	3.86	3.65	3.6	3.69	3.54	3.43	3.33	3.07	1.67	1.33	3.24
Mal País	*	*	*	*	*	*	*	3.13	3.13	3.45	*	*	3.23
Manzanillo	*	*	*	3.52	3.46	3.31	3.27	3.14	*	2.98	2.9	*	3.22
Markazuza	*	*	*	*	*	*	*	3.15	3.36	3.21	3.1	3.23	3.21
La Piedad	*	*	*	*	*	*	*	*	3	3.22	3.16	3.32	3.17
Yurecuaro	*	*	*	*	*	*	*	2.88	3.35	3.08	2.97	2.53	2.96
Apatzingan	*	*	*	3.13	2.78	3.54	*	2.99	2.83	2.67	2.84	2.81	2.94
Corrales	*	*	*	*	*	*	*	2.86	2.85	2.82	2.93	2.89	2.87
La palma	*	*	*	*	*	*	*	*	*	2.98	2.9	2.71	2.86
Lago de Pátzcuaro	*	*	*	*	*	*	*	2.77	2.79	2.79	2.81	*	2.79
Uruapan	*	*	*	*	2.62	*	*	2.54	2.61	*	2.25	1.54	2.312
Mezcala	*	*	*	*	*	*	*	*	2.17	2.11	*	*	2.14
Zacapu	*	*	*	*	*	*	*	2.07	2.23	2.02	2.07	2.11	2.1
Cd. Altamirano.	*	*	*	2.09	2.06	1.99	1.99	1.99	2.01	1.66	1.91	1.8	1.94
Morelia	*	*	*	*	*	*	1.63	1.66	1.69	1.7	1.59	1.67	1.65
Maltaraña	*	*	*	*	*	*	*	*	0.91	0.96	0.99	0.84	0.835

Tabla 13. Densidades de potencia corregidas para los datos extrapolados a 80m

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	promedio	Factor de corrección	Promedio corregido
Isla Clarión	387.57	320.31	537.61	410.18	487.74	370.08	351.57	247.05	*	371.01	342.53	496.01	392.87	0.969	380.69
Tepuxtepec	*	*	*	*	*	*	*	307.3	402.69	365.25	350.45	484.07	381.95	0.762	291.04
Isla Socorro	149.28	163.83	304.06	235.32	189.78	221.88	198.73	216.09	*	254.34	218.06	204.13	214.13	0.963	206.2
Puerto Vicente	148.99	209.98	186.33	298.57	231.86	258.71	200.29	167.44	217.61	249.62	198.19	165.26	211.07	0.955	201.57
Laguna Fresno	*	*	*	*	*	*	*	*	203.47	256.49	306.26	262.91	257.28	0.783	201.45
Presa la Noria	*	*	*	*	*	*	*	*	*	196.95	170.64	178.02	181.87	0.804	146.22
Tercer Mundo	*	*	*	*	*	*	*	*	219.22	150.63	150.28	162.87	170.75	0.752	128.4
Presa 3 Mezquites	*	*	*	*	*	*	*	*	*	114.16	140.28	137.12	130.52	0.811	105.85
Presa Urepetiro	*	*	*	*	*	*	*	*	*	120.95	124.9	127.36	124.4	0.808	100.51
Tizapan	130.05	162.5	123.2	106.63	121.18	104.85	67.52	110.25	109.42	96.1	124.52	118.49	114.55	0.821	94.05
Zihuatanejo	*	*	*	*	*	*	*	*	96.63	104.01	84.99	93.3	94.73	0.953	90.29
Lázaro Cárdenas.	*	*	*	*	97.41	107.54	98.59	100.91	*	71.46	93.09	91.28	94.33	0.953	89.89
Temascales	*	*	*	*	*	*	*	96.63	127.54	114.53	113.21	109.59	112.3	0.764	85.79
Presa Jaripo	*	*	*	*	*	*	*	*	*	91.37	108.91	88.42	96.23	0.823	79.19
Aristeo Mercado	*	*	*	*	*	*	*	85.8	97.71	88.86	97.03	91.35	92.15	0.786	72.42
Presa Gonzalo	*	*	*	*	*	*	*	*	*	82.59	74.22	88.68	81.83	0.819	67.01
Petalcalco	*	*	*	68.73	64.68	68.87	37.72	50.25	66.64	76.25	66.08	49.47	60.96	0.954	58.15
San Antonio Guaracha	*	*	*	*	*	*	*	*	65.04	64.21	76.83	*	68.69	0.822	56.46
Presa la Cofradía	*	*	*	*	*	*	*	*	*	68.84	74.47	68.46	70.59	0.792	55.9
San Cristóbal	*	*	*	*	*	*	*	52.27	64.55	58.21	75.54	79.46	66.006	0.826	54.52

Tabla 13. Densidades de potencia corregidas para los datos extrapolados a 80m (Cont.).

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	promedio	Factor de corrección	Promedio corregido
Melchor Ocampo	*	*	*	*	*	*	*	*	63.01	67.38	66.97	70.24	66.9	0.808	54.05
Cointzio	*	*	*	*	*	*	*	54.21	67.76	73.39	83.54	64.55	68.69	0.785	53.92
Markazuza	*	*	*	*	*	*	*	52.29	80.55	62.14	54.74	64.11	62.76	0.808	50.71
Mal País	*	*	*	*	*	*	*	51.61	61.87	73.9	*	*	62.45	0.804	50.21
Angamacutiro	65.97	74.6	96.06	63.81	61	63.66	57.1	53.99	68.52	67.89	27.2	17.24	59.75	0.807	48.2
Yurecuaro	*	*	*	*	*	*	*	46.17	75.55	52.52	52.57	45.75	54.51	0.827	45.07
La Piedad	*	*	*	*	*	*	*	*	47.54	56.83	59.93	60.61	56.22	0.791	44.47
Isla Madre	*	*	*	*	37.75	40.25	39.62	44.31	*	35.61	50.41	52.64	42.94	0.961	41.26
Apatzingan	*	*	*	48.44	36.05	63.98	*	43.09	39.57	30.04	37.09	43.76	42.75	0.948	40.52
Lago de Pátzcuaro	*	*	*	*	*	*	*	42.34	47.27	46.43	54.72	*	47.6	0.785	37.43
Lago de Cuitzeo	*	*	*	*	*	*	*	43.56	50.96	47.26	49.17	40.58	46.3	0.797	36.9
Manzanillo.	*	*	*	42.48	41.43	39.15	34.73	32.74	*	36.43	34.07	*	37.29	0.959	35.76
Corrales	*	*	*	*	*	*	*	33.55	31.6	33.87	35.49	31.24	33.15	0.822	27.24
Uruapan	*	*	*	*	39.15	*	*	31.16	33.88	*	24.02	7.28	27.098	0.818	22.16
La palma	*	*	*	*	*	*	*	*	*	27.66	27.1	22.55	25.77	0.823	21.2
Zacapu	*	*	*	*	*	*	*	19.49	28.37	20.25	20.9	19.68	21.73	0.792	17.21
Mezcala	*	*	*	*	*	*	*	*	14.52	13.4	*	*	13.96	0.826	11.53
Cd. Altamirano.	*	*	*	12.07	11.06	10.01	10.61	10.81	11.09	5.11	8.78	8.12	9.74	0.926	9.01
Morelia	*	*	*	*	*	*	5.29	5.35	5.53	5.9	4.88	5.52	5.41	0.791	4.27
Maltaraña	*	*	*	*	*	*	*	*	0.87	1.12	1.34	0.74	0.8525	0.829	0.706

5.2 Desviación estándar y varianza

Cabe destacar que las medidas de dispersión se encargan de expresar la variabilidad de una distribución por medio de un número, en los casos en que las diferentes puntuaciones de la variable están muy alejadas de la media. A mayor valor de la medida de dispersión, mayor variabilidad. En cambio, a menor valor, más homogeneidad, es decir, mientras el valor de la varianza sea más pequeño, los valores de la distribución se encontraran más cercanos a la media. De esta manera podemos ver como es el comportamiento del viento con respecto a los valores del viento más frecuentes.

La Tabla 14 muestra los valores de la desviación estándar y la varianza de la velocidad del viento extrapolado a 80m de altura. Los resultados se reportan en *m/s* y *km/h*. Se puede apreciar que en general los valores de desviación estándar se encuentran por debajo de *5.0m/s*, mientras que los valores de varianza se encuentran por debajo de *20m/s*

Tabla 14. Desviación estándar y varianza de la velocidad del viento.

Estación	Año	Desviación estándar (<i>m/seg</i>)	Varianza (<i>m/seg</i>)	Desviación estándar (<i>km/h</i>)	Varianza (<i>km/h</i>)
Isla Clarión	2000	3.81	14.49	13.7	187.77
	2001	3.67	13.45	13.2	174.32
	2002	3.69	13.58	13.27	176.05
	2003	2.91	8.47	10.47	109.71
	2004	3.0	8.99	10.8	116.55
	2005	2.61	6.8	9.38	88.07
	2006	3.27	10.67	11.76	138.33
	2007	3.21	10.28	11.54	133.17
	2009	2.91	8.45	10.46	109.51
	2010	2.44	5.98	8.8	77.45
	2011	2.99	8.96	10.78	116.14
Tepuxtepec	2007	3.8	14.5	13.7	188.5
	2008	4.1	17.6	15.1	228.1
	2009	4.0	16.5	14.6	214.2
	2010	3.8	15.1	14.0	196.7
	2011	4.5	20.7	16.4	269.3

Tabla 14. Desviación estándar y varianza de la velocidad del viento (Cont.)

Estación	Año	Desviación estándar (<i>m/seg</i>)	Varianza (<i>m/seg</i>)	Desviación estándar (<i>km/h</i>)	Varianza (<i>km/h</i>)
Isla Socorro	2000	2.7	7.5	8.4	71.1
	2001	2.73	7.49	9.84	96.93
	2002	3.52	12.4	12.6	160.9
	2003	3.2	10.38	11.5	134.2
	2004	3.02	9.13	10.8	118.06
	2005	3.04	9.29	10.9	120.2
	2006	2.9	8.69	10.6	112.3
	2007	2.93	8.6	10.5	111.3
	2009	3.23	10.44	11.6	135.2
	2010	3.04	9.26	10.9	120.0
	2011	2.9	8.7	10.6	113.1
Laguna Fresno	2008	3.3	10.9	11.9	142.2
	2009	3.6	13.5	13.2	175.9
	2010	3.9	15.3	14.0	198.6
	2011	3.6	13.3	13.1	173.5
Puerto Vicente	2000	2.0	4.07	7.21	52.09
	2001	2.7	7.5	9.9	98.2
	2002	2.7	7.6	9.9	99.3
	2003	3.2	10.8	11.8	140.6
	2004	3.1	9.8	11.2	126.8
	2005	3.4	11.8	12.3	153.2
	2006	3.3	11.1	12.02	144.7
	2007	2.6	6.8	9.4	88.5
	2008	3.7	13.7	13.3	177.9
	2009	3.2	10.6	11.7	137.5
	2010	2.9	8.4	10.4	109.9
	2011	2.7	7.4	9.8	96.3
Presa la Noria	2009	2.9	8.6	10.5	111.8
	2010	2.95	8.75	10.65	113.46
	2011	2.95	8.75	10.65	113.42
Tercer Mundo	2008	3.13	9.79	11.26	126.94
	2009	2.73	7.46	9.83	96.72
	2010	2.61	6.83	9.41	88.58
	2011	2.74	7.50	9.86	97.29
Lago de Cuitzeo	2007	3.4	11.9	12.4	155.1
	2008	3.5	12.7	12.8	164.9
	2009	2.7	7.4	9.8	96.9
	2010	2.5	6.4	9.1	84.0
	2011	2.3	5.6	8.5	72.7

Tabla 14. Desviación estándar y varianza de la velocidad del viento (Cont.)

Estación	Año	Desviación estándar (<i>m/seg</i>)	Varianza (<i>m/seg</i>)	Desviación estándar (<i>km/h</i>)	Varianza (<i>km/h</i>)
Presa 3 Mezquites	2009	2.4	5.8	8.7	76.0
	2010	2.5	6.5	9.2	85.3
	2011	2.4	6.1	8.9	79.6
Presa Urepetiro	2009	2.58	6.69	9.31	86.79
	2010	2.57	6.62	9.26	85.86
	2011	2.47	6.14	8.92	79.69
Temascales	2007	2.76	7.61	9.93	98.71
	2008	3.05	9.32	10.9	120.9
	2009	2.99	8.98	10.78	116.39
	2010	3.39	11.49	12.20	148.92
	2011	3.43	11.78	12.36	152.76
Tizapan	2000	2.27	5.15	8.17	66.81
	2001	3.23	10.48	11.65	135.84
	2002	2.41	5.80	8.67	75.23
	2003	2.18	4.75	7.84	61.59
	2004	2.32	5.4	8.36	70.04
	2005	3.0	9.0	10.80	116.72
	2006	2.08	4.34	7.50	56.34
	2007	2.09	4.40	7.55	57.08
	2008	2.16	4.69	7.79	60.82
	2009	2.13	4.55	7.67	58.96
	2010	2.37	5.61	8.53	72.81
	2011	2.15	4.65	7.76	60.28
Presa Jaripo	2009	2.66	7.08	9.58	91.79
	2010	2.82	7.95	10.15	103.05
	2011	2.56	6.56	9.22	85.07
Lázaro Cárdenas	2004	2.37	5.63	8.53	72.87
	2005	2.90	8.45	10.45	109.28
	2006	2.54	6.46	9.14	83.54
	2007	2.46	6.05	8.85	78.31
	2009	2.20	4.85	7.93	62.94
	2010	2.48	6.17	8.94	79.95
Aristeo mercado	2007	2.3	5.7	8.6	74.3
	2008	6.5	6.41	9.11	83.07
	2009	2.4	6.0	8.8	78.0
	2010	2.5	6.62	9.2	85.7
	2011	2.4	5.9	8.7	77.3
Presa Gonzalo	2009	2.29	5.27	8.26	68.28
	2010	2.21	4.92	7.98	63.81

Tabla 14. Desviación estándar y varianza de la velocidad del viento (Cont.)

Estación	Año	Desviación estándar (<i>m/seg</i>)	Varianza (<i>m/seg</i>)	Desviación estándar (<i>km/h</i>)	Varianza (<i>km/h</i>)
Presa Gonzalo	2011	2.30	5.31	8.29	68.87
Mal País	2007	2.12	4.51	7.29	53.22
	2008	2.23	4.99	8.04	64.76
	2009	2.70	7.30	9.73	94.71
Markazuza	2007	2.08	4.32	7.48	56.06
	2008	2.54	6.45	9.14	83.62
	2009	2.25	5.07	8.11	65.75
	2010	2.14	4.59	7.71	59.45
	2011	2.28	5.2	8.21	67.42
Cointzio	2007	1.9	3.6	6.8	47.1
	2008	2.1	4.7	7.5	57.7
	2009	2.18	4.78	7.8	62.0
	2010	2.3	5.5	8.3	70.1
	2011	2.0	4.0	7.2	52.1
San Antonio Guaracha	2008	2.39	5.71	8.60	74.10
	2009	2.33	5.44	8.40	70.5
	2010	2.5	6.24	8.99	80.98
Presla la Cofradía	2009	2.01	4.05	7.24	52.43
	2010	2.06	4.23	7.41	54.87
	2011	1.91	3.64	6.87	47.15
Melchor Ocampo	2008	1.9	3.9	7.18	51.59
	2009	1.98	3.93	7.13	50.97
	2010	1.95	3.82	7.04	49.61
	2011	1.93	3.73	6.95	48.37
Petacalco	2003	2.22	4.93	7.99	63.99
	2004	2.27	5.19	8.20	67.31
	2005	2.33	5.43	8.38	70.37
	2006	1.60	2.58	5.78	33.46
	2007	1.88	3.56	6.79	46.18
	2008	2.36	5.59	8.51	72.47
	2009	2.22	4.96	8.02	64.33
	2010	2.21	4.89	7.96	63.48
	2011	2.7	7.29	9.72	94.51
Corrales	2007	2.0	4.2	7.4	55.3
	2008	1.7	3.08	6.3	39.9
	2009	2.5	6.4	9.13	83.38
	2010	1.7	2.9	6.1	38.1
	2011	1.68	2.8	6.05	36.63

Tabla 14. Desviación estándar y varianza de la velocidad del viento (Cont.)

Estación	Año	Desviación estándar (<i>m/seg</i>)	Varianza (<i>m/seg</i>)	Desviación estándar (<i>km/h</i>)	Varianza (<i>km/h</i>)
La Piedad	2008	2.07	4.29	7.46	55.6
	2009	2.19	4.79	7.8	62.16
	2010	2.29	5.26	8.25	68.1
	2011	2.24	5.02	8.06	65.10
Yurecuaro	2007	2.19	4.81	7.90	62.44
	2008	2.60	6.78	9.37	87.90
	2009	2.23	5.01	8.06	64.97
	2010	2.29	5.28	8.27	68.43
	2011	2.45	6.01	8.83	77.98
Angamacutiro	2000	1.94	3.76	6.98	48.77
	2001	2.05	4.22	7.40	54.78
	2002	2.05	4.23	7.40	54.85
	2003	2.03	4.14	7.32	53.69
	2004	2.09	4.39	7.54	56.99
	2005	2.12	4.53	7.66	58.70
	2006	1.97	3.88	7.09	50.37
	2007	2.14	4.62	7.73	59.87
	2008	2.24	5.03	8.07	65.23
	2009	2.31	5.33	8.31	69.13
	2010	1.42	2.03	5.13	26.3
	2011	1.12	1.25	4.03	16.29
Zihuatanejo	2008	1.63	2.6	5.87	34.49
	2009	1.76	3.10	6.34	40.26
	2010	1.48	2.21	5.35	28.6
	2011	1.65	2.73	5.95	35.42
Apatzingan	2003	2.12	4.51	7.65	58.55
	2004	2.01	4.06	7.25	52.66
	2005	2.20	4.84	7.92	62.79
	2007	2.05	4.21	7.39	54.63
	2008	2.11	4.48	7.62	58.09
	2009	1.72	2.95	6.19	38.31
	2010	1.95	3.83	7.04	49.66
	2011	2.31	5.37	8.34	69.62
Lago de Pátzcuaro	2007	2.05	4.22	7.39	54.68
	2008	2.17	4.72	7.82	61.1
	2009	2.12	4.5	7.64	58.32
	2010	2.3	5.3	8.29	68.67
	2011	2.12	4.47	7.61	57.97

Tabla 14. Desviación estándar y varianza de la velocidad del viento (Cont.)

Estación	Año	Desviación estándar (<i>m/seg</i>)	Varianza (<i>m/seg</i>)	Desviación estándar (<i>km/h</i>)	Varianza (<i>km/h</i>)
San Cristóbal	2007	1.68	2.82	6.05	36.65
	2008	1.82	3.34	6.58	43.29
	2009	1.73	3.0	6.23	38.9
	2010	1.93	3.73	6.96	48.43
	2011	1.97	3.9	7.11	50.55
Isla Madre	2004	1.23	1.52	4.44	19.73
	2005	1.32	1.75	4.76	22.69
	2006	1.33	1.76	4.78	22.87
	2007	1.39	1.93	5.0	25.03
	2008	1.9	3.85	7.06	49.91
	2009	1.34	1.82	4.85	23.55
	2010	1.45	2.1	5.22	27.29
	2011	1.62	2.62	5.83	34.02
Manzanillo	2003	1.45	2.12	5.24	27.47
	2004	1.5	2.25	5.39	29.10
	2005	1.58	2.50	5.69	32.38
	2006	1.42	2.02	5.11	26.20
	2007	1.47	2.18	5.31	28.19
	2009	1.69	2.8	6.09	37.16
	2010	0.9	0.88	3.39	11.5
	2011	1.15	1.32	4.14	17.16
Uruapan	2004	2.07	4.28	5.54	30.78
	2007	1.86	3.46	6.70	44.9
	2008	1.87	3.49	6.73	45.34
	2010	1.77	3.13	6.37	40.59
	2011	1.15	1.32	4.14	17.16
La Palma	2009	1.31	1.73	4.73	22.42
	2010	1.35	1.84	4.88	23.86
	2011	1.29	1.67	4.65	21.66
Zacapu	2007	1.65	2.72	5.94	35.33
	2008	1.91	3.66	6.89	47.5
	2009	1.73	3.0	6.24	38.97
	2010	1.73	3.0	6.23	38.92
	2011	1.6	2.7	6.0	36.1
Mezcala	2008	1.25	1.55	4.49	20.12
	2009	1.26	1.58	4.52	20.45

Tabla 14. Desviación estándar y varianza de la velocidad del viento (Cont.)

Estación	Año	Desviación estándar (<i>m/seg</i>)	Varianza (<i>m/seg</i>)	Desviación estándar (<i>km/h</i>)	Varianza (<i>km/h</i>)
Cd. Altamirano	2003	1.14	1.31	4.12	17.04
	2004	1.15	1.32	4.14	17.14
	2005	1.09	1.19	3.92	15.43
	2006	1.15	1.33	4.15	17.27
	2007	1.17	1.37	4.22	17.81
	2008	1.21	1.46	4.35	19.0
	2009	0.77	0.59	2.77	7.71
	2010	1.06	1.13	3.83	14.68
Morelia	2011	1.18	1.39	4.25	18.06
	2006	0.85	0.73	3.08	9.48
	2007	0.84	0.71	3.04	9.28
	2008	0.85	0.72	3.06	9.37
	2009	0.86	0.74	3.1	9.66
	2010	0.82	0.68	2.98	8.92
Maltaraña	2011	0.85	0.73	3.08	9.50
	2008	0.46	0.21	1.65	2.71
	2009	1.39	1.92	4.99	24.91
	2010	0.56	0.31	2.0	4.02
	2011	0.43	0.19	1.56	2.42

5.3 Rosas de vientos

El análisis de los datos extrapolados a 80m de altura indica que existen sitios con un recurso eólico suficiente para la producción de energía a baja escala y a escala comercial. Tomando en cuenta la clasificación mostrada en la Tabla 11 y los resultados reportados en las Tablas 12 y 13 los sitios que presentan un recurso considerable son la Isla Clarión, Tepuxtepec, Puerto Vicente, Isla Socorro, Laguna Fresno, Tercer Mundo y Presa la Noria. La ubicación de estos sitios se puede apreciar en las Figuras 57, 58 y 59.

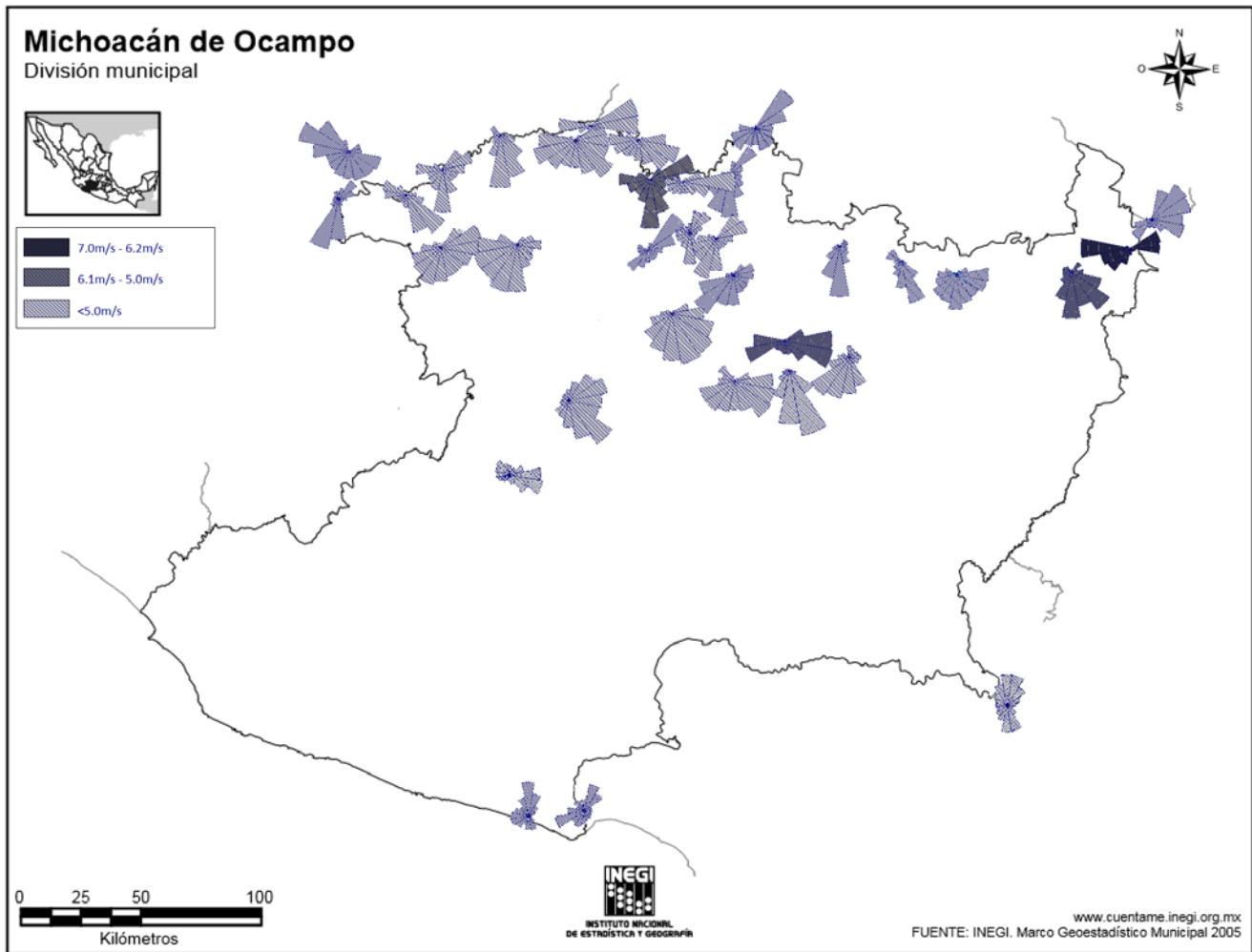
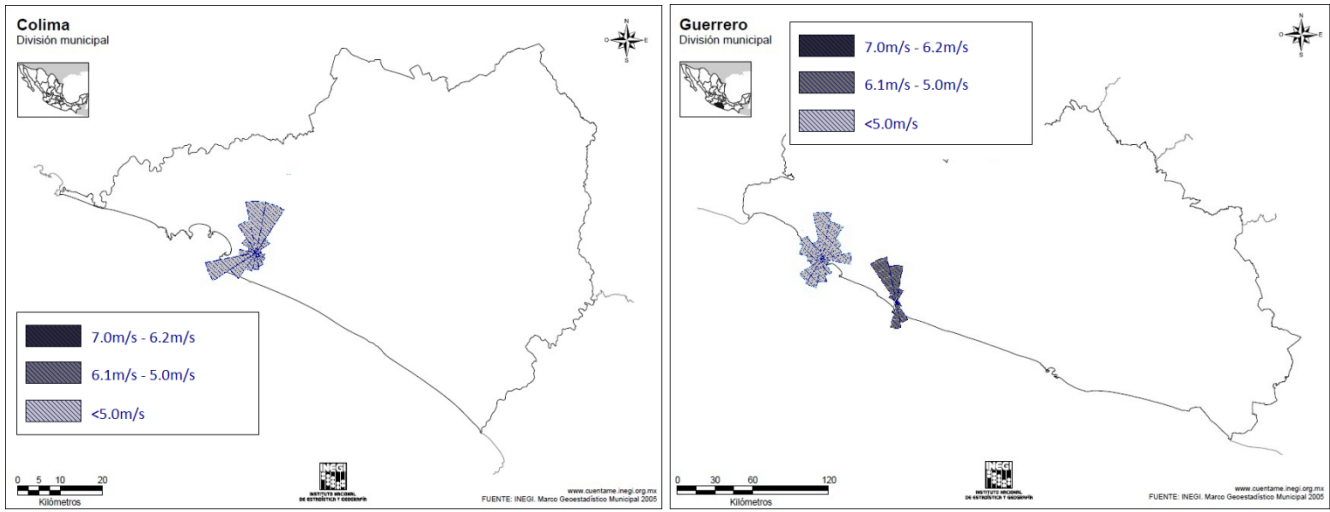


Figura 57. Rosas de vientos de las estaciones meteorológicas.

En la Figura 57 sobresalen 4 sitios con un recurso considerable. La estación Tepuxtepec presenta una velocidad de viento y una densidad de potencia media de $7m/s$ y $380W/m^2$, respectivamente. Por su parte, la estación Laguna Fresno presenta una velocidad de viento y densidad de potencia media de $5.33m/s$ y $201W/m^2$, el cual puede considerarse como un recurso adecuado para producción de energía comercial. En la Figura 58(b) se puede apreciar la ubicación aproximada de la estación Puerto Vicente que cuenta valores medios de velocidad de viento y densidad de potencia media de $5.5m/s$ y $201.5W/m^2$, respectivamente, el cual es un recurso adecuado para la generación de energía a baja escala. En esta estación se puede apreciar que hay cierta tendencia de los vientos en ambas direcciones, hacia mar adentro y hacia tierra firme.



(a)

(b)

Figura 58. Ubicación de la rosa de vientos de las estaciones: a).- Manzanillo y b).- Zihuatanejo y Puerto Vicente.

En la Figura 59 se puede apreciar las ubicación aproximada de la rosa de vientos de la estación Isla Clarión que cuenta con una velocidad de $7m/s$ y una densidad de potencia de $380W/m^2$, mientras que la estación Isla Socorro tiene una velocidad de viento y densidad de potencia de $5.42m/s$ y $206W/m^2$. Estos sitios se pueden considerar con un recurso adecuado para producción de energía a nivel comercial. Es evidente que el recurso eólico es bueno considerando que la ubicación de la estaciones es mar adentro y el factor de rugosidad es muy bajo.

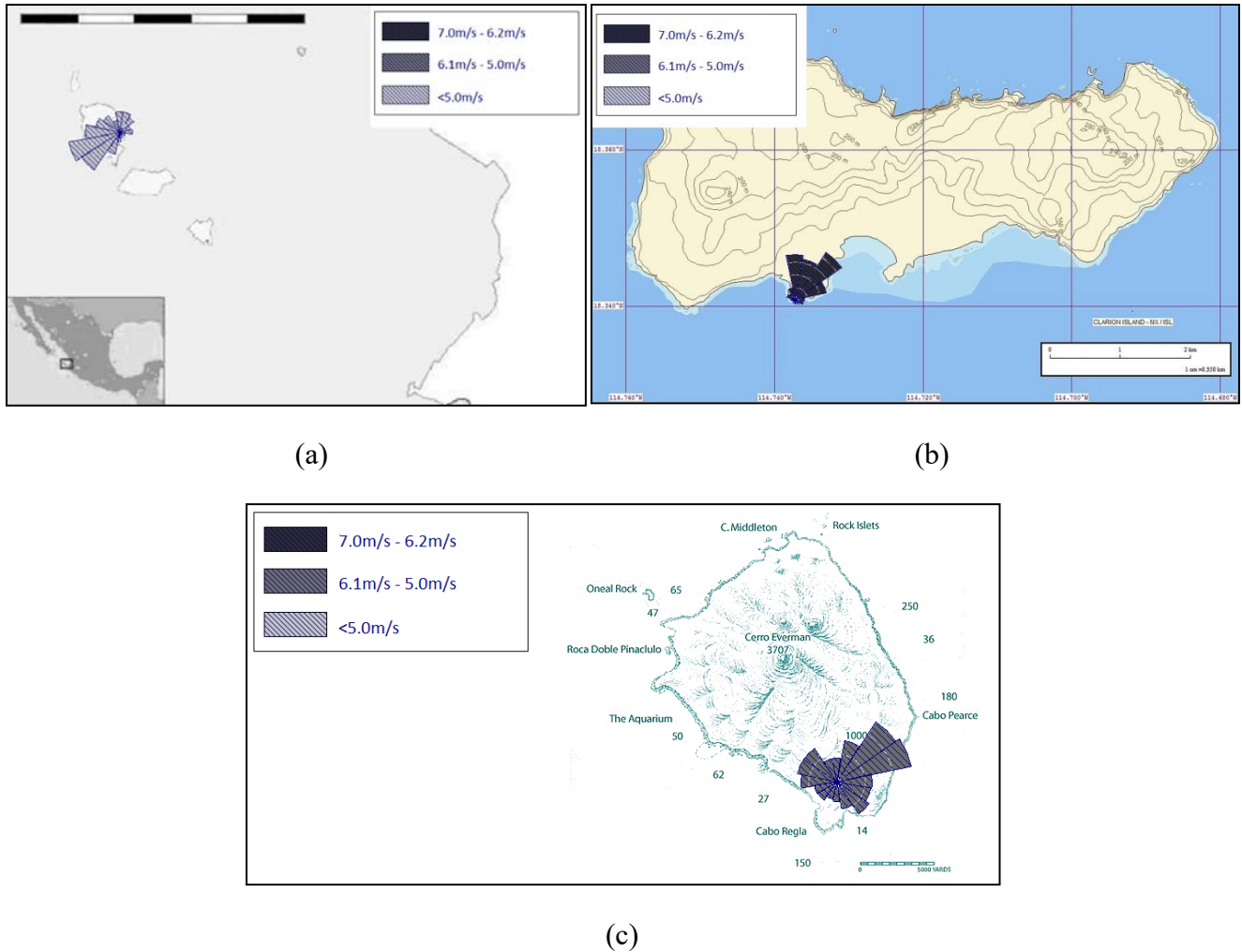


Figura 59. Ubicación de aproximada de las rosas de vientos a).- estación Isla María Madre, b).- Isla Clarión y c).- Isla Socorro.

5.4 Conclusiones

En este capítulo se presentó el análisis de los resultados de cada una de las estaciones de monitoreo del recurso eólico. Se puede apreciar que las estaciones con mayor recurso eólico son la Isla Clarión, Tepuxtepec, Puerto Vicente, Isla Socorro y Laguna Fresno. Destacan las estaciones de Isla Clarión con 7 m/s , 380.6 W/m^2 y Tepuxtepec con 6.2 m/s , 291 W/m^2 , respectivamente. Los valores de velocidad de viento y densidad de potencia medias son de clase 3 y 4 considerado como moderado y bueno respectivamente, de tal manera que se podría considerar como óptimo para la generación de energía

eléctrica a nivel comercial. La velocidad del viento y densidad de potencia media de los sitios Puerto Vicente, Isla Socorro, Laguna Fresno, se encuentran en la clase 2 y 3 considerado como escaso o moderado, el cual se considera como recurso optimo para generación eléctrica rural en lugares en donde no se cuenta con la red eléctrica. Para estas estaciones se puede observar una varianza baja por lo que se puede concluir que la frecuencia de vientos no está tan dispersa de la media. Esto se puede apreciar en los histogramas ya que presentan un gráfica acampanada.

Capítulo 6 Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se ha presentado un estudio preliminar para cuantificar el recurso eólico en el Estado de Michoacán. De esta manera se identifican sitios con un recurso eólico importante. De acuerdo al análisis de los datos extrapolados a 80m de altura sobre el nivel del suelo de cada una de las estaciones se puede concluir lo siguiente:

- En el Estado de Michoacán se cuentan con sitios con un recurso eólico considerable. Destacan las estaciones Tepuxtepec y Laguna Fresno con valores medios de velocidad de viento y densidad de potencia de $6.2m/s$, $291W/m^2$ y $5.33m/s$, $201W/m^2$, respectivamente. También las estaciones ubicadas en las islas Clarión y Socorro ubicadas en el Océano Pacífico presentan un recurso importante con valores de velocidad de viento y densidad de potencia del orden de $7m/s$, $380.6W/m^2$ y $5.4 m/s$, $206.2W/m^2$, respectivamente. Por su parte, la estación Puerto Vicente ubicada en la costa del Estado de Guerrero presenta valores de $5.5m/s$ y $201.5W/m^2$. Estas 5 estaciones presentan los valores más altos de densidad de potencia, con lo cual se pueden clasificar como sitios con un recurso de escaso a moderado según la Tabla 11.
- Con el mapa de rosas de viento se puede concluir que la dirección del viento forma una franja que corre en dirección de Este a Oeste en la Región Ciénega, en la Región Centro la dirección los vientos corre en dirección Noroeste, y la región con mayor recurso eólico ubicada en la Región Occidente, en las colindancias del Estado de Michoacán con el Estado de Querétaro y el Estado de México se forma una franja de vientos que corre del Este a Oeste y también en dirección Sur. En las islas Clarión y Socorro en ambas islas la dirección de los vientos corre en dirección Noroeste y finalmente para la estación Puerto Vicente se puede observar que el viento corre en dirección Norte.
- Los sitios con recurso sobresaliente que han sido mencionados en este trabajo deben ser estudiados de forma más detallada. Es recomendable emplazar en estos sitios anemómetros de alta calidad que permitan recobrar o corregir los resultados reportados.

- El análisis de los resultados de las estaciones ubicadas en la costa tales como Lázaro Cárdenas y Zihuatanejo indican que el recurso eólico es pobre. Sin embargo, es recomendable ubicar nuevos anemómetros en estos sitios ya que es posible que los resultados son muy pesimistas. Por ejemplo, para el caso de la estación ubicada en Zihuatanejo se observó que el instrumento de medición se encuentra ubicado dentro de la población, es decir, existen obstáculos que pueden evitar una medición adecuada del recurso.

Por otra parte, cabe mencionar que la calidad de los datos medidos presentan cierto grado de incertidumbre, por lo que los resultados reportados en este trabajo no reflejan necesariamente de forma precisa el estado del recurso eólico. Sin embargo, las bases de datos aportaron suficiente información para la realización del estudio y para realizar la clasificación de los lugares con mejor recurso eólico de manera satisfactoria. En este sentido, se recomienda verificar los resultados en trabajos futuros, que involucran la medición con equipo especializado en los sitios de interés.

6.2 Trabajos futuros

Los resultados aquí expuestos forman parte del estudio preliminar para identificar los lugares con un potencial eólico aprovechable y son el punto de partida para proyectos futuros. Los trabajos que se proponen realizar como resultados de esta tesis se presentan a continuación:

- Se propone realizar estudios más detallados en los lugares que presentan un recurso eólico considerable de tal modo que se corroboren los resultados aquí expuestos. Como estudios detallados de un lugar con recurso eólico sobresaliente se considera el conocimiento de las variaciones diurnas, nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de las ráfagas en espacios de tiempos breves y valores máximos ocurridos en una serie histórica, es importante conocer la velocidad máxima del viento, esto es importante para la selección del aerogenerador y contar con un mejor aprovechamiento de la energía eólica.
- Seleccionar un modelo de generador específico y cuantificar la producción de energía eléctrica y la disminución del nivel de contaminación por el uso de combustibles fósiles.

- Se propone la revisión y calibración de los sistemas de medición de los sitios que mostraron recurso eólico sobresaliente pero que presentaron algunas anomalías en el registro de datos, de tal manera que se elimine la incertidumbre por mal funcionamiento del sistema de muestreo. Por otra parte, se propone reubicar estaciones de monitoreo a áreas libres de obstáculos de tal manera que se tenga la certeza de que no se vea afectado el registro de datos por obstáculos y verificar la existencia de un buen recurso eólico.
- Los resultados de la evaluación preliminar expuestos en este trabajo de tesis son el primer paso para elaboración de un Atlas de vientos en el sitio de medición. Una vez analizados los datos del viento se puede crear un Atlas de viento. Este Atlas de viento regional es una descripción de los vientos respecto a las condiciones del terreno y los obstáculos más cercanos, por lo que se requieren mapas de la orografía y mapas de rugosidades del terreno de monitoreo.

Apéndice A Paquete WAsP

WAsP es un programa para extrapolación vertical y horizontal de datos estadísticos de viento. Contiene varios modelos para describir el flujo del viento sobre diferentes terrenos y obstáculos cercanos.

El programa WAsP se alimenta con cinco elementos básicos:

- **Datos del Viento:** los datos del viento en términos de dirección y velocidad deben corresponder al periodo que se desea analizar. Estos datos pueden ser promediados cada 10, 15 minutos u horarios.
- **Mapa topográfico:** el mapa topográfico requerido por el programa WAsP debe tener un formato vectorial propio del programa con extensión .MAP. Este mapa contiene las curvas de nivel de la región a analizar con el espaciamiento que se tenga disponible.
- **Mapa de rugosidad del terreno:** la rugosidad del sitio de interés se describe por medio de curvas de cambio de rugosidad, las cuales son similares a las curvas de nivel.
- **Posición geográfica del sitio de interés:** este dato es indispensable para ejecutar el programa WAsP ya que la información de la altitud se consulta directamente del mapa, de forma similar al valor de la rugosidad.
- **Lista de obstrucciones:** consiste de una lista con construcciones o árboles que afectan los valores medidos del viento.

El paquete WAsP consta de cinco bloques de cálculos principales:

- **Análisis de datos en bruto:** permite un análisis de toda la serie temporal de mediciones de velocidades de viento para proporcionar un resumen estadístico de los datos registrados. Este trabajo se lleva a cabo con una herramienta de software independiente: Observed Wind Climate Wizard (**OWC Wizard**) y el asistente de análisis climático WAsP.
- **Generación de un Atlas de datos de viento:** una vez analizados los datos de viento se puede crear un Atlas de viento. En el Atlas de viento se pueden incorporar observaciones con respecto a condiciones iniciales específicas del sitio donde se realizaron las lecturas.

- **Estimación del potencial climatológico del viento:** usando el Atlas de viento obtenido con WAsP el programa puede estimar el viento climatológico de cualquier otro punto específico por extrapolación de cálculos inversos como es usado para generar un Atlas de viento.
- **Estimación del potencial de energía eólica:** el total de energía contenida en el viento puede ser calculada por WAsP. Además puede hacer una estimación real, anual promedio de una turbina de viento proporcionando a WAsP la curva de potencia de la turbina en cuestión.
- **Cálculo de la producción de un parque eólico:** dada la curva de coeficiente de empuje de la turbina de viento y el diseño del parque eólico, WAsP puede finalmente estimar las pérdidas de cada turbina y por medio de esto la producción neta anual de energía de cada turbina.

La Figura 60 resume los tipos de análisis que se realizan utilizando el programa WAsP.

A.1 Introducción a OWC Wizard

OWC Wizard es una herramienta que produce archivos de OWC de la velocidad de viento y las mediciones de dirección. La serie de mediciones del viento y los datos de dirección se transforman en un conjunto de datos que describen las características principales del recurso eólico. Usando OWC Wizard se obtiene la velocidad promedio del viento, rosa de los vientos, diagrama de Weibull, parámetros de Weibull y la densidad de potencia

El resumen de OWC puede ser generado de uno o más archivos de datos. Cada archivo de datos los cuales pueden ser incluidos en formatos diferentes, y pueden ser recolectados con instrumentos diferentes.

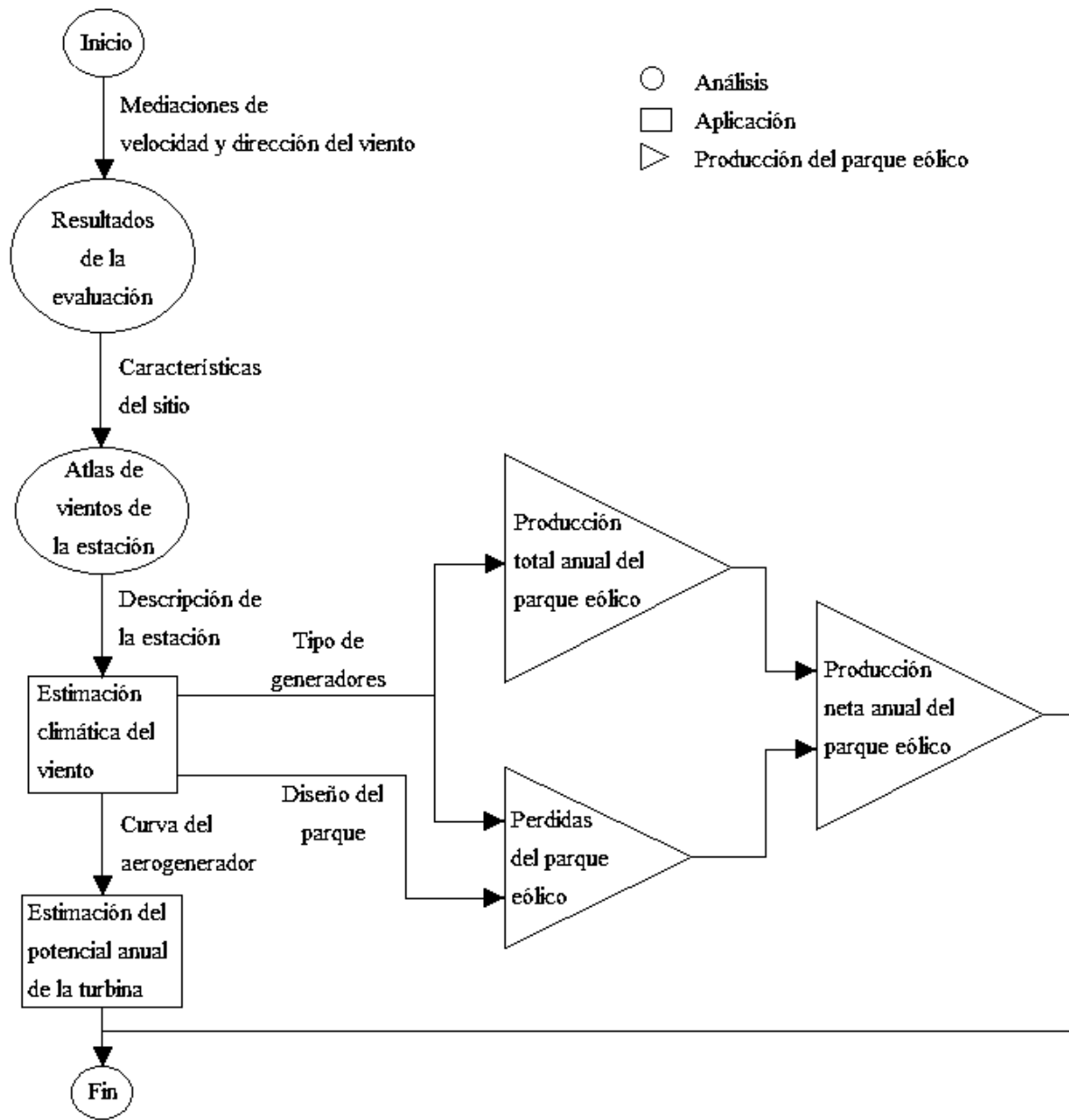


Figura 60. Tipos de análisis usando WAsP.

A.1.1 Uso de Wizard

El Wizard ha sido diseñado para ser rápido y flexible para obtener los archivos OWC. El proceso consiste en navegar a través de una serie de cuadros de dialogo secuenciales que recolectan la información requerida.

Los archivos de datos sin tratar deben ser proporcionados como archivos que solo contengan las lecturas de velocidad y dirección del viento. Los archivos obtenidos de las estaciones meteorológicas contienen otras lecturas como precipitación pluvial, temperatura, presión atmosférica, etc., por lo que se tiene que acondicionar los datos antes de ser proporcionadas a OWC Wizard.

La versión utilizada (WASP 9) puede leer una gran variedad de configuraciones de datos, siempre y cuando se adhieran a las siguientes reglas:

- Los datos deben ser organizados dentro del archivo por columnas.
- No debe haber espacios o líneas en blanco en la organización de los datos.
- Los datos contenidos en los ficheros deben estar separados uno de otro.
- Los datos puede ser separados por espacios o tabuladores finales de los marcadores de la línea.
- Puede haber varias líneas de encabezado en la parte superior del archivo.

A.1.2 Navegación a través de las ventanas de OWC Wizard

Al iniciar el asistente se mostrará una ventana como la que se muestra en la Figura 61, en donde se muestra una ventana de dialogo.

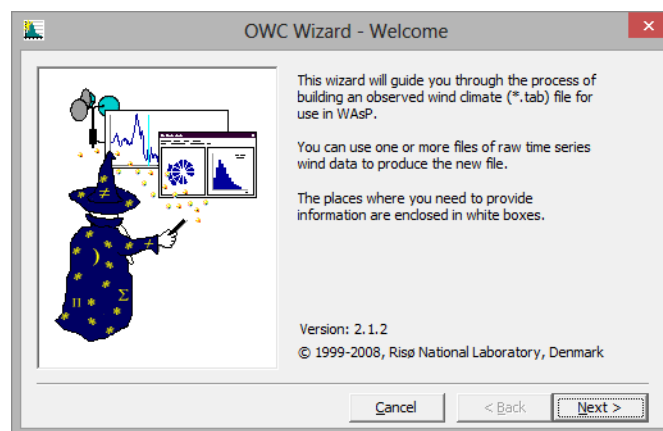


Figura 61. Bienvenida al asistente de OWC Wizard.

Antes de que cualquier dato sea aceptado, el asistente solicita información básica sobre el lugar en donde se midieron los datos. Se introduce la altura del anemómetro sobre el nivel del suelo, en donde este dato se debe proporcionar en metros. Además, se proporciona longitud y latitud del sitio ya que estos datos son requeridos por los modelos de WAsP (Véase la Figura 62).

A.1.3 Gestión de conjunto de datos

El asistente puede aceptar uno o más archivos de datos a utilizar al generar el archivo de resumen de OWC. Haciendo clic en el botón Add se mostrara un cuadro de diálogo similar a la Figura 63(a), el cual haciendo clic en el icono indicado con los puntos suspensivos ‘...’ (Véase la Figura 63(b)) permitirá navegar a través de las carpetas y seleccionar el archivo que contiene los datos sin procesar.

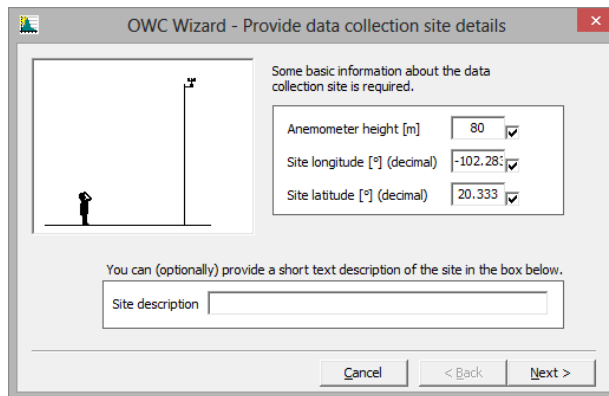
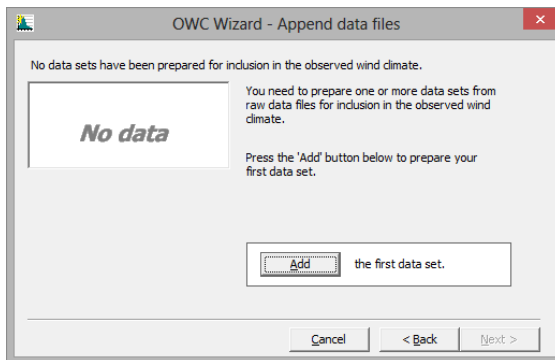
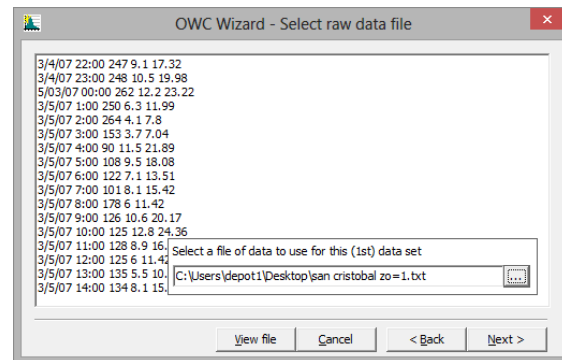


Figura 62. Especificación de los detalles del sitio.



(a)



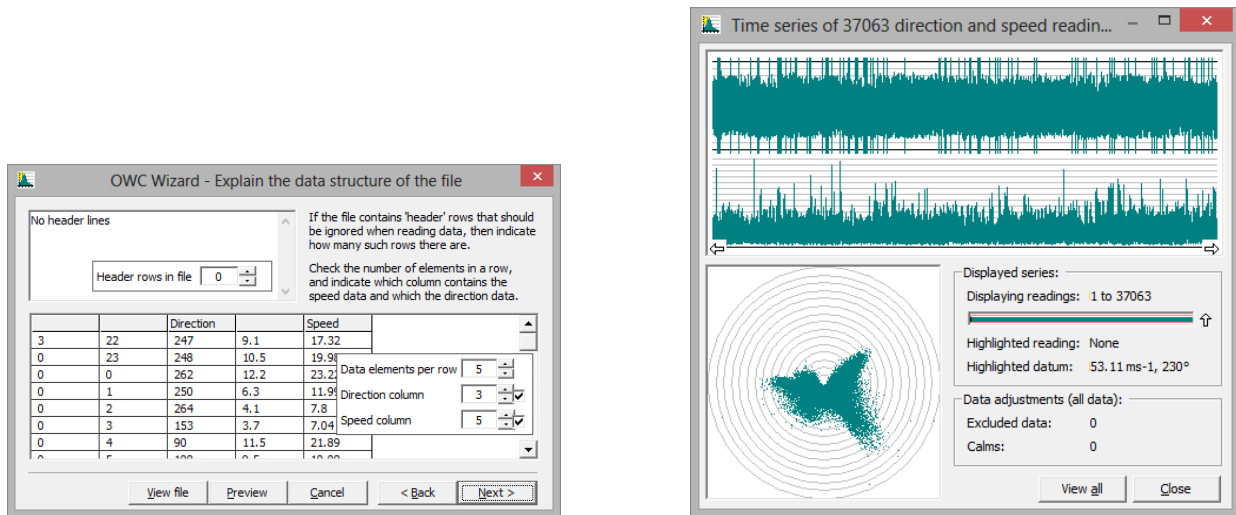
(b)

Figura 63. Especificación del archivo de datos: a).- conjunto de datos y b).- explicación del conjunto de datos.

El asistente tiene que saber cómo interpretar el contenido del archivo, por lo tanto, en la Figura 64(a) se muestra la ventana donde se indica cómo serán interpretados los datos, seleccionando la columna que corresponda a la dirección y la velocidad. En este cuadro también se indica las líneas de encabezados, los cuales serán ignorados por el asistente. Además, se debe de indicar el número de columnas contenidas en el archivo, si este es introducido de manera errónea el orden de pares de datos (dirección vs velocidad) serán incorrectos.

Una vez introducidos los datos se puede realizar una vista previa de los datos en la gráfica de velocidad vs dirección, la cual permite ver de manera clara algunas anomalías en las lecturas. De igual manera también se puede observar una grafica de dispersión polar.

El asistente realizara una estimación del número de filas que comprenden el encabezado y el número de elementos a utilizar en el análisis. En la Figura 65 se muestra desde qué posición se encuentra la primera y la última lectura de dato a utilizar.



(a)

(b)

Figura 64. Estructura de datos: a).- especificación de filas a usar y b).- representación en el tiempo.

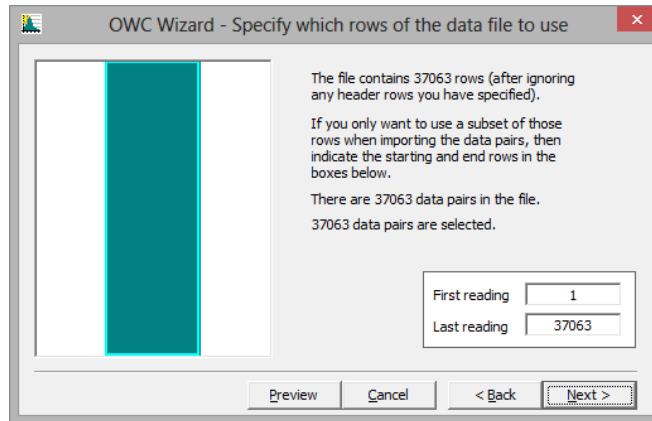
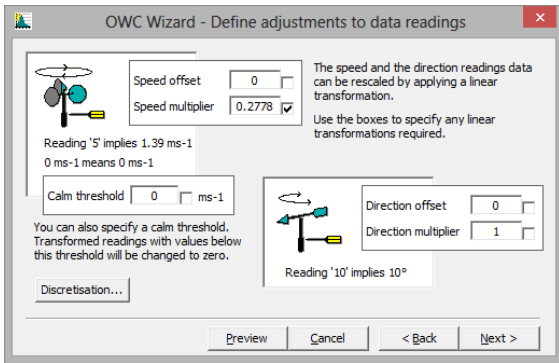


Figura 65. Especificación de las filas a usar en OWC Wizard.

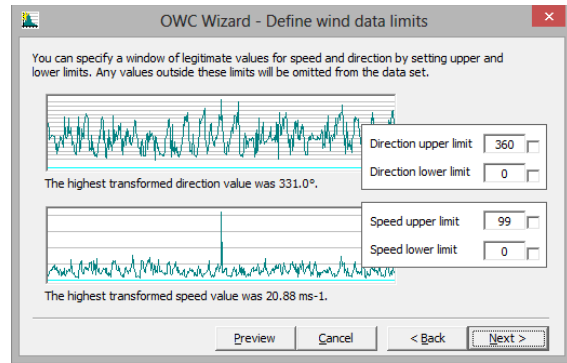
La unidad depende del instrumento con el cual se realizaron las lecturas de la velocidad y dirección, es posible que no se registren en las unidades estándar del SI. El asistente permite correcciones que deben introducirse en todos los valores de los datos.

También es posible establecer el umbral de calma en un valor diferente a 0 m/seg , cualquier lectura con una velocidad del viento igual o inferior a dicho valor se considera igual a cero ó calma (Ver Figura 66(a)). Una corrección lineal a los datos de dirección del viento se puede hacer mediante el ajuste de las cifras de dirección de desplazamiento y multiplicadores de dirección.

Algunos archivos de datos contienen lecturas con valores fuera de rango que indican condición de error. Estos valores se pueden corregir estableciendo los límites en el cuadro que se muestra en la Figura 66(b), en donde los valores que estén fuera del rango establecido simplemente serán excluidos del análisis.



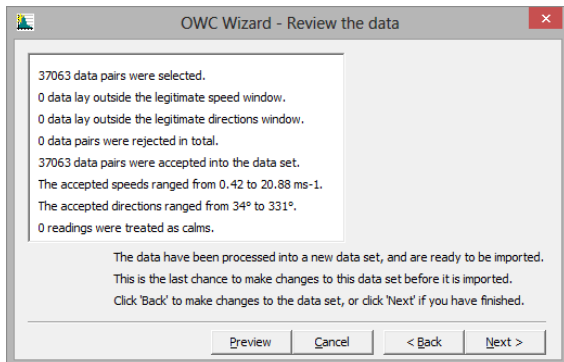
(a)



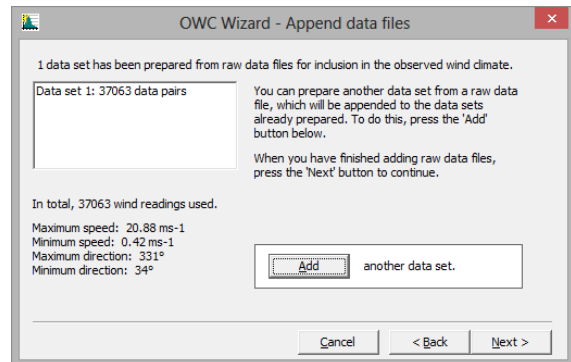
(b)

Figura 66. Ajustes de datos medidos: a).- definición de los ajustes de datos y b).- definición los límites de velocidad y dirección.

Cuando el asistente haya reunido toda la información sobre el conjunto de datos, presenta un resumen de los datos. Este cuadro de dialogo es la última oportunidad para realizar algún cambio en la configuración de datos antes de que se añadan nuevos datos. Para agregar nuevos datos se sigue el mismo procedimiento haciendo clic en Add en el cuadro de dialogo que se muestra en la Figura 67(b).



(a)



(b)

Figura 67. Ventana de revisión de datos: a).- resumen de los datos y b).- adición de Archivos.

Cuando se haya terminado de agregar el conjunto de datos, el asistente estará listo para escribir el resumen en un archivo con extensión .tab. Para esto se tiene que definir el número de sectores en el análisis como se muestra en la Figura 68. En seguida se indica el número de sectores que frecuentemente es 12 ó 16. Finalmente se le asigna la ubicación y el nombre al archivo.

Por último se muestra una ventana con los valores medios de la velocidad del viento y densidad de potencia. Se indica los valores directos a partir de la serie de datos y valores a partir de la distribución de Weibull. Estos se deben analizar cuidadosamente pues la diferencia entre estos se muestra en un porcentaje el cual debe ser pequeño. De no ser así los valores ajustados no son representativos y se debe realizar un nuevo procesamiento de los datos. La causa más probable de grandes discrepancias es que no se ha especificado correctamente los valores de discretización.

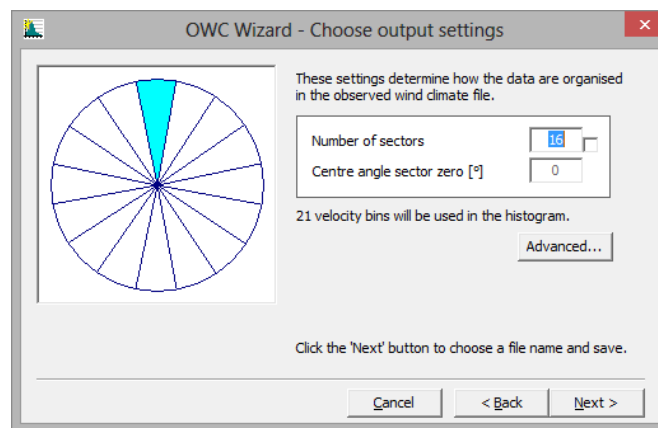


Figura 68. Elección del número de sectores en la rosa de vientos

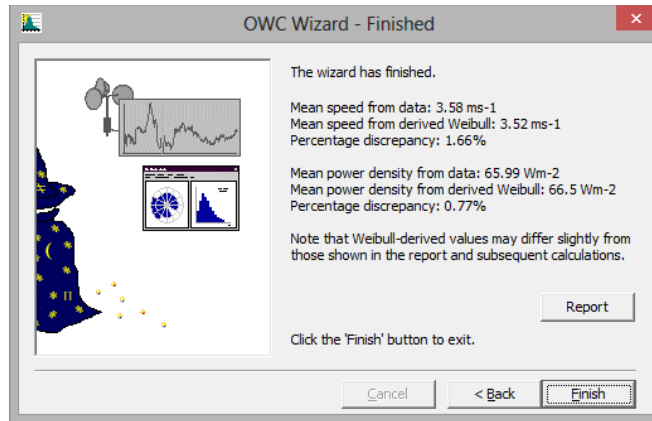


Figura 69. Valores medios de velocidad y densidad de potencia.

Se puede obtener un reporte del análisis con todas las graficas y especificaciones realizadas en el análisis seleccionando la opción “Report”, con lo cual se obtendrá un archivo .HTML.

Bibliografía

- [1] Mario Ortega Rodríguez, Energías renovables, Madrid, Ediciones PARANINFO, S.A., 2002.
- [2] Siegfried Heier, Grid integration at Wind energy conversion systems, Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] D. Elliott et al., “Atlas de Recursos Eólicos del estado de Oaxaca”, NREL, 2004
- [4] E. Cadenas y W. Rivera, “Análisis estadístico de mediciones de la velocidad del viento utilizando la técnica de valores desviados”, *Simposio de Metrología 2008*, Santiago de Querétaro, Qro., Octubre 2008.
- [5] C. Ángeles – Camacho, F. Bañuelos-Ruedas y J.F. Badillo Fuentes, “El recurso eólico en el estado de Zacatecas: Características del viento en 36 localidades”, Instituto de Ingeniería, UNAM, 2011.
- [6] Quetzalcóatl Hernández-Escobedo, Francisco Espinosa-Arenal, Ricardo Saldaña-Flores y Carlos Rivera-Blanco, “Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz, México”, *DYNA Revista de la facultad de minas-Universidad de Colombia*, Vol. 79, No.171, págs. 215-212, Febrero 2012.
- [7] Magdiel Carrasco Díaz, Reconstrucción del campo de viento para la generación de mapas de potencial eólico a lo largo de la costa del estado de Tamaulipas, México, Tesis de maestría, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Altamira, Junio 2012.
- [8] Ricardo Saldaña Flores, Ubaldo Miranda Miranda, Rubén Cariño Garay, “Estudio del potencial eoloenergético en un sitio de interés ubicado en la zona costera norte de la península de Yucatán”, *XVIII congreso Mexicano de Meteorología y III Congreso Internacional de Meteorología*, Cancún, Quintana Roo, México, Noviembre 2009.
- [9] Marlene Zamora-Machado, Elia Leyva-Sánchez , Alejandro A. Lambert-Arista, “Recurso Eólica en Baja California”, *Revista Digital Universitaria (UNAM)*, Vol. 11, No. 02, Febrero 2011.
- [10] Quetzalcoatl C. Hernández-Escobedo, Ricardo Saldaña-Flores, Jorge Andaverde-Arredondo, Francisco Manzano-Agugliaro, “Análisis de la Periodicidad del Viento con FFT en el Estado de Chihuahua, México”, *Avanzada Científica (CIGET)*, Vol. 14, No. 02, págs 23-33, Agosto 2011

- [11] CFE, Programa de obras e inversión de sector eléctrico POISE 2012-2026, 2012.
- [12] Jaime González Velasco, Energías Renovable, Barcelona, España 2009, Editorial REVERTÉ.
- [13] Asociación danesa de la industria eólica. Actualizado el 12 de Mayo 2003, fecha de consulta 29 de octubre de 2013. Manual de referencia sobre energía eólica, <http://www.windpower.org/es/stat/units.htm>
- [14] Rodríguez J.L., “Energía Eólica Guía Técnica”, Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de Innovación, Ciencia y empresa, Editorial Rueda. Disponible en http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/guia_tecnica_energia_minieolica.pdf
- [15] Pedro Fernández Díez “Energía eólica”, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 1993. Documento disponible en: <http://es.scribd.com/doc/170200262/Energia-Eolica-Pedro-Fernandez>
- [16] F. Bañuelos-Ruedas, C. Angeles-Camacho, S. Rios-Marcuello, “Analysis and Validation of the Methodology Used in the Extrapolation of Wind Speed Data at Different Heights”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2383-2391 October 2010.
- [17] Principales resultados por localidad (ITER), disponible en http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/zip/iter2010/iter_16xls10.zip
- [18] Dirección electrónica Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional, fecha de consulta 30 de Noviembre de 2013, <http://smn.cna.gob.mx/emas/catalogoa.html>, <http://smn.cna.gob.mx/emas/catalogog.html> y <http://smn.cna.gob.mx/emas/estacion.html>
- [19] Dirección electrónica Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional, <http://smn.cna.gob.mx/emas/esime.html>
- [20] NREL, “*Wind Resource Assessment Handbook*”, National Renewable Energy Laboratory, Abril 1997.
- [21] Mukund R. Patel, *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis and Operation*. 2nd ed. New York 2006, Tylor & Francis Group.