

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DEL
POTENCIAL EÓLICO EN BAJA CALIFORNIA”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA
MARLENE ZAMORA MACHADO**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. ALEJANDRO ADOLFO LAMBERT ARISTA**

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

JULIO DEL 2011

DEDICATORIA

A mi familia, especialmente a mis padres Gilberto y Reyna, que me dieron la vida y siempre me han alentado a seguir adelante, agradezco mucho su apoyo y palabras de aliento.

A Andrés por su apoyo incondicional durante toda esta etapa, por su comprensión y motivación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California por la formación que he recibido.

A mi director de tesis: Dr. Alejandro A. Lambert Arista, por todo su apoyo y colaboración durante el desarrollo de este trabajo, así como también por todas sus recomendaciones y mejoras realizadas.

A mis sinodales: Dra. Gisela Montero Alpírez, Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado, Dr. Onofre Rafael García Cueto y Dr. Héctor Enrique Campbell Ramírez, por la revisión de este trabajo y por sus sugerencias brindadas.

Al Dr. Onofre Rafael García Cueto por su apoyo con la información e interpretación meteorológica.

A Dr. Raúl Venegas (q.e.p.d.), por su ayuda con todos los aspectos de cartografía y datos geográficos.

Agradezco a mi compañera M.I Elia Leyva Sánchez por su desinteresada colaboración y apoyo.

A Comisión Nacional del Agua, por aportar la información climatológica de las seis estaciones de monitoreo que se utilizaron en el presente trabajo.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo con la beca de maestría, sin ello no hubiera concluido este trabajo.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ii
RESUMEN	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación.....	11
1.3 Objetivo.....	12
Objetivo general	12
Objetivos particulares	12
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	13
2.1 Baja California	13
2.1.1 Clima	14
2.1.2 Población	16
2.2 Circulación de la atmósfera.....	18
2.2.1 Masas de aire	21
2.2.2 Masas de aire que afectan a la república mexicana	22
2.2.3 Viento y sus características espaciales y temporales.....	22
2.2.4 Variaciones en el tiempo	23
2.3 Fenómenos meteorológicos en Baja California	24
2.3.1 Brisas de mar y tierra.....	24
2.3.2 Vientos de montaña y valle	25
2.3.3 Vientos de Santa Ana	26
2.3.4 Fenómeno de El Niño	28
2.3.5 Monzón de Norteamérica	30
3. ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO.....	32
3.1 Mapas eólicos en México.....	33
3.1.1 Parques eólicos en operación en México.....	43

3.2 Energía eólica en Baja California.....	48
3.2.1 Parques eólicos en operación.....	50
3.2.2 Parques eólicos en desarrollo	51
4. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO EN BAJA CALIFORNIA	54
4.1 Estaciones climatológicas	55
4.2 Variación de la velocidad del viento con la altura	58
4.3 Análisis estadístico de los datos de viento	60
4.3.1 Función de distribución de probabilidad de Weibull.....	60
4.3.2 Histogramas de frecuencias	62
4.3.3 Funciones de distribución de probabilidad de Weibull por estación climatológica	64
4.3.3.1 Metodología para el cálculo de las distribuciones de Weibull	64
4.4 Distribuciones temporales de la velocidad del viento.....	69
4.4.1 Metodología para la elaborar las series de tiempo de la velocidad y dirección de viento.	70
4.4.2 Distribución de la velocidad anual	71
4.4.3 Distribución de la velocidad mensual.....	73
4.4.4 Distribución de la velocidad diurna.....	74
4.4.5 Distribución de la dirección del viento anual	75
4.4.6 Distribución de la dirección del viento mensual	76
4.4.7 Distribución de la dirección del viento diurna.....	77
4.5 Rosas de los vientos	78
4.5.1 Metodología para elaborar rosas de los vientos.....	78
4.5.2 Rosas de los vientos por estación climatológica	79
4.6 Energía del viento.....	81
4.6.1 Teorema de Betz.....	84
4.7 Características de un aerogenerador de baja potencia.....	85
4.8 Cálculo de la potencia eólica para cada estación climatológica.....	87
4.8.2 Clasificación de la potencia del viento	92
4.9 Demanda de energía para un hogar rural	94
4.9.1 Cantidad de energía eólica aprovechable en cada sitio	96
4.9.2 Simulación de energía eólica.....	98

5.	SISTEMA DE INFORMACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN BAJA CALIFORNIA ..	101
5.2	Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas.....	104
5.1.1	Clima en cada zona.....	105
5.2	Distribución de la población rural.....	107
5.3	Acceso a recursos energéticos de la población rural.....	110
5.4	Visualización de mapa eólico del Estado.....	112
5.5	Influencia de la topografía del terreno en la dirección del viento.....	114
5.5.1	Rosas de los vientos mensuales por zona	116
6.	CONCLUSIONES.....	120
1.	RECOMENDACIONES	122
2.	REFERENCIAS	123
3.	APÉNDICES	127

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. 1: Países con mayor capacidad instalada de energía eólica en el mundo.	5
Tabla 2. 1: Posición Geográfica en Territorio Nacional	13
Tabla 2. 2: Distribución de la población por municipio	16
Tabla 2. 3: Distribución de la población rural en el Estado de Baja California.	17
Tabla 2. 4: Anomalías en la temperatura, con rojo se muestra anomalía cálida y en azul la fría.	29
Tabla 3. 1: Proyectos eoloeléctricos en México.	45
Tabla 3. 2: Proyectos eoloeléctricos bajo construcción.	45
Tabla 3. 3: Proyectos eoloeléctricos en desarrollo en México.....	46
Tabla 3.4: Proyectos en desarrollo en el Estado de Baja California.....	51
Tabla 3. 5: Proyectos que solicitaron interconexión internacional	52
Tabla 4. 1: Estaciones climatológicas utilizadas.....	56
Tabla 4. 2: Información de cada estación climatológica.....	72
Tabla 4. 3: Características del aerogenerador de baja potencia.....	85
Tabla 4. 4: Clases de densidad de potencia eólica a 10 m de altura de la superficie.....	92
Tabla 4. 5: Clasificación de la potencia del viento a 10 m en cada zona.....	93
Tabla 4.6: Aparatos eléctricos con los que cuenta la vivienda rural.....	95
Tabla 5. 1: Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo	104
Tabla 5. 2: Distribución de la población rural sin energía eléctrica	110

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1: Grabado egipcio de una embarcación impulsada a vela perteneciente a la época del Alto imperio, 4.500 años antes de J.C.	1
Figura 1.2: Molino de eje vertical utilizado en la antigua Persia para moler grano en los siglos próximos a nuestra Era.....	2
Figura 1.3: Antiguo molino holandés	2
Figura 1.4: Parque eólico Horns Rev, en Dinamarca uno de los parques eólicos en el mar más grandes del mundo.	3
Figura 1.5: Capacidad instalada de energía eólica en el mundo desde el 2001 al 2010.	4
Figura 1.6: Aerogeneradores instalados en diferentes partes del mundo.....	4
Figura 1.7: Tipología de rotores eólicos de eje horizontal, (Cádiz, 2004).....	7
Figura 1.8: Tipología de rotores eólicos de eje vertical, (Cádiz, 2004).....	8
Figura 1.9: Tamaño de aerogeneradores comerciales (1985-2005).....	9
Figura 1.10 Aerogenerador de eje vertical.....	9
Figura 2.1: Mapa de Baja California.....	14
Figura 2.2: Tipos de climas en Baja California	15
Figura 2.7: Esquema del lugar de origen y desplazamiento de las masas de aire que controlan el clima de la República Mexicana, (Reyes, 2001).....	22
Figura 2.8: Circulación y formación de la brisa de mar y tierra.	24
Figura 2.9: Vientos de valles y montañas.	25
Figura 2.10: Origen de los vientos de Santa Ana.....	27
Figura 2.11: Vientos de Santa Ana en Baja California.	27
Figura 2.12: Condición normal y de El Niño para Diciembre de 1997.	28
Figura 2.13: Típicas anomalías climáticas asociadas con el evento de El Niño.....	30
Figura 2.14: Conceptualización de la surgencia del Monzón de Norteamérica.	31
Figura 3.1: Pequeño aerogenerador aislado, usado en bombeo de agua.....	32
Figura 3.2: Distribución geográfica del potencial eólico en México.....	33

Figura 3.3: Potencial eólico estimado para el Estado de Oaxaca.	35
Figura 3.4: Potencial eólico estimado para los Estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo.	36
Figura 3.5: Potencial eólico estimado para el Estado de Baja California Sur.	37
Figura 3.7: Región fronteriza Occidental en el Estado de Sonora.	39
Figura 3.8: Región fronteriza Oriental en el Estado de Sonora.	40
Figura 3.9: Región fronteriza Occidental de Chihuahua.	41
Figura 3.10: Mapa eólico de México desarrollado por 3TIER.	42
Figura 3.11: Densidad de potencia del viento a 80 m de altura.	43
Figura 3.12: Capacidad instalada total en México en 2010.	44
Figura 3.13: Central eólica La Venta I, Oaxaca, México.	47
Figura 3.14: Central eólica La Venta II, Oaxaca, México.	47
Figura 3.15: Vista de la Sierra La Rumorosa.	48
Figura 3.16: Zonas propuestas por CICESE para establecer una granja eólica en la región de la Rumorosa.	49
Figura 3.17: Parque eólico La Rumora I, Baja California, México.	50
Figura 4. 1: Mapa para aplicaciones rurales en la República Mexicana (Patel, 2006).	54
Figura 4.2: Estructura de tipo torre triangular.	56
Figura 4.3: Ubicación de las estaciones climatológicas en un Modelo Digital de Elevaciones del Estado de Baja California.	57
Figura 4.4: Perfil de velocidad experimental, (Manwell, 2009).	58
Figura 4.5: Efecto en el viento con obstáculos naturales, cambio en la rugosidad del terreno, (Manwell, 2009).	58
Figura 4.6: Efectos en la velocidad, potencia y turbulencia aguas abajo de un obstáculo artificial, (Manwell, 2009).	59
Figura 4.7: Función de densidad de probabilidad de Weibull, (Patel, 2006).	61
Figura 4.8: Histograma de frecuencias relativas para la velocidad del viento en cada estación climatológica.	63
Figura 4.9: Diagrama de flujo para determinación de las distribuciones de probabilidad de Weibull.	65

Figura 4.10: Distribución anual de la densidad de probabilidad de Weibull para cada estación climatológica.....	66
Figura 4.11: Distribución mensual de la densidad de probabilidad de Weibull para cada estación climatológica.....	68
Figura 4.12: Diagrama de flujo para calcular las series de tiempo de la velocidad y dirección del viento.....	71
Figura 4.13: Series temporales de la velocidad del viento interanual para seis estaciones en Baja California.	72
Figura 4.14: Cambios estacionales en la velocidad del viento promedio mensual.....	73
Figura 4.15: Variación diurna de la velocidad del viento, para cuatro años de evaluación.....	74
Figura 4.16: Distribución interanual de la dirección del viento.....	75
Figura 4.17: Distribución mensual de la dirección del viento.	76
Figura 4.18: Distribución diurna promedio de la dirección del viento.	77
Figura 4.19: Diagrama de flujo para obtener las rosas de los vientos de cada estación climatológica.....	79
Figura 4.20: Rosas de los vientos para cada estación climatológica.	80
Figura 4.21: Turbina que aprovecha la energía cinética del viento, con una capacidad de 2 MW. La Rumorosa I, Baja California.	82
Figura 4.22: Aerodinámica de los aerogeneradores de eje horizontal.	84
Figura 4.23: Aerogeneradores de baja potencia instalados en zonas aisladas.	85
Figura 4.24: Medidas de un aerogenerador de baja potencia.....	86
Figura 4.25: Imagen de pequeña turbina de viento.....	86
Figura 4.26: Diagrama de flujo para calcular la potencia eólica durante cuatro años en cada estación climatológica.....	88
Figura 4.27: Potencia eléctrica anual por estación.....	89
Figura 4.28: Potencia estacional o mensual para cada zona.	90
Figura 4.29: Potencia horaria calculada en cada zona.	90
Figura 4.30: Histograma para la potencia eléctrica calculada en cada zona de estudio.	91
Figura 4.31: Casa ejemplo para un hogar en una localidad rural.....	94
Figura 4.32: Algunos de los aparatos que se utilizan en el hogar.....	95

Figura 4. 33: Comportamiento de la demanda eléctrica del hogar rural y energía eléctrica producidas en cada zona.	96
Figura 4.34: Comparación de producción eólica calculada con una carga propuesta.	97
Figura 4.35: Comparación de resultados entre la simulación y el cálculo de la producción de energía eólica para el año 2007.....	99
Figura 5.1: Diagrama de flujo para la creación de las diferentes capas en el SIG.....	104
Figura 5.2: Ubicación geográfica en un MDE de Baja California.....	105
Figura 5.3: Mapa de climas INEGI, y ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo. ...	106
Figura 5.4: Distribución de la población rural de Baja California, 2005 sobre un Modelo Digital de Elevaciones.	108
Figura 5.5: Vista de las seis estaciones de monitoreo.....	109
Figura 5.6: Distribución del porcentaje de EE de las localidades rurales en Baja California. ...	111
Figura 5.7: Mapa eólico en Baja California y ubicación geográfica de localidades rurales.....	113
Figura 5.8: Topografía del terreno y dirección del viento.	115
Figura 5.9: Distribución de las rosas de los vientos por mes en cada zona.	119

RESUMEN

La necesidad actual de mitigar el daño a la atmósfera por el exceso de emisiones de CO₂ ha hecho crear conciencia en la búsqueda por alternativas de fuentes renovables de energía en diversas naciones. Esta búsqueda ha llevado al desarrollo e impulso de las distintas fuentes renovables de energía como la solar, eólica, maremotriz, entre otras.

La energía eólica es la energía renovable con mayor crecimiento en el mundo por lo que su exploración se debe profundizar. Cada año se incrementa la instalación de grandes turbinas eólicas que aprovechan la energía cinética del viento para convertirla en energía eléctrica. Si se quiere realizar la instalación de grandes o pequeñas turbinas se requiere elaborar un estudio previo, para conocer el comportamiento del viento y determinar el potencial disponible en cada localidad.

En México se han realizado diversos estudios por algunas instituciones como el Laboratorio Nacional de Energía Renovables de los Estados Unidos (NREL), la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), entre otras. Estos estudios constan de mapas realizados en algunas regiones particulares del país como en Oaxaca, la zona fronteriza de Baja California, Sonora, Chihuahua y Baja California Sur.

El presente trabajo muestra el estudio en un sistema geoespacial del potencial eólico de seis estaciones climatológicas ubicadas en el Estado de Baja California: Presa Abelardo L. Rodríguez en Tijuana; Presa Emilio López Zamora en Ensenada, La Rumorosa, San Quintín, Mexicali y Bahía de los Ángeles. Los datos fueron obtenidos de Comisión Nacional del Agua (CNA) tomados a una altura de 10 m sobre la superficie, distancia mínima recomendada para la instalación de un aerogenerador de baja potencia.

Se analizó la velocidad y dirección del viento para cada una de las estaciones climatológicas. Se obtuvieron los parámetros estadísticos de Weibull, las rosas de los vientos, la densidad de potencia y la cantidad de energía eléctrica generada para una turbina de 2 m de diámetro, con el fin de ser aprovechada para aplicaciones rurales.

Se tomaron las dos variables de diámetro de la turbina 2 m y altura de 10 m de la superficie, debido al techo financiero de los aerogeneradores de baja potencia, ya que si se aumentan las dos variables se aumenta el costo del aerogenerador, y no sería tan accesible el costo para las localidades rurales.

Con los resultados obtenidos se observaron las variaciones temporales que presenta el viento en los diferentes lugares estudiados como: las brisas marinas, brisas de valle o montaña, vientos de Santa Ana, Monzón de Norteamérica y el fenómeno de El Niño. Se debe conocer el comportamiento de estos fenómenos ya que estos alteran la velocidad del viento y la producción de potencia eléctrica varía con la tercera potencia de dicha velocidad.

Se concluye que existe potencial en algunos lugares más que en otros, para ser aprovechado en aerogeneradores de baja potencia y cubrir una demanda básica de algunos aparatos eléctricos como focos, refrigerador y televisión. El lugar con excelente recurso para aplicaciones rurales es Bahía de los Ángeles, quedando en clase 3 según la densidad de potencia de la NREL, por lo que es propicia también para la instalación de aerogeneradores comerciales. Lugares como La Rumorosa y Mexicali pueden cubrir alrededor de la mitad de la demanda eléctrica básica de una casa. El resto de las zonas cubren en menor porcentaje la demanda de un hogar, pero el potencial que disponen se puede utilizar para alumbrado en los hogares.

Evaluar el potencial de generación de energía eólica en estos lugares beneficia principalmente a las localidades rurales que no disponen de energía eléctrica y que además se encuentran cerca de los lugares de evaluación. La implementación de aerogeneradores de baja potencia ayudaría a evitar extender redes de suministro eléctrico a sitios remotos y generar electricidad con cero emisiones de CO₂ a la atmósfera.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La energía eólica se ha utilizado desde las épocas más remotas, se tienen indicios de que los antiguos egipcios utilizaban la fuerza del viento para impulsar sus embarcaciones a vela en sus desplazamientos por el Nilo, Figura 1.1, (Cádiz, 1984).

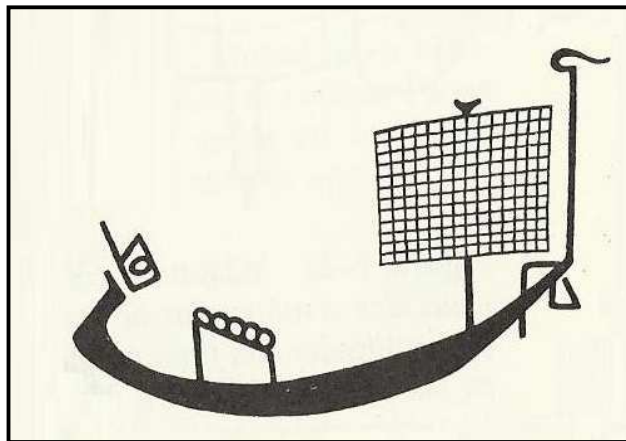


Figura 1.1: Grabado egipcio de una embarcación impulsada a vela perteneciente a la época del Alto imperio, 4.500 años antes de J.C.

El primer molino de viento de aplicaciones utilitarias que se conoce con cierto detalle es el molino persa de eje vertical. Este molino se empleaba para moler grano y fue de uso común en las planicies de Sijistan, en la antigua Persia, (Cádiz, 1984).

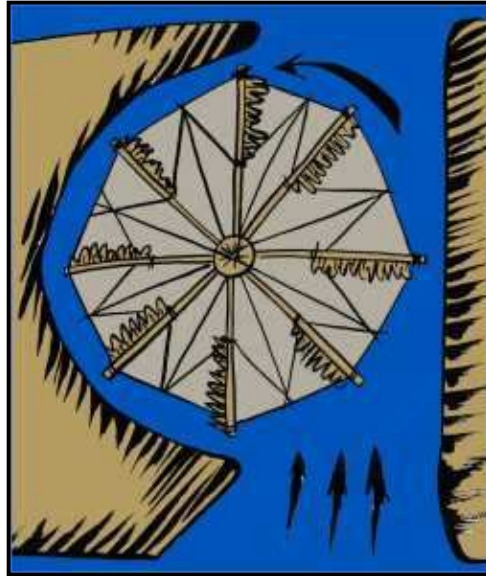


Figura 1.2: Molino de eje vertical utilizado en la antigua Persia para moler grano en los siglos próximos a nuestra Era.

Los antiguos molinos de viento ya capturaban la energía cinética del aire en movimiento con un rotor aerodinámico de pocas aspas y eje de rotación horizontal (Borja, 2005).



Figura 1.3: Antiguo molino holandés

Hoy en día se aprovecha la única forma de energía mecánica que puede ser extraída del viento y convertirse en trabajo útil; la energía cinética, ésta se utiliza para generar energía eléctrica con aerogeneradores de distintos tamaños, y que han ido mejorando con el avance creado de la tecnología.



Figura 1.4: Parque eólico Horns Rev, en Dinamarca uno de los parques eólicos en el mar más grandes del mundo.

<http://www.hornsrev.dk/index.en.html>

La gran cantidad de emisiones de CO₂ que cada año se emiten a la atmósfera y que contribuyen en gran medida al calentamiento global, hace que cada vez más países se sumen a la producción de energía eléctrica con cero emisiones.

La capacidad instalada de energía eólica en el 2010 mostró una tasa de crecimiento de 23.6 % en el mercado. La asociación Mundial de Energía Eólica (World Wind Energy Association) publicó para este año, la información actualizada de las infraestructuras eólicas instaladas en todo el mundo, sumando una capacidad total de 196 630 MW (WWEA, 2010). En la Figura 1.5, se muestra el crecimiento desde el 2001 en capacidad instalada mundial de energía eólica.

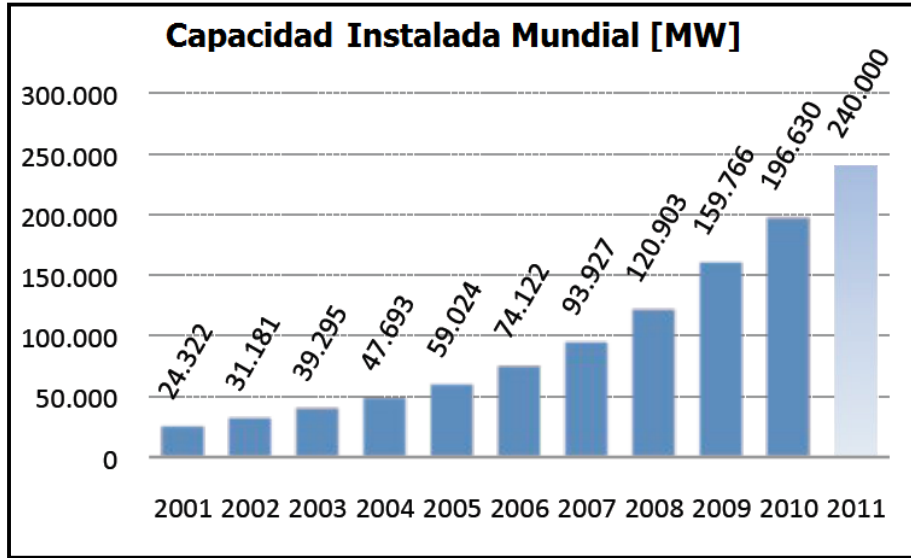


Figura 1.5: Capacidad instalada de energía eólica en el mundo desde el 2001 al 2010.
http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_s.pdf

Todos los aerogeneradores instalados a nivel mundial a finales del año 2010 contribuyen potencialmente en 430 TeraWh al suministro de electricidad en todo el mundo, lo que representa un 2.3 % en la demanda de electricidad global (WWEA, 2010).



a) Nueva Zelanda, 2005.

b) Alemania, 2005.

c) Estados Unidos, 2003.

Figura 1.6: Aerogeneradores instalados en diferentes partes del mundo.
http://www.wind-works.org/photos/wind_farm.html

En la Tabla 1.1 se enlistan los países que encabezan en el 2010 la generación instalada de energía eoloeléctrica en el mundo.

Tabla 1. 1: Países con mayor capacidad instalada de energía eólica en el mundo.

	País	Capacidad instalada [MW]
1	China	44,733.00
2	USA	40,180.00
3	Alemania	27,215.00
4	España	20,676.00
5	India	13,065.80
6	Italia	5,797.00
7	Francia	5,660.00
8	Inglaterra	5,203.80
9	Canadá	4,008.00
10	Dinamarca	3,734.00
11	Portugal	3,702.00
12	Japón	2,304.00
13	Holanda	2,237.00
14	Suecia	2,052.00
15	Australia	1,880.00
16	Irlanda	1,428.00
17	Turquía	1,274.00
18	Grecia	1,208.00
19	Polonia	1,107.00
20	Austria	1,010.60
21	Brasil	920
22	Bélgica	886
23	Rumania	591
24	Egipto	550
25	México	521

Fuente: WWEA

http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_s.pdf

México se sumó a los países en producción de energía eoloeléctrica teniendo el lugar número 25 para el año 2010 (WWEA, 2010), gracias a la entrada en operación de los parques eólicos en Oaxaca y Baja California, (AMDEE, 2011).

El aerogenerador es una máquina que aprovecha la energía cinética del viento para convertirla en trabajo mecánico generalmente para dos fines:

- Accionamiento de un aerogenerador eléctrico para la producción de electricidad.
- Utilización directa, como trabajo mecánico para el accionamiento de una máquina operadora. Un ejemplo sería el generador eólico para mover una bomba de agua. (Villarubia, 2004)

Existen diversos tipos de aerogeneradores que para efectos prácticos se clasifican en:

- Máquinas de eje horizontal, en las que el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento, de forma similar a la de los clásicos molinos de viento.
- Máquinas de eje vertical, en las que el eje de rotación es perpendicular a la dirección del viento.

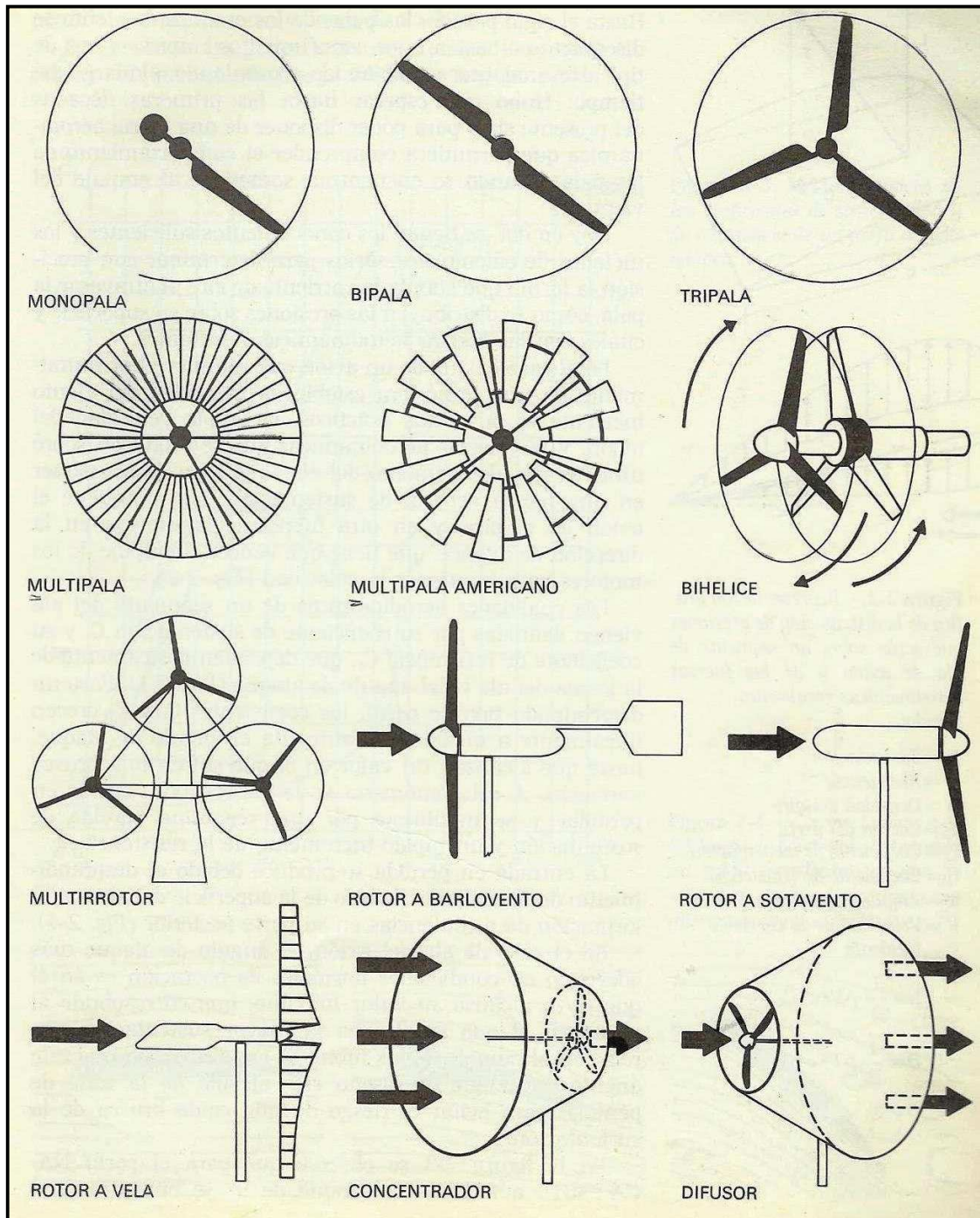


Figura 1.7: Tipología de rotores eólicos de eje horizontal, (Cádiz, 2004).

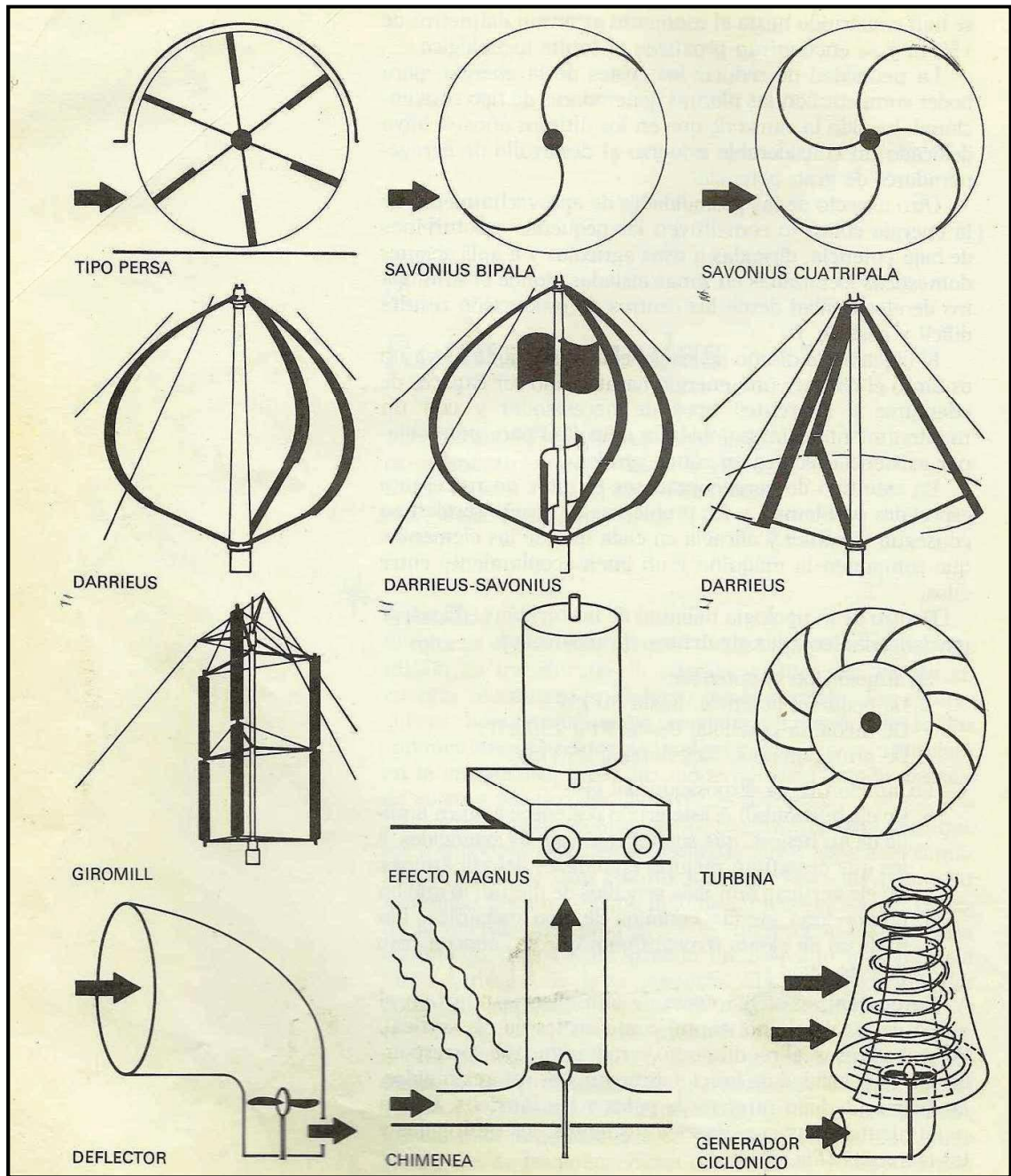


Figura 1.8: Tipología de rotores eólicos de eje vertical, (Cádiz, 2004).

Con el desarrollo de nueva tecnología el hombre ha creado máquinas eólicas cada vez más robustas que aprovechan en mayor cantidad la energía del viento.

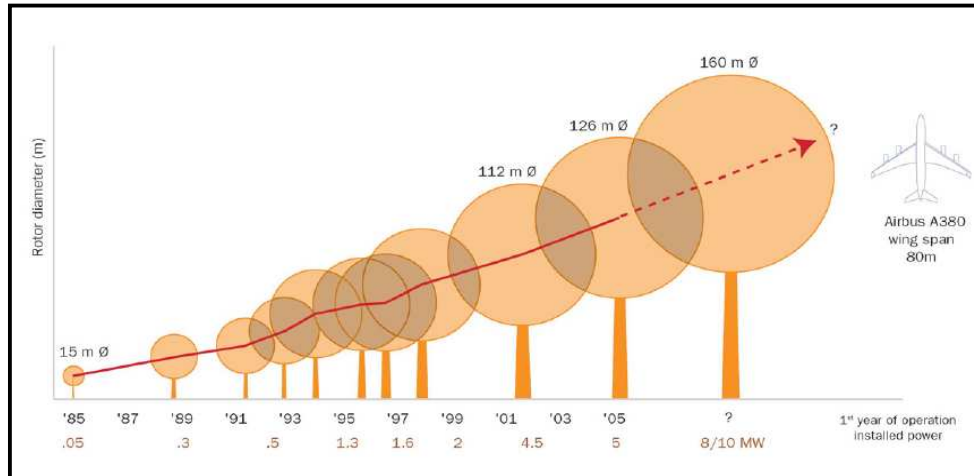


Figura 1.9: Tamaño de aerogeneradores comerciales (1985-2005).
<http://www.lec.ethz.ch/education/focus/wind-background>



Figura 1.10 Aerogenerador de eje vertical.

Actualmente, los aerogeneradores que más se utilizan son los de eje horizontal. Los de eje vertical son muy poco utilizados, sólo se emplean en algunas aplicaciones muy específicas de baja potencia y muchos de los mismos están en fase experimental (Villarubia, 2004).

1.2 Justificación

En los últimos años se ha generado gran interés en el Estado de Baja California por promover la eficiencia energética y aprovechar las fuentes de energía existentes. El Plan Estatal de Desarrollo 2008-2013 que se sustenta en los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012, dan importancia a la energía para el desarrollo regional sostenible y representa una nueva búsqueda de nuevos esquemas de energía eléctrica, ya sea con infraestructura actual o con el uso de las fuentes renovables de energía.

Por tal motivo, la gestión gubernamental del Estado promovió la creación de la Comisión Estatal de Energía de Baja California el 25 de julio del 2008, para impulsar el uso de las fuentes renovables de energía (Plan Estatal de Desarrollo 2008-2013, Desarrollo sustentable). Una de las principales acciones de la Comisión Estatal de Energía es el impulso del primer parque eólico, La Rumorosa I con una capacidad de 10 MW. Con esta energía se dejarán de emitir 17 toneladas de CO₂ a la atmósfera (Comisión Estatal de Energía, 2009).

Según el Plan Estatal de Desarrollo 2008-2013 el uso de fuentes convencionales en el sector energético del Estado continuará en los siguientes años y se fomentará el uso de energía a partir de fuentes eólicas, solares e hídricas.

Se sabe que existe potencial eólico en el Estado de Baja California por la elaboración de mapas eólicos, pero no se ha elaborado una base de datos para aplicaciones a menor escala. Principalmente que informe la cantidad de energía que puede ser aprovechada para la instalación de un aerogenerador de baja potencia.

A partir de este trabajo se tendrá información para beneficiar a hogares que no disponen de energía eléctrica y que estén cerca de regiones donde hay recurso eólico. En Baja California existen 10,260 hogares que no disponen de energía. Este estudio es importante porque podría ayudar en la toma de decisiones para proyectos futuros de electrificación rural con energía eólica.

1.3 Objetivo

Objetivo general

Elaboración de un sistema geoespacial que contenga información de los lugares con potencial eólico alto, es decir con velocidades de viento con promedio alto y muestre dicho potencial eólico en la geografía del Estado de Baja California, para ayudar en la toma de decisiones de proyectos futuros de electrificación rural.

Objetivos particulares

- Identificar zonas con potencial eólico en el Estado.
- Crear una base de datos geográficas de las localidades rurales y disposición de energía.
- Valoración del potencial eólico a menor escala.
- Relacionar la intensidad de viento con los diversos fenómenos que alteran la circulación atmosférica en la región.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Baja California

El Estado de Baja California está situado en el noroeste de la República Mexicana, su capital es la ciudad de Mexicali y sus cabeceras municipales son Ensenada, Tecate, Tijuana, Mexicali y Playas de Rosarito.

Tabla 2. 1: Posición Geográfica en Territorio Nacional

			Colindancia
Al Norte:	Latitud	32° 42' N	Arizona, Estados Unidos.
	Longitud	114° 43' O	
Al Sur:	Latitud	32° 32' N	California, Estados Unidos.
	Longitud	117° 7' O	
	Latitud	28° 0' N	Baja California Sur y Golfo de California.
	Longitud	112 ° 46' O	
	Latitud	28° 0' N	Baja California Sur y Océano Pacífico.
	Longitud	114° 11' O	

El porcentaje territorial es de 3.7 % de la superficie del país, que corresponden a 71, 446 km² de extensión territorial. (INEGI, 2010)



Figura 2.1: Mapa de Baja California

<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/bc/bc.pdf>

2.1.1 Clima

Los climas predominantes en el Estado son seco templado y muy seco semicálido. En las costas del Golfo de California se presenta la menor incidencia de precipitación del país, en particular en la zona del delta del río Colorado, con registros medios anuales cercanos a los 40 mm. La presencia de altitudes importantes a lo largo de la cadena montañosa de Juárez y San Pedro Mártir condiciona climas templados y semifríos, ambos subhúmedos en las cimas y mesetas altas. (INEGI, 2011)

A continuación se muestra la descripción por zonas climáticas del Estado:



Figura 2.2: Tipos de climas en Baja California

<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/bc/clim.cfm?c=444&e=03>

Seco Templado. Se concentran en la zona noroeste del Estado, desde la ciudad de Tijuana hasta las orillas de la sierra San Pedro Mártir, por lo que las altitudes van desde el nivel del mar hasta casi los 2000 msnm. La temporada lluviosa es en el invierno, la temperatura anual oscila entre los 14 y 18 °C.

Templado subhúmedo con lluvias en invierno. Se da en las zonas altas de las sierras de Juárez y de San Pedro Mártir, en donde la precipitación excede la evaporación y el suelo permanece húmedo la mayor parte del año. Este tipo de clima ha permitido el establecimiento de bosques de pino y táscate en dichas áreas. La temperatura media anual oscila entre los 12 y 18 °C.

Clima muy seco templado. Se localiza en las costas orientales que no son afectadas por los vientos moderadamente húmedos del suroeste, presentan este tipo de clima con régimen de lluvias en verano.

Climas muy secos. Se presenta, en la costa del Golfo de California y Delta del Río Colorado, se caracterizan por presentar temperaturas medias anuales cercanas a los 23 °C y precipitaciones mucho menores a los 40 mm anuales. Las áreas dentro del Estado que presentan estos climas son las que se encuentran cercanas al desierto de Altar en Sonora, que resultan las más secas del país.

El clima semifrío subhúmedo con lluvias en invierno, transicional hacia los climas fríos que sólo se encuentra en nuestro país en regiones montañosas muy altas. En el caso de Baja California, se encuentra en las partes más altas de las sierras de Juárez y San Pedro Mártir. Se caracteriza por contar con una temperatura media anual de 10 °C.

2.1.2 Población

En Baja California la población al año 2005 fue de 2, 844, 469 habitantes, 49.67 % son mujeres y 50.33 % son hombres. Concentrándose el 91.3 % de la población en las principales ciudades del Estado como Mexicali, Tecate, Tijuana, Playas de Rosarito y Ensenada. (INEGI, 2005). En la Tabla 2.2 se muestra la distribución de población por municipio.

Tabla 2. 2: Distribución de la población por municipio

	Población/Habitante
Ensenada	413,481
Mexicali	855,962
Playas de Rosarito	73,305
Tecate	91,034
Tijuana	1,410,687
TOTAL	2,844,469

Fuente: II Censo de Población y vivienda INEGI, 2005.

La población rural en el Estado de Baja California se encuentra entre 1 y 15 000 habitantes, se distribuye como lo muestra la Tabla 2.3.

Tabla 2. 3: Distribución de la población rural en el Estado de Baja California.

MUNICIPIO	Localidades rurales por municipio	Loc. con menos de 3 viviendas	Hogares por municipio sin EE
ENSENADA	445	1,270	3,140
MEXICALI	561	1,116	1,632
PLAYAS DE ROSARITO	62	56	471
TECATE	121	312	736
TIJUANA	153	263	4,281
TOTAL	1,342	3,017	10,260

EE: Energía Eléctrica

Fuente: II Censo de Población y vivienda INEGI, 2005.

En Baja California existen 10,260 hogares que no disponen de energía eléctrica, el desarrollo de fuentes alternas de energía, como la eólica juega un papel muy importante. Ya que al conocer la ubicación del potencial eólico, podría beneficiar a muchas localidades a tener energía eléctrica, que por su ubicación geográfica en sitios remotos e inalcanzables para las redes eléctricas, no tienen abastecimiento de energía.

En la sección 2.1 se mostró las colindancias geográficas del Estado de Baja California, así como los diversos tipos de climas y la distribución de la población. En la sección 2.2 y 2.3 se verá la circulación atmosférica, características especiales y temporales del viento, así como algunos fenómenos meteorológicos que se presentan en el Estado, y que influyen en el comportamiento del viento.

2.2 Circulación de la atmósfera

La circulación de la atmósfera está definida como el movimiento promedio de todas las fuerzas que actúan en la atmósfera de la Tierra. Algunas fuerzas serán más importantes que otras, dependiendo de la escala temporal y espacial del fenómeno que se quiera estudiar. Si los vientos resultantes son promediados en períodos de tiempo, del orden de varias semanas o meses, las perturbaciones que varían rápidamente, tales como los fenómenos de escala local (brisas marinas, vientos de montaña, etc.), de mesoescala (tormentas convectivas) y sinópticos (ciclones extra-tropicales y huracanes), serán filtrados y sobresaldrán sólo aquellas características que varían lentamente a lo largo de un año y que tienen una escala espacial de varios miles de kilómetros, con periodos de duración de varias semanas o meses, dando lugar a lo que se conoce como circulación general de la atmósfera (Reyes, 2001).

Hablando en términos generales, se puede decir que la atmósfera de la Tierra está compuesta de celdas en las que ocurre el calentamiento, el enfriamiento y la mezcla de éstas. En ambos lados del ecuador existen áreas tropicales en donde se produce el calentamiento máximo; en los polos ocurre el enfriamiento máximo; y entre las celdas tropicales y polares, existen las zonas templadas donde ocurren mezclas y modificaciones de masas de aire. (Servicio de Extensión Petrolera, 1982). En la Figura 2.3 se muestra la circulación general de la atmósfera para el mes de enero y en la Figura 2.4 para el mes de julio.

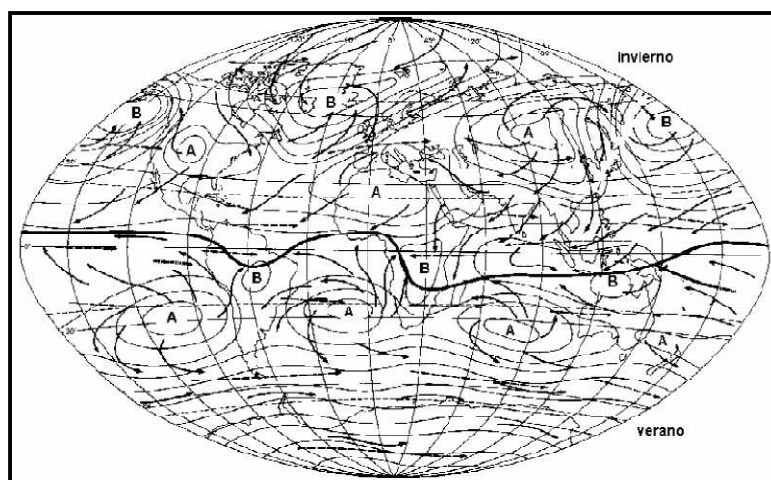


Figura 2.3: Esquema de la circulación general de la atmósfera para el mes de enero (Invierno del hemisferio norte), (Reyes, 2001).

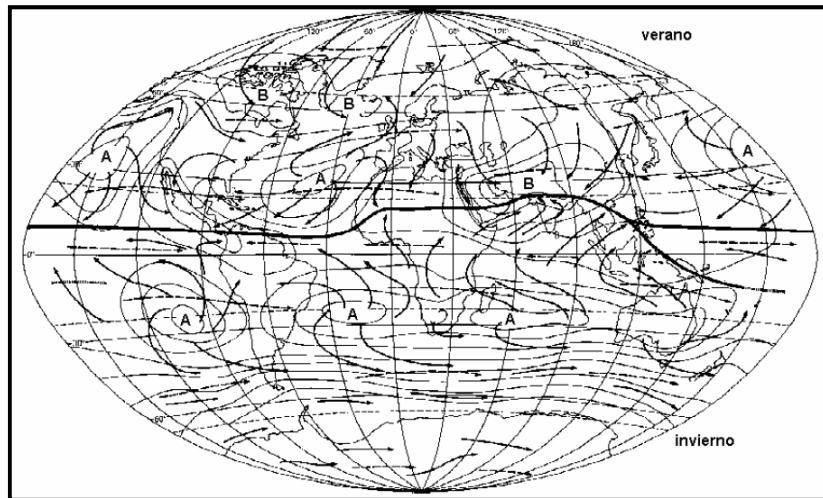


Figura 2.4: Esquema de la circulación general de la atmósfera para el mes de julio
(Verano del hemisferio norte), (Reyes, 2001).

En la Figura 2.5 se muestra un esquema simplificado de la circulación general del aire alrededor de la tierra en rotación.

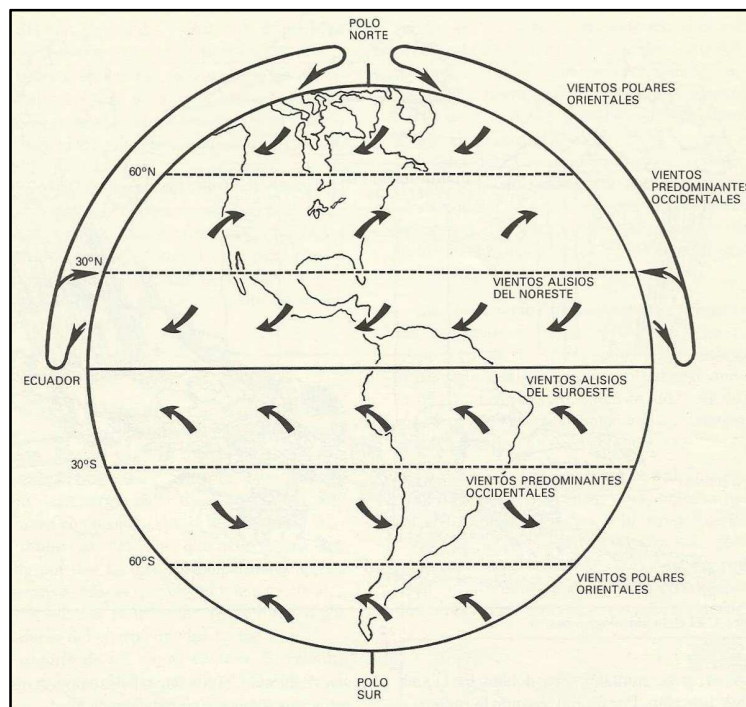


Figura 2.5: Circulación general del aire alrededor de la tierra en rotación.

El comportamiento del viento refleja los efectos que los diversos fenómenos físicos ejercen sobre el aire. A medida que el aire se calienta, éste se expande, volviéndose menos denso y ejerciendo menos presión en un volumen dado. Siguiendo el camino de menor resistencia, el aire fluye desde áreas de alta presión hacia las de baja presión. Cuando el movimiento del aire avanza en dirección horizontal, surge el *viento*, y su velocidad es mayor en áreas de gradientes de presión fuertes o pronunciados, (Servicio de Extensión Petrolera, 1982).

Dentro de la circulación atmosférica se debe considerar el movimiento de fuerzas que se define como la fuerza de Coriolis, Figura 2.6. En el hemisferio norte un cuerpo sigue una trayectoria curvada hacia la derecha, mientras en el hemisferio sur, la trayectoria curvada que sigue el cuerpo es hacia la izquierda. Esto se debe a la rotación misma de la Tierra.

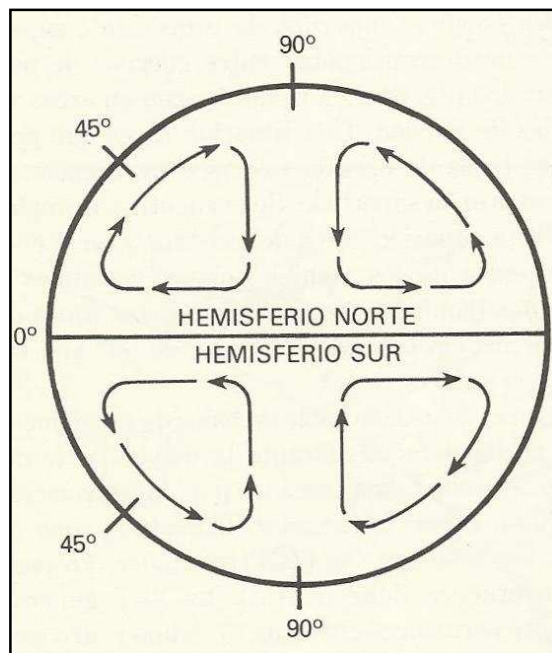


Figura 2.6: Efectos de la fuerza de Coriolis sobre las masas en movimiento.

2.2.1 Masas de aire

Las masas de aire son aquellos cuerpos de aire con características horizontales homogéneas de temperatura, viento y humedad. Estas características las adquieren en la región donde se forman, para después modificarlas conforme se desplazan en distintas regiones continentales o marítimas. Las masas de aire pueden cubrir miles de kilómetros cuadrados en la horizontal, pero sólo pueden extenderse unos cuantos kilómetros en la vertical (Reyes, 2001).

De acuerdo con Reyes (2001) las características que presentan las masas de aire son las siguientes:

- a. Volumen considerablemente grande;
- b. Debe permanecer un tiempo suficientemente largo sobre una determinada región (oceánica o continental) para que adquiera las propiedades de temperatura y humedad que caracteriza a esa región;
- c. Conforme se aleja de la región donde se formó, va intercambiando calor, masa y energía con el suelo y otras masas de aire, de tal manera que se van modificando y simultáneamente modifica a otras masas de aire y regula al clima regional.

Se considera homogénea en el plano horizontal, particularmente en sus parámetros de temperatura y humedad. Las masas de aire pueden ser de origen ártico (A), polar (P) o tropical (T) de acuerdo con la latitud, y pueden ser marítimas (m) o continentales (c) de acuerdo a la superficie donde se formen. Combinando estas características, se pueden obtener seis categorías de masa de aire: (Am, Ac, Pm, Pc, Tm, Tc) (Reyes, 2001).

2.2.2 Masas de aire que afectan a la República Mexicana

La región noroccidental de México es principalmente afectada por masas de aire polar marítimo de Pacífico; la región norte recibe una considerable influencia de las masas de aire polar continental de Alaska y Canadá; la región oriental y suroriental recibe una fuerte influencia de las masas de aire tropical marítimo del golfo de México; el mar del Caribe y el Atlántico y la región occidental y sur de México, es principalmente afectada por las masas de aire marítimo originadas en el Pacífico tropical, Figura 2.7. La influencia de estas masas de aire sobre el continente, moduladas por las características fisiográficas, dan lugar a los diferentes climas dentro del país.

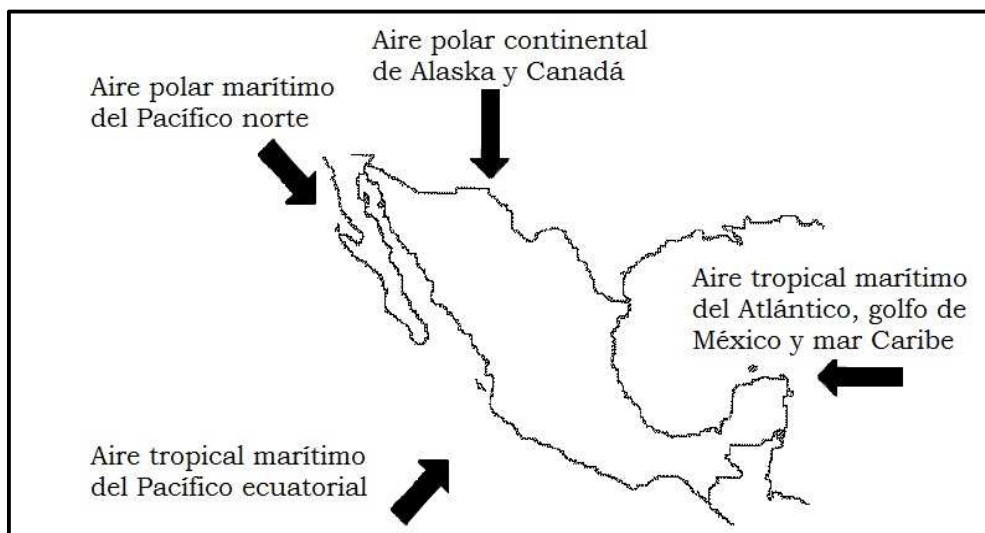


Figura 2.3: Esquema del lugar de origen y desplazamiento de las masas de aire que controlan el clima de la República Mexicana, (Reyes, 2001).

2.2.3 Viento y sus características espaciales y temporales

La radiación que llega del Sol a la Tierra es la fuente principal de energía para la generación de los fenómenos naturales en la atmósfera, en los océanos y, en general, para la vida en la tierra (Reyes, 2001). El viento se genera por la diferencia de temperaturas en la superficie terrestre, creando los movimientos de grandes masas de aire, y con esto la fuerza necesaria para producir trabajo.

La circulación del viento varía en el tiempo del orden de segundos a meses y en el espacio entre los metros y los kilómetros. Las variaciones del viento en tiempo y espacio dependen de la altura, y de las condiciones geográficas locales y globales. La generación de energía eólica depende a su vez de éstas, ya que depende directamente de la velocidad del viento. (Manwell, 2009).

2.2.4 Variaciones en el tiempo

Las variaciones de la velocidad del viento son divididas en las siguientes categorías:

- Interanual.
- Anual.
- Diurno.
- A corto plazo como son ráfagas y turbulencias.

Las *variaciones interanuales* ocurren en una escala de tiempo de más de un año, pueden tener gran efecto sobre la producción de turbinas eólicas a largo plazo.

Las *variaciones anuales* son variaciones significativas en la velocidad del viento promedio, ya sea estacional o mensual, son comunes en la mayor parte del mundo. Existen regiones donde la velocidad máxima del viento se presenta en invierno como la región Oriental de los Estados Unidos, y otras donde en la primavera se produce el máximo como el Sur de California.

Las *variaciones diurnas* también pueden ocurrir en una escala de tiempo diurno o diario. Este tipo de variaciones en la velocidad del viento se debe a la diferencia de la superficie de la tierra durante el ciclo de radiación diaria.

Las *variaciones a corto plazo* como las ráfagas y turbulencias, por lo general significan variaciones en intervalos de tiempo de diez minutos o menos. Se suelen determinar utilizando una frecuencia de muestreo de 1 segundo. Tienen carácter estocástico y se considera que representan las turbulencias, (Manwell, 2009).

2.3 Fenómenos meteorológicos en Baja California

Baja California se ve influenciada por las masas de aire polar marítimo del Pacífico norte, la gran extensión territorial del Estado y las altas montañas hacen que tenga diferentes tipos de clima. Eso hace que se presenten diversos fenómenos meteorológicos tanto de escala planetaria como de escala local.

2.3.1 Brisas de mar y tierra

A lo largo de regiones costeras, en extensiones territoriales del orden de 50 a 100 km, el viento puede soplar del mar hacia la costa durante el día, mientras que en la noche la circulación de los vientos se invierte, definiendo el fenómeno conocido como brisas marinas durante el día y brisas terral durante la noche, (Reyes, 2001).

Durante el día, sobre la tierra el aire se calienta más y con mayor rapidez, mientras sobre el mar, el aire se calienta más lentamente. Todo esto favorece que la densidad del aire sobre la tierra sea menor que sobre el mar, lo que condiciona una condición baroclínica y se genere la circulación de los vientos. Durante la noche, la condiciones de densidad y circulación se invierten, aunque con menores gradientes horizontales y relativamente débiles circulaciones de vientos, (Reyes, 2001). En la Figura 2.8 se observa la circulación de las brisas marina y terral.

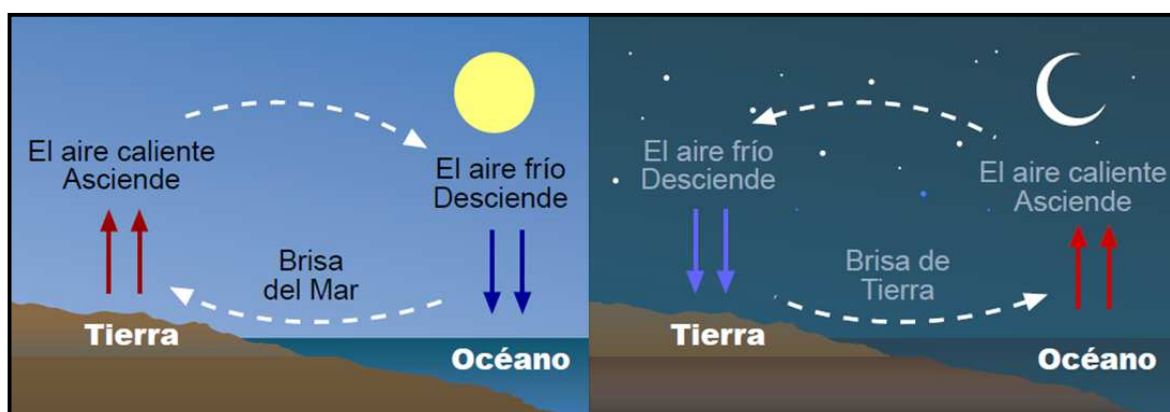


Figura 2.4: Circulación y formación de la brisa de mar y tierra.

2.3.2 Vientos de montaña y valle

Cuando las condiciones de escala sinóptica son de relativa calma y no se tienen grandes concentraciones de nubosidad, las condiciones del viento estarán principalmente afectadas y controladas por el calentamiento local, generándose las circulaciones de viento de montaña y valle, con un ciclo diario muy bien definido, (Reyes, 2001).

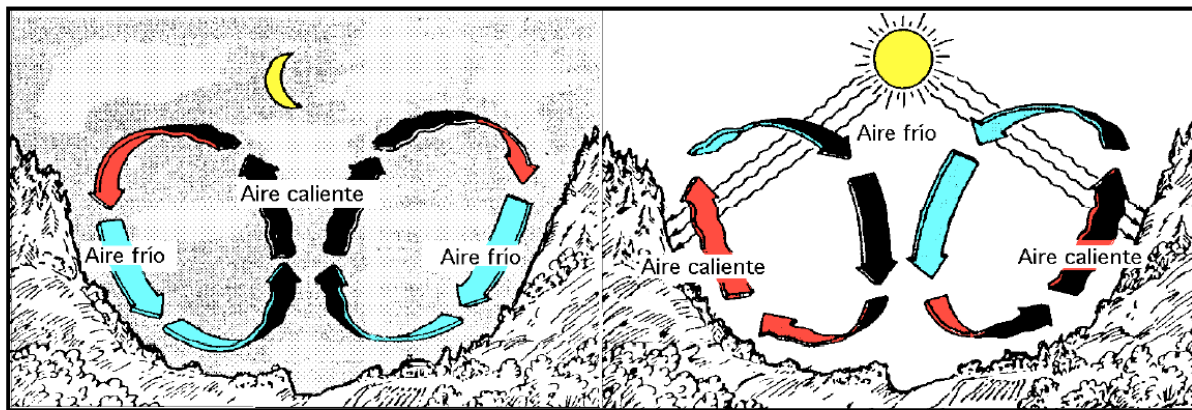


Figura 2.5: Vientos de valles y montañas.

Durante el día cuando el Sol calienta las montañas, el aire en contacto directo será mayormente calentado que el aire sobre el valle, disminuyendo su densidad y ascendiendo, en los valles y laderas, en zonas bajas el aire se desplazará hacia las cimas. Durante la noche y la madrugada, la superficie del suelo en la alta montaña pierde calor por emisión de radiación infrarroja hacia el espacio, enfriando el aire en contacto; este aire frío será más denso y tenderá a descender de las montañas hacia los valles, produciendo los conocidos vientos Katabáticos, (Reyes, 2001).

La circulación de los vientos de valle y montaña tiene un patrón similar a la circulación de brisas de mar y tierra, Figura 2.9. Si las condiciones son favorables, libre de nubes y vientos superiores débiles, la intensidad de los vientos de montaña dependerá de las siguientes características:

1. La orientación de las montañas, con respecto a la dirección de los rayos solares.- las laderas que dan la cara al Sol, serán mayormente calentadas que las laderas ocultas al Sol.
2. La topografía de la pendiente entre los valles y las cimas.- si la pendiente es muy grande, los movimientos de convección forzada serán más importantes que cuando la pendiente es pequeña.
3. El tipo y la cantidad de la cobertura de la vegetación.- el suelo rocoso y arenoso calienta más rápidamente el aire, que el suelo cubierto de vegetación, además de que esta última evita la erosión y disminuye la intensidad de los vientos.
4. Las condiciones de humedad del suelo.- cuando el aire es muy seco, la atmósfera será relativamente más inestable que cuando el aire es húmedo. En particular, si se forman nubes alrededor de la cima de la montaña, estas disminuirán la entrada de radiación solar (durante el día) o la pérdida de radiación infrarroja (durante la noche), dando como consecuencia que los grandes gradientes de temperatura sean menores y también la intensidad de los vientos de montañas resultantes, (Reyes, 2001).

2.3.3 Vientos de Santa Ana

Los vientos tipo Foehn representan un tipo especial de vientos locales asociados con sistemas de cadenas montañosas. El glosario de la meteorología define a Santa Ana como viento caliente, seco, tipo Foehn-Desértico, que generalmente va de noroeste a este (Burroughs, 1991). Todo el sur de California se ve afectado por este tipo de viento. Sobre todo porque es considerado un problema en la formación de incendios.

La condición climática conocida como Santa Ana, en general se caracteriza por vientos provenientes de regiones desérticas, con altas temperaturas, extremadamente baja humedad y condiciones de cielo completamente despejado, (Castro, 2002).



Figura 2.6: Origen de los vientos de Santa Ana.



Figura 2.7: Vientos de Santa Ana en Baja California.
<http://www.scielo.org.mx/img/revistas/atm/v19n3/a04f1.jpg>

La Figura 2.11 es una imagen satelital que mostró gran cantidad de arena y polvo hacia el mar, la extensión de estos vientos con polvo se pueden ver en las regiones de Rosarito, Ensenada, Punta Colonet, al sur del Rosario y Santa Rosalita (Castro, 2006).

2.3.4 Fenómeno de El Niño

El fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) es el que interactúa el sistema global océano-atmósfera, se refiere a un calentamiento periódico de las temperaturas de la superficie del mar a lo largo de la costa de América del Sur. Inicia con un calentamiento en el Pacífico Tropical Oeste, un debilitamiento de los vientos alisios del oeste, y un incremento en la actividad convectiva (García, 2007). Este fenómeno tiene su contraparte que es fría y se le denomina La Niña. En la Figura 2.12 se puede ver el panorama normal y cuando se presenta el fenómeno de El Niño, en este caso fue el de 1997.

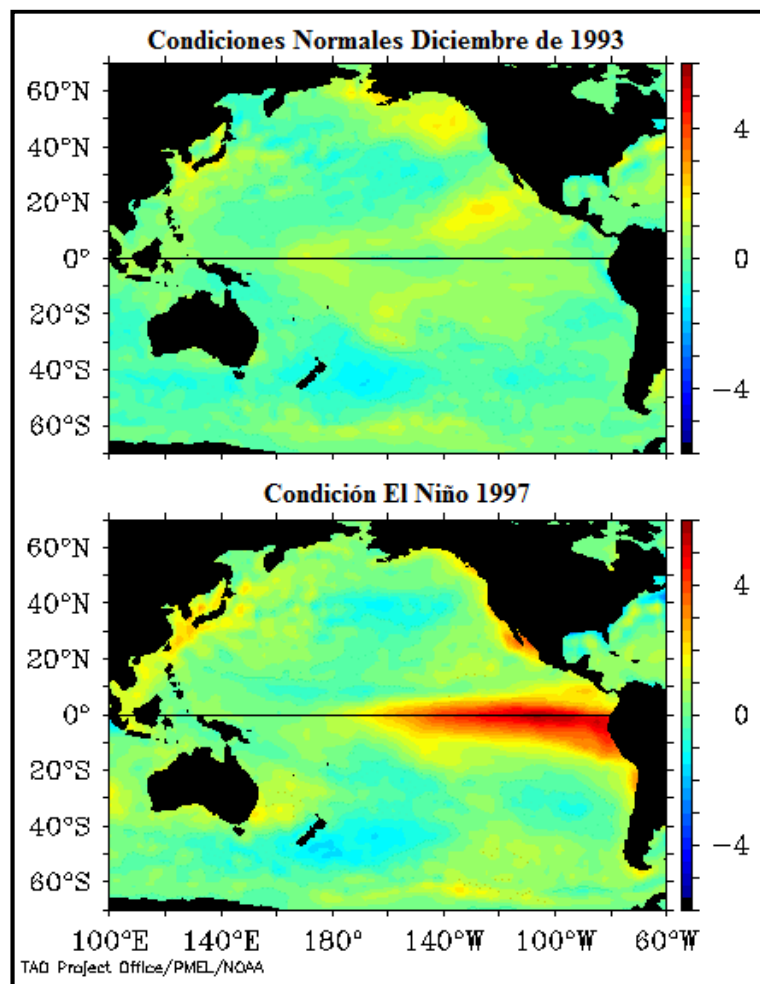


Figura 2.8: Condición normal y de El Niño para Diciembre de 1997.
<http://www.wrh.noaa.gov/fgz/science/elnino.php?wfo=fgz>

De acuerdo con los modelos numéricos y toma de temperaturas emitidas por el Centro de Predicción de Clima de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA, por sus siglas en inglés) en la Tabla 2.4 se puede ver el aumento y decremento en la temperatura del océano. Definiendo al fenómeno El Niño como un episodio cálido, cuando el umbral alcanza una anomalía de 0.5 °C y cómo mínimo deben ser cinco temporadas consecutivas representadas en color rojo. A La Niña se define cuando la anomalía de 0.5 °C es negativa, presentándose así el episodio frío del ENOS y en la Tabla 2.4 está en color azul.

Tabla 2. 4: Anomalías en la temperatura, con rojo se muestra anomalía cálida y en azul la fría.

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
1989	-1.7	-1.5	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
1991	0.4	0.3	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	0.9	0.9	1.0	1.4	1.6
1992	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2	0.8	0.5	0.2	0	-0.1	0.0	0.2
1993	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2
1994	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.9	1.2	1.3
1995	1.2	0.9	0.7	0.4	0.3	0.2	0.0	-0.2	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
1996	-0.7	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4
1997	-0.4	-0.3	0	0.4	0.8	1.3	1.7	2	2.2	2.4	2.5	2.5
1998	2.3	1.9	1.5	1.0	0.5	0	-0.5	-0.8	-1.0	-1.1	-1.3	-1.4
1999	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9	-1.0	-1.1	-1.3	-1.6
2000	-1.6	-1.4	-1.0	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7
2001	-1	-1	-0.4	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0	-0.1	-0.1
2002	-0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3	1.5	1.4
2003	1.2	0.9	0.5	0.1	-0.1	0.1	0.4	0.5	0.6	0.5	0.6	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8
2005	0.7	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	-0.1	-0.4	-0.7
2006	-0.7	-0.6	-0.4	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.9	1.1	1.1
2007	0.8	0.4	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-1.0	-1.1	-1.3
2008	-1.4	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0	0	0	-0.3	-0.6
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.1	0.2	0.6	0.7	0.8	0.9	1.2	1.5	1.8
2010	1.7	1.5	1.2	0.8	0.3	-0.2	-0.6	-1.0	-1.3	-1.4	-1.4	-1.4
2011	-1.3	-1.2	-0.9									

Fuente: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

El evento de El Niño se caracteriza por un calentamiento excesivo de las aguas superficiales del Océano Pacífico ecuatorial, el cual transfiere una cantidad considerable de

energía, en forma de calor y humedad, a la atmósfera tropical. Hoy en día se sabe que este fenómeno oceánico es más complejo y que en realidad es un evento de escala planetaria, (Reyes, 2001).

Este fenómeno trae consigo diversas anomalías climáticas a nivel mundial, en la Figura 2.13 se pueden visualizar.

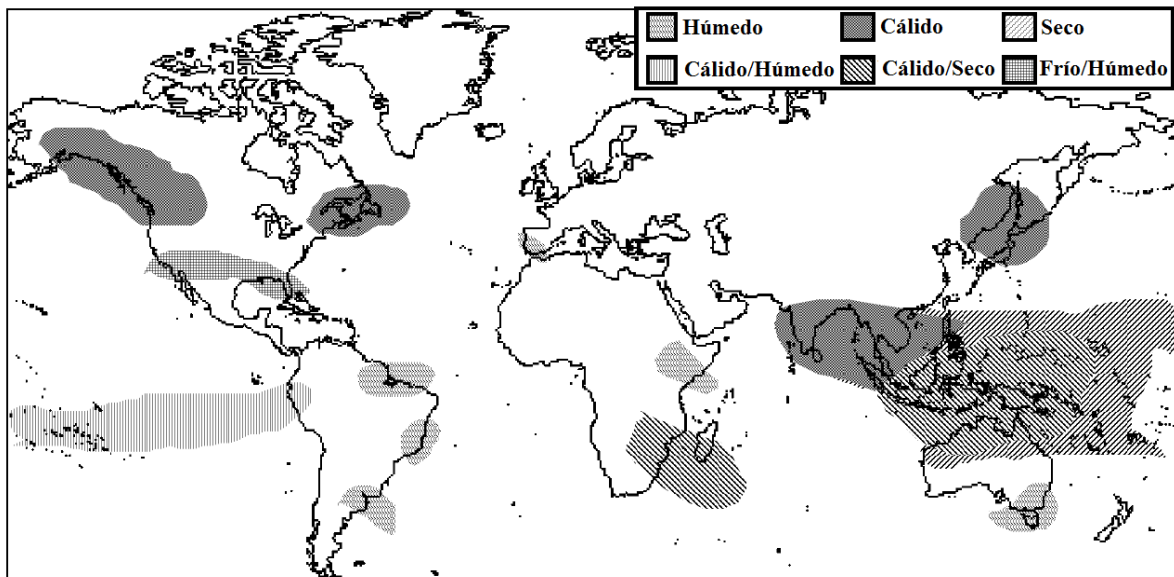


Figura 2.9: Típicas anomalías climáticas asociadas con el evento de El Niño.

<http://www.eso.org/gen-fac/pubs/astclim/espas/world/Climate/ENSO/Climatological-analysis-Fribourg-081.pdf>

Claramente se ve que en Baja California El Niño altera la variabilidad del clima. Los eventos ENOS modulan fuertemente la lluvia en las principales ciudades del Estado de Baja California, independientemente de la intensidad del evento (García, 2007).

2.3.5 Monzón de Norteamérica

Una circulación monzónica se define como el cambio en la dirección de los vientos estacionales entre el continente y el océano; es decir, durante una estación del año se observan vientos que circulan del océano a la tierra, y durante otra estación del año se registrará una inversión en la dirección de los vientos, (Reyes, 2001).

El Monzón de Norteamérica, Monzón del suroeste de los Estados Unidos, Monzón Mexicano o Monzón de Arizona son algunos de los nombres que se le han dado a este fenómeno. Se relaciona con el inicio de las lluvias de verano, con el flujo de humedad del sur sobre el Golfo de California y con la formación de un centro de baja presión centrado en Sonora y Arizona, (Reyes, 2001).

En los meses de verano (Julio, Agosto y Septiembre) el desierto Sonorense, que comprende la Península de Baja California, Sonora y Arizona en el suroeste del subcontinente de América del Norte, está caracterizado por un gran calentamiento, una alta temperatura y una baja presión atmosférica superficial, (Reyes, 2001).

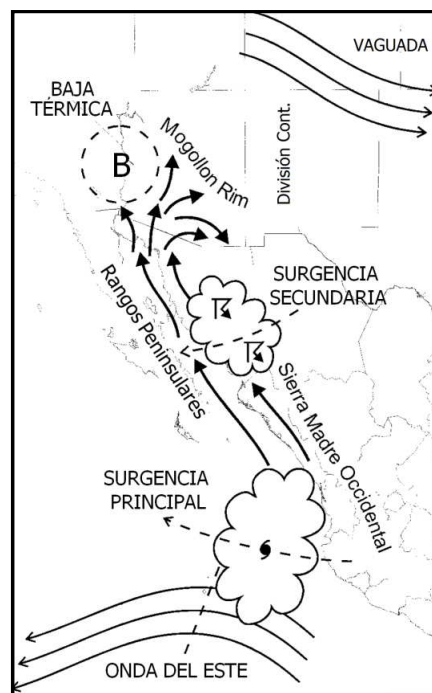


Figura 2.10: Conceptualización de la surgencia del Monzón de Norteamérica.
<http://geog.arizona.edu/~comrie/reprints/monsoon.pdf>

Se ha logrado identificar las surgencias de humedad, originadas en el océano Pacífico tropical, con vientos del sur, que transportan una considerable cantidad de humedad hacia el suroeste de Norteamérica a lo largo del Golfo de California, y que están relacionadas con la lluvia en Arizona, Sonora y Baja California, durante el verano, (Reyes, 2001).

3. ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO

La energía eólica en México se ha utilizado desde hace décadas para la extracción de agua en zonas rurales o remotas. Donde el sistema de agua potable no llega a la zona y se opta por la instalación de aerogeneradores para bombeo de agua.



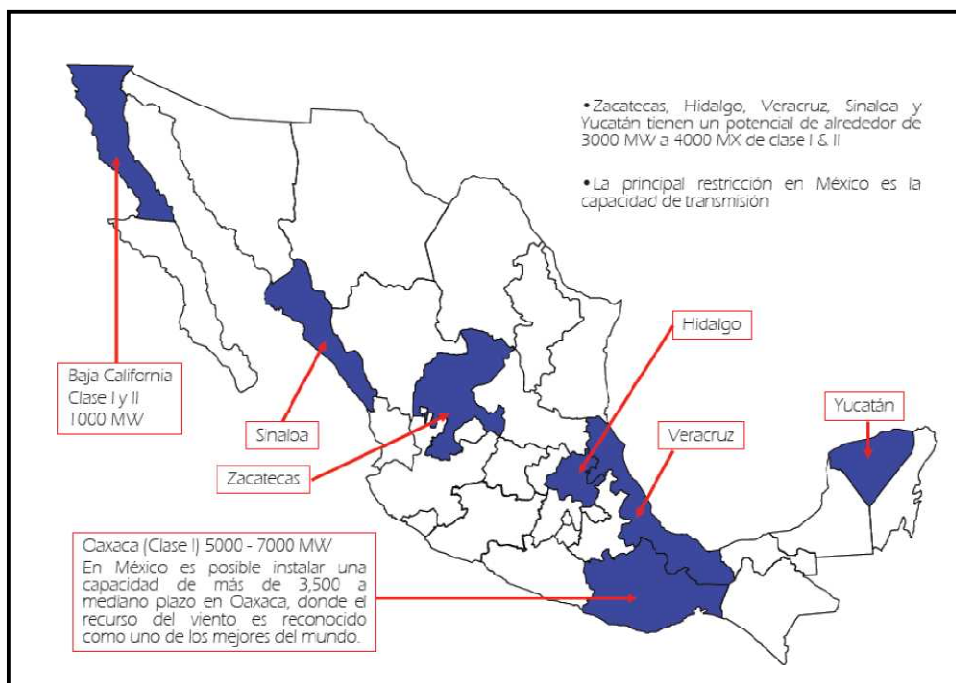
Figura 3.1: Pequeño aerogenerador aislado, usado en bombeo de agua.

En el informe 2009 de Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México (SENER), el uso de la energía eólica en México se dividía en:

- Proyectos eólicos.
- Proyectos eólicos de autoabastecimiento.
- Pequeños aerogeneradores en sitios aislados a la red.
- Pequeñas aerobombas 3 MW, turbinas eólicas que impulsan bombas hidráulicas.

3.1 Mapas eólicos en México

Según diversos estudios, México es una de las áreas más prometedoras en cuanto al desarrollo de energía eólica en toda Latinoamérica, la capacidad instalada en el país asciende a los 500 MW (AMDEE, 2010). Se cuenta con una diversidad de sitios para generar energía eólica, los lugares con mayor potencial eólico son el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca; las sierras de La Rumorosa y San Pedro Mártir en Baja California. Existiendo también otras regiones identificadas como: Zacatecas, Hidalgo, Sinaloa, así como también extensiones del litoral del Golfo de México y Yucatán Figura 3.2. (Luengo, 2009).



Fuente: AMDEE

Figura 3.2: Distribución geográfica del potencial eólico en México.

El potencial eólico del país no ha sido evaluado de manera exhaustiva. Se han realizado, sin embargo, evaluaciones del recurso en regiones específicas. En particular el Laboratorio Nacional de Energías Renovables del Departamento de Energía (NREL, por sus siglas en inglés) ha coordinado la realización de mapas eólicos para diversas zonas, entre las que están:

- Oaxaca, Figura 3.3.
- Las costas de Yucatán y de Quintana Roo, Figura 3.4.
- Baja California Sur, Figura 3.5.
- Franja fronteriza de Baja California, Figura 3.6.
- Franja fronteriza de Sonora, Figura 3.7 y 3.8.
- Franja fronteriza de Chihuahua, Figura 3.9

Estos mapas se han realizado conjuntando información de estaciones meteorológicas con técnicas de prospección remota, (SENER, 2009).

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables del Departamento de Energía encabezó el proyecto en colaboración con la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID por sus siglas en inglés), la Secretaría de Desarrollo Industrial y Comercial (SEDIC) del Gobierno del Estado de Oaxaca, la Secretaría de Energía (SENER), el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) a través de su Gerencia de Energías no Convencionales (GENC), así como la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Las principales metas del proyecto fueron el desarrollo de mapas detallados del recurso eólico para todas las regiones de Oaxaca y la producción de un atlas comprensivo del recurso que documentará los resultados, (Elliot, 2004).

Aunque los mapas del recurso eólico ayudarán a identificar aquellas zonas para aplicaciones de energía eólica, NREL recomienda que se lleven a cabo programas de medición de viento para validar los estimados de recursos y para refinar los mapas eólicos y métodos de evaluación.

Existen otros mapas de México, como el de la Figura 3.10 y 3.11. En el primero se visualiza la escala de la velocidad del viento en el país, elaboración de 3TIER, fue producido por un innovador modelo de física estadística, y corrido a través de una simulación de 10 años. El segundo es del Instituto de Investigaciones eléctricas y la densidad de potencia está a 80 m a diferencia de los de NREL que son a 50 m.

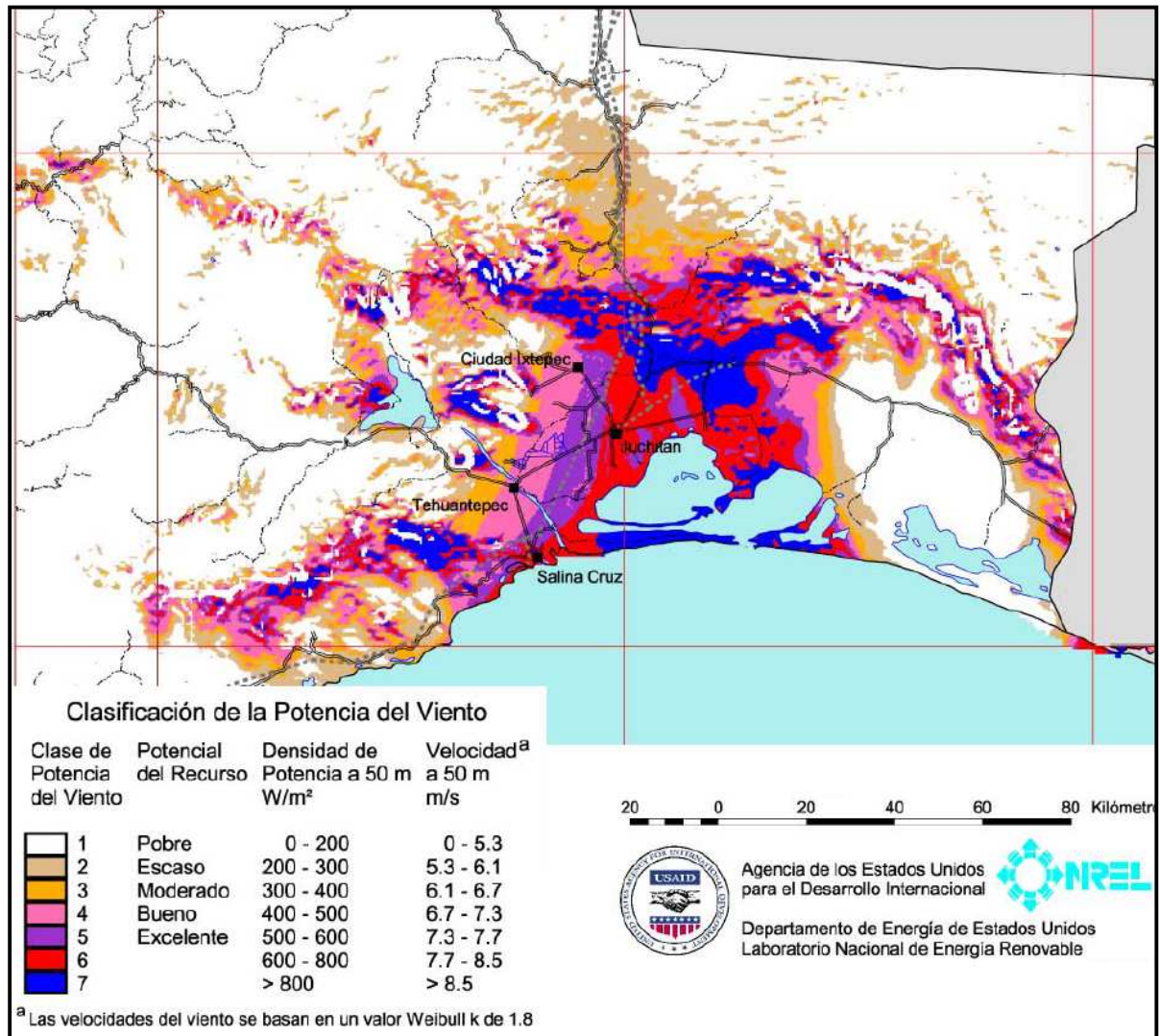


Figura 3.3: Potencial eólico estimado para el Estado de Oaxaca.

Fuente: Atlas de Recursos eólicos del Estado de Oaxaca, (Elliott, 2004).

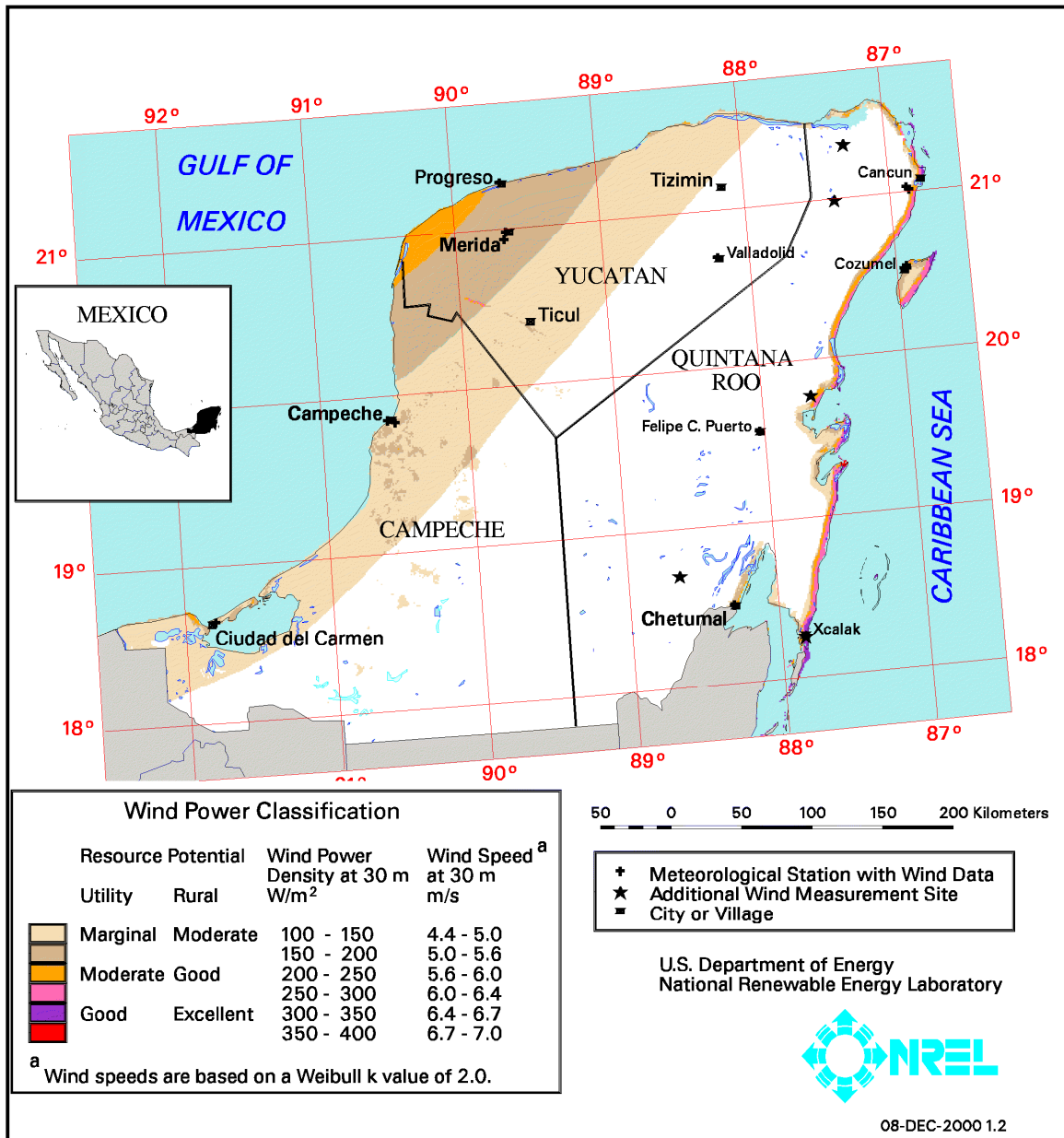


Figura 3.4: Potencial eólico estimado para los Estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo.
<http://www.nrel.gov/wind/images/mexico-yucatan-windmap.gif>

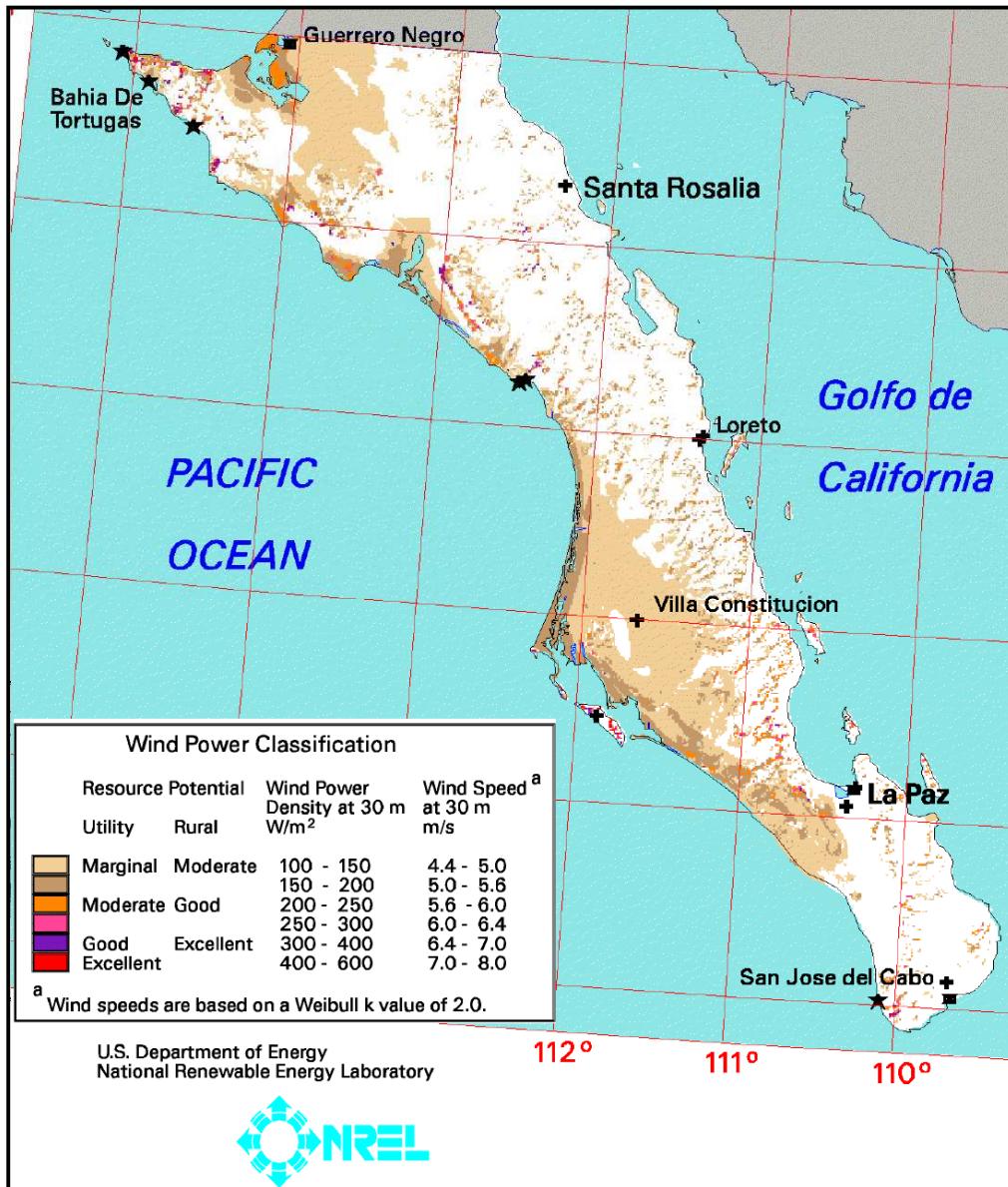


Figura 3.5: Potencial eólico estimado para el Estado de Baja California Sur.

<http://www.nrel.gov/wind/pdfs/mexico-bajasur.pdf>

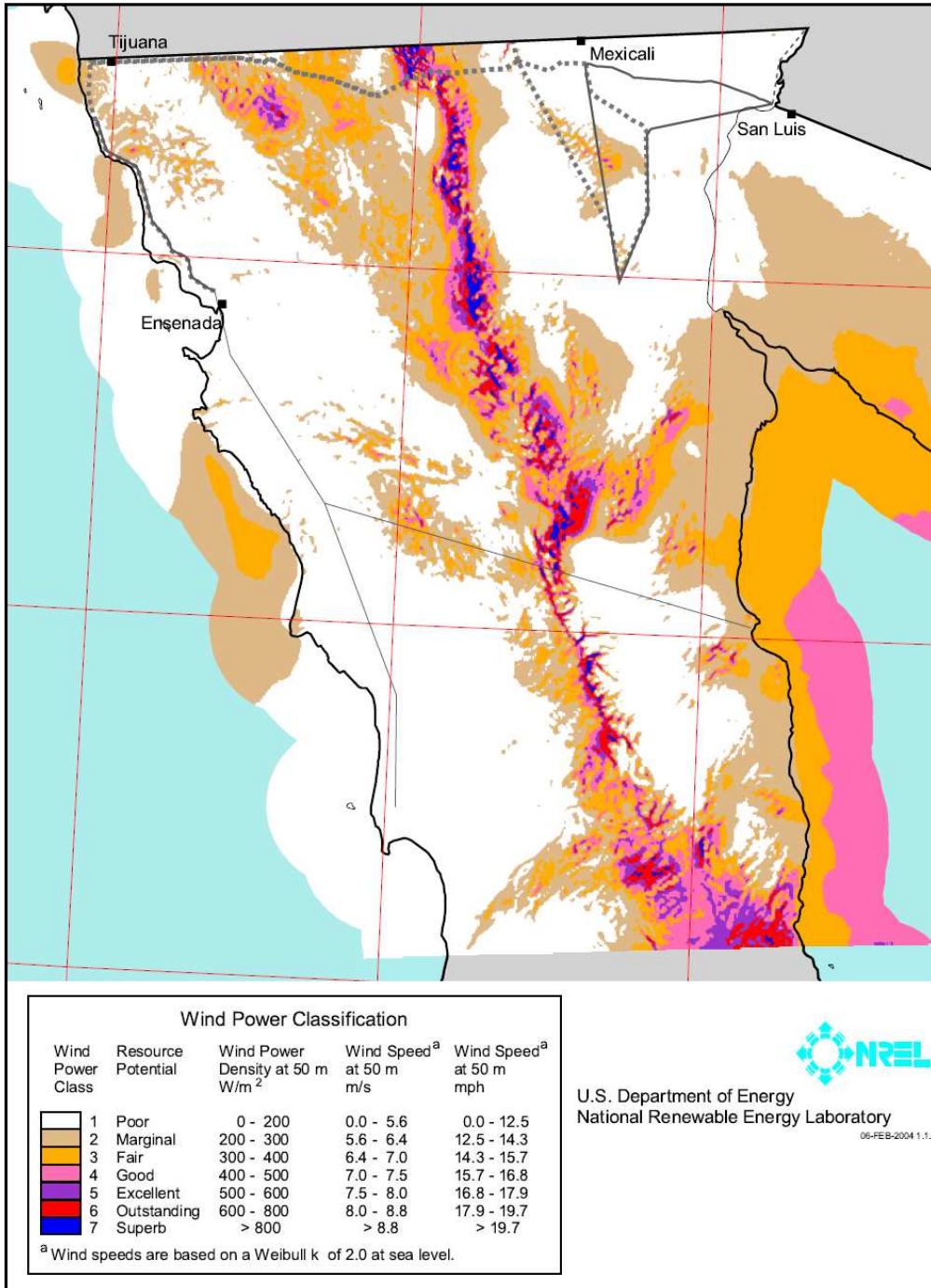


Figura 3.6: Potencial eólico, en la franja fronteriza del Estado de Baja California.
http://www.nrel.gov/wind/pdfs/mexico_baja.pdf

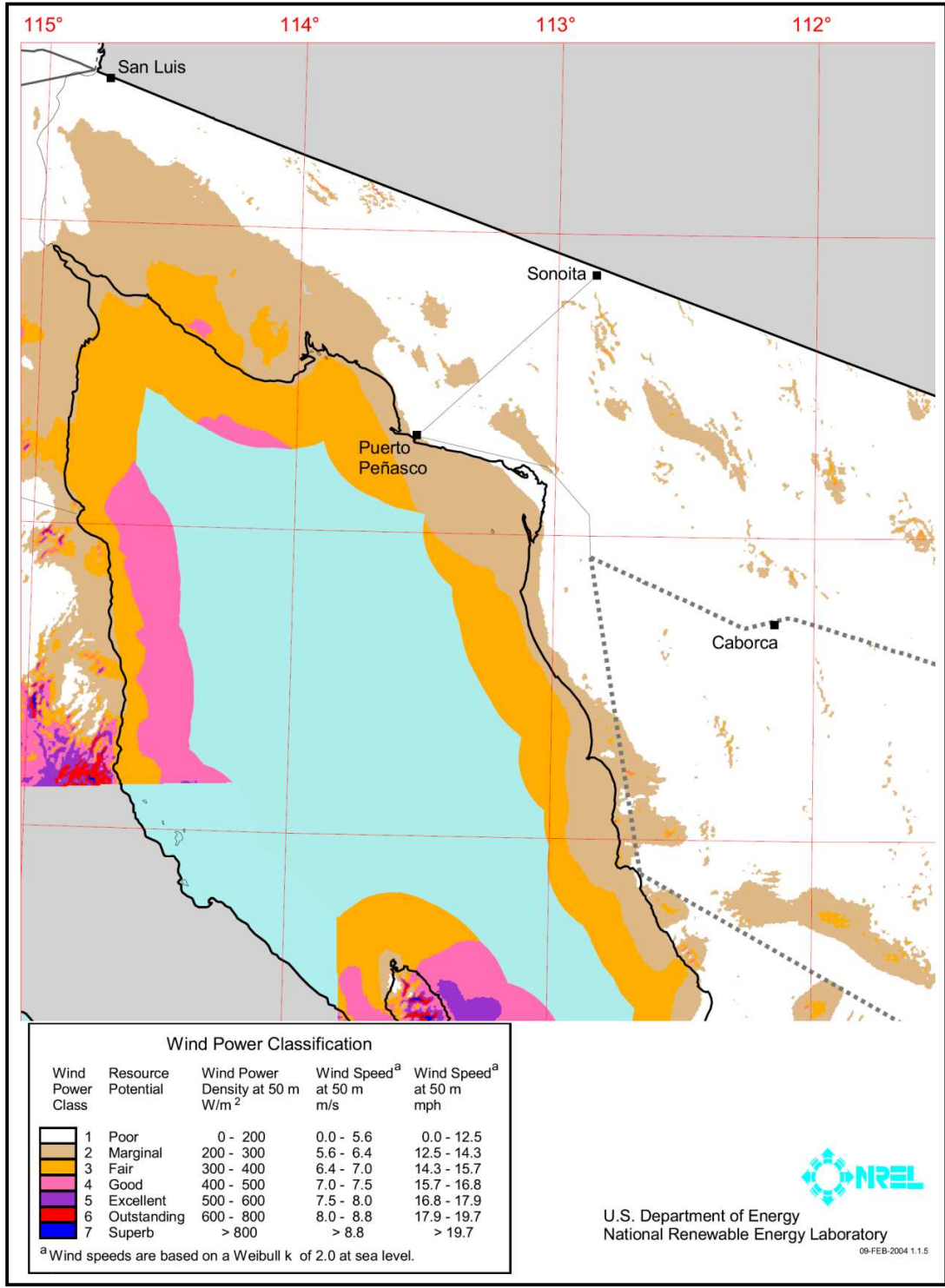


Figura 3.6: Región fronteriza Occidental en el Estado de Sonora.

http://www.nrel.gov/wind/pdfs/mexico_w_sonora.pdf

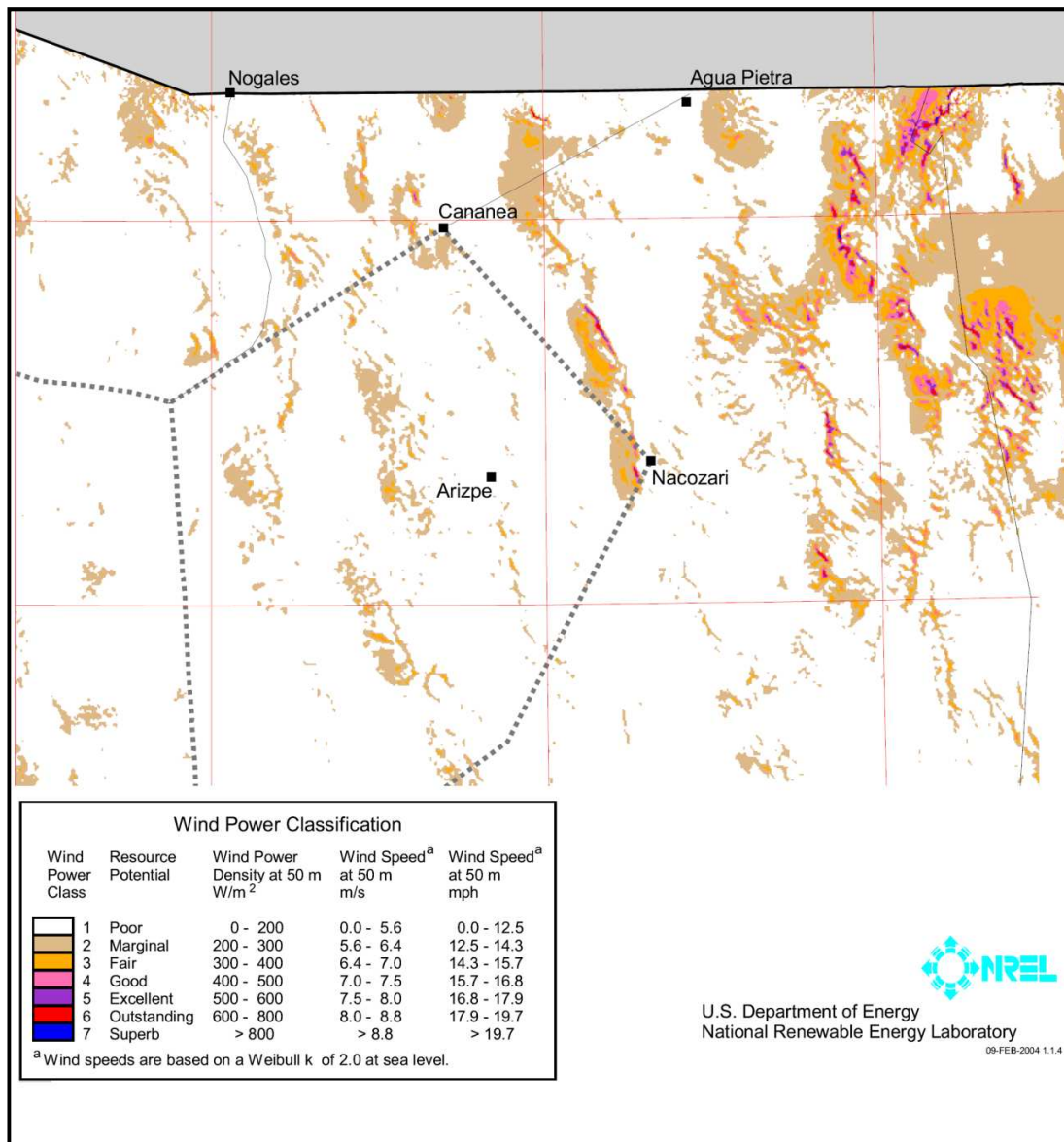


Figura 3.7: Región fronteriza Oriental en el Estado de Sonora.

http://www.nrel.gov/wind/pdfs/mexico_e_sonora.pdf

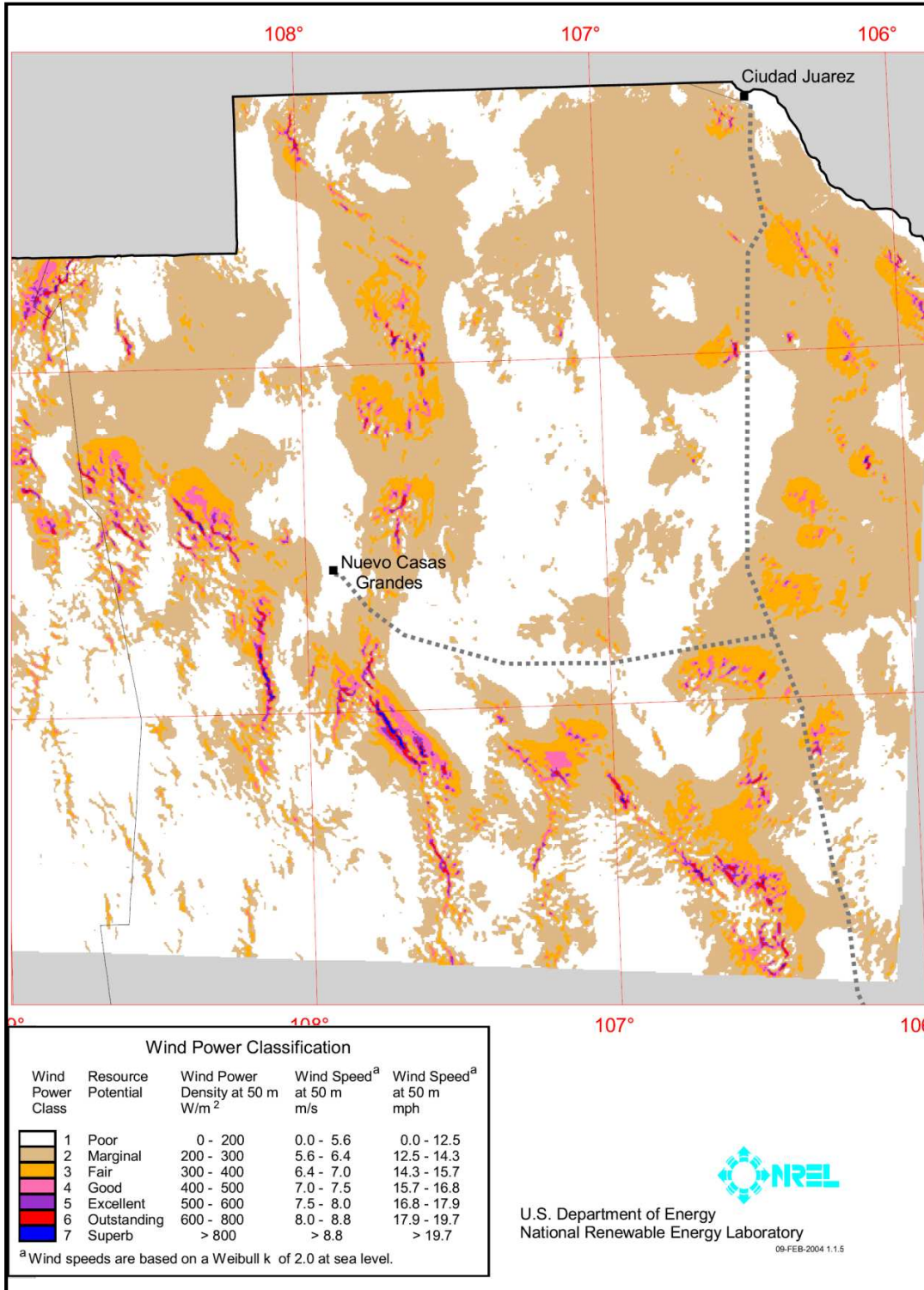


Figura 3.8: Región frontera Occidental de Chihuahua.
http://www.nrel.gov/wind/pdfs/mexico_chihuahua.pdf

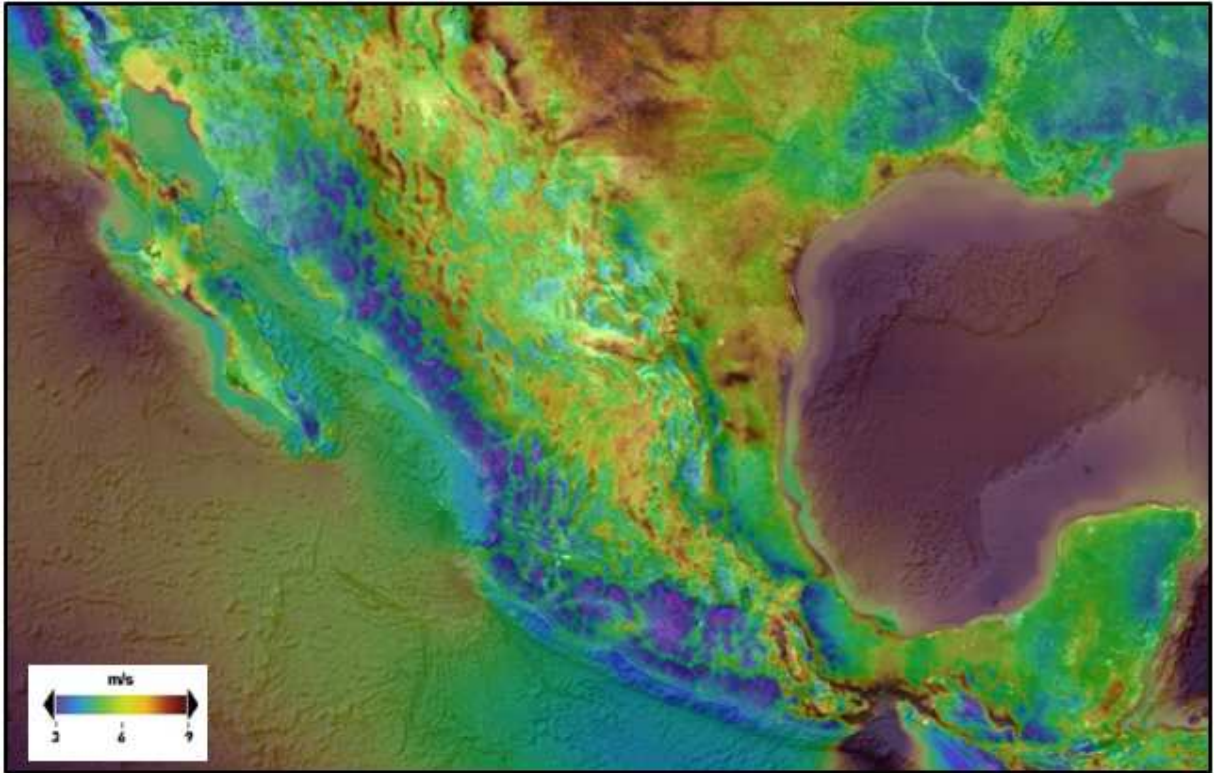
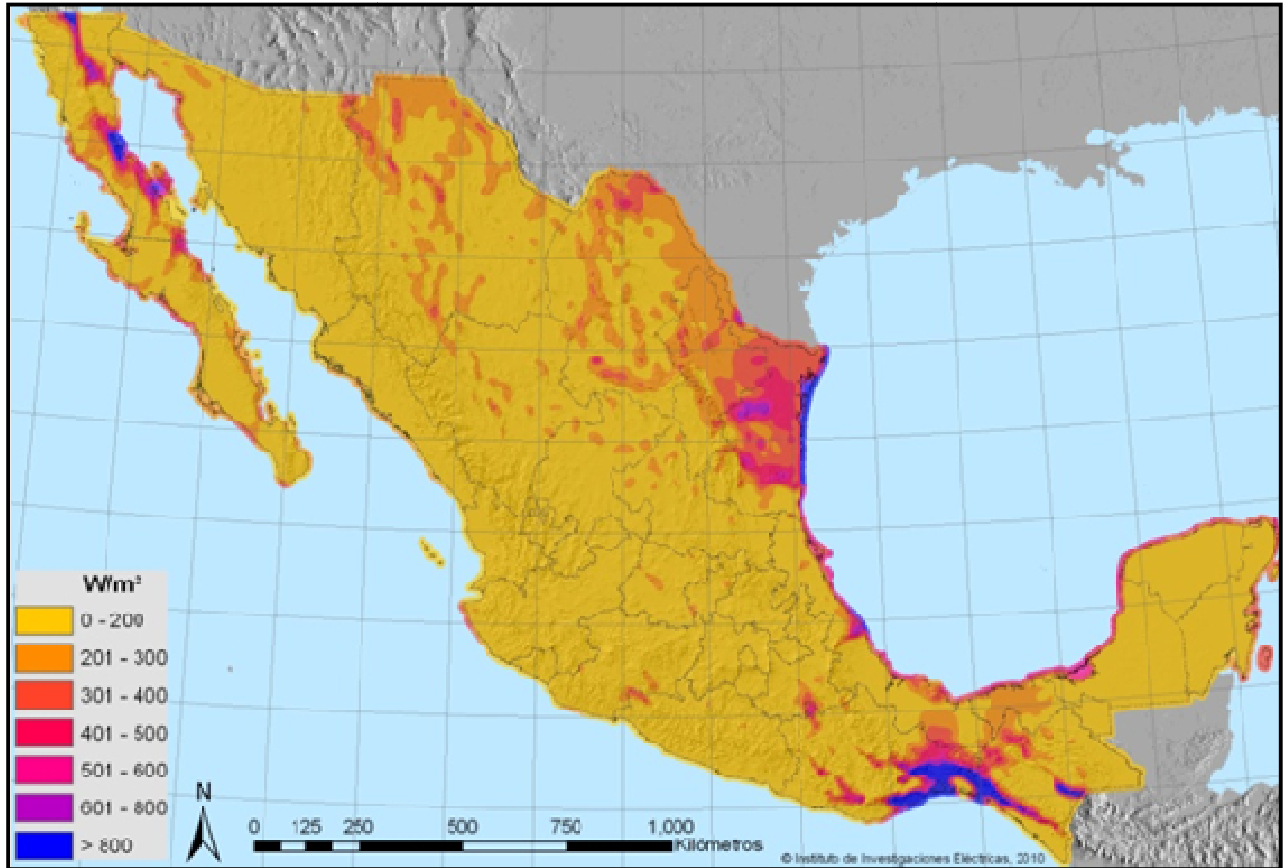


Figura 3.9: Mapa eólico de México desarrollado por 3TIER.
<http://www.3tier.com/firstlook/>



Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)
<http://www.renovables.gob.mx/Portal/Default.aspx?id=1651&lang=1>

Figura 3.10: Densidad de potencia del viento a 80 m de altura.

3.1.1 Parques eólicos en operación en México

La instalación de grandes turbinas eólicas que conforman los parques o granjas eólicas ha tenido un crecimiento acelerado en nuestro país. Para finales del 2009 la capacidad instalada en energía eólica apenas superaba los 200 MW, y para principios del 2011 según datos de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE, 2010) la capacidad instalada ascendía a 518.63 MW. Lo que indica un crecimiento de 2.6 veces en la instalación de energía eólica en el país. En la Figura 3.12 se visualiza el crecimiento por año en la instalación de energía eólica.



Fuente: AMDEE <http://amdee.org/> /AMDEE%20Presentacin%20en%20Espa%C3%B1ol%202011.pdf

Figura 3.11: Capacidad instalada total en México en 2010.

En México los principales proyectos eólicos bajo construcción y en desarrollo se encuentran en los Estados de Oaxaca y Baja California. En estos proyectos el potencial eólico será aprovechado para autoabastecimiento y exportación de energía eoloeléctrica.

En las siguientes Tablas 3.1 y 3.2 se describen el estado de los parques actuales que están en operación, bajo construcción y en desarrollo. Su ubicación se realiza por Estado de la República Mexicana. Y el esquema de funcionamiento se divide en: autoabastecimiento; Obra Pública Financiada OPF (Licitaciones de CFE); exportación y Productor Independiente de Energía PIE (Proyectos Licitados por CFE).

Tabla 3. 1: Proyectos eolieléctricos en México.

Proyectos Eólicos en México 2011						
Proyectos Eólicos en Operación						
Proyecto	Ubicación	Esquema	Desarrollador	Turbinas	FOC	MW
La Venta	Oaxaca	OPF	CFE	Vestas	1994	1.6
La Venta II	Oaxaca	OPF	CFE	Gamesa	2006	83.3
Parques eólicos de México	Oaxaca	Autoabastecimiento	Iberdrola	Gamesa	2009	79.9
Eurus, 1st Phase	Oaxaca	Autoabastecimiento	Cemex/Acciona	Acciona	2009	37.5
Eurus, 2nd Phase	Oaxaca	Autoabastecimiento	Cemex/Acciona	Acciona	2010	212.5
Gobierno Baja California	Baja California	OPF	GBC/Turbo Power Services	Gamesa	2010	10
Bii Nee Stipa I	Oaxaca	Autoabastecimiento	Cisa-Gamesa	Gamesa	2010	26.35
La Mata - La Ventosa	Oaxaca	Autoabastecimiento	Eléctrica del Valle de México (EDF-EN)	Clipper	2010	67.5

518.65

OPF: Obra Pública Financiada (Licitaciones de CFE)

FOC: Fecha de Operación Comercial

PIF: Productor Independiente de Energía (Proyectos licitados por CFE)

Fuente: AMDEE

http://www.amdee.org/Recursos/Proyectos_en_Mexico

Tabla 3. 2: Proyectos eolieléctricos bajo construcción.

Proyectos eólicos Bajo Construcción						
Proyecto	Ubicación	Esquema	Desarrollador	Turbinas	FOC	MW
Fuerza Eólica del Istmo	Oaxaca	Autoabastecimiento	Peñoles	Clipper	2010-2011	50
La Venta III	Oaxaca	PIE	CFE/Iberdrola	Gamesa	2011	101
Oaxaca I	Oaxaca	PIE	CFE/EYRA	Vestas	2010	101
Oaxaca II, III y IV	Oaxaca	PIE	CFE/Acciona	Acciona	2011-2012	304.2
Los Vergeles	Tamaulipas	Autoabastecimiento	GSEER	Siemens	2011	161

717.20

Fuente: AMDEE

http://www.amdee.org/Recursos/Proyectos_en_Mexico

El Estado con más parques en operación hasta mediados de 2011 es Oaxaca, que tiene 7 de los 8 proyectos en operación. El otro proyecto en operación para este mismo año lo tiene Baja California, que es iniciativa del Gobierno del Estado para aprovechar los vientos de la región.

En el caso de los proyectos eólicos bajo construcción, sigue Oaxaca con más proyectos para una fecha programada de puesta en operación hasta el 2012 y Tamaulipas entra en la lista de los Estados que utilizarán la energía eólica como fuente de generación de energía eléctrica.

Tabla 3. 3: Proyectos eolieléctricos en desarrollo en México.

Proyectos Eólicos en Desarrollo						
Proyecto	Ubicación	Esquema	Desarrollador	Turbinas	FOC	MW
Energía Alterna Istmeña	Oaxaca	Autoabastecimiento	Preneal	Por Definir	2011-2014	215.9
Energía Eólica Mareña	Oaxaca	Autoabastecimiento	Preneal	Por Definir	2011-2014	180
Fuerza Eólica del Istmo	Oaxaca	Autoabastecimiento	Peñoles	Clipper	2011-2012	30
Bii Hioxio	Oaxaca	Autoabastecimiento	Unión Fenosa	Por Definir	2011-2014	227.5
Bii Stinú	Oaxaca	Autoabastecimiento	Eoliatic del Istmo (Eolia)	Por Definir	2011-2013	164
Santo Domingo	Oaxaca	Autoabastecimiento	Eoliatic del Istmo (Eolia)	Por Definir	2011-2014	160
Bii Nee Stipa	Oaxaca	Autoabastecimiento	Cisa-Gamesa	Gamesa	2011-2014	288
Desarrollo Eólicos Mexicanos	Oaxaca	Autoabastecimiento	Renovalia	Por Definir	2011-2014	227.5
Zapoteca de Energía	Oaxaca	Autoabastecimiento	Alesco, S.A. de C.V.	Por Definir	2014	140
Vaquerías-La Paz	Jalisco	Autoabastecimiento	Eoliatic de México	Por Definir	2014	60
Chinanpas	Jalisco	Autoabastecimiento	Eoliatic de México	Por Definir	2014	64
Unión Fenosa	Baja California	Exportación	Gas Natural/Unión Fenosa	Por Definir	2011-2014	1000
Sempre	Baja California	Exportación	Sempre	Por Definir	2011-2015	1000
Asociados Panamericanas	Baja California	Exportación	Asociados Panamericanos	Por Definir	2011-2016	1000
Wind Power de México	Baja California	Exportación	Wind Power de México	Por Definir	2011-2017	500
Fuerza Eólica de Baja California	Baja California	Exportación	Fuerza Eólica de Baja California	Por Definir	2011-2018	300
						5556.9

Fuente: AMDEE

http://www.amdee.org/Recursos/Proyectos_en_Mexico



Figura 3.12: Central eólica La Venta I, Oaxaca, México.



Figura 3.13: Central eólica La Venta II, Oaxaca, México.

<http://saladeprensa.cfe.gob.mx/banco/searchBanco.alia>

3.2 Energía eólica en Baja California

En Baja California existe una zona con gigantescas montañas rocosas que propician increíbles paisajes y un singular rumor en el viento, el cual por su característico zumbido da el nombre a la región de La Rumorosa. En esta zona elevada con fuertes vientos se concentra gran parte del potencial eólico en el Estado, junto con la Sierra San Pedro Mártir.



Figura 3.14: Vista de la Sierra La Rumorosa.

Diversos estudios como los de NREL y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), señalan que existe potencial eólico en Baja California para ser aprovechado en grandes construcciones eólicas. La iniciativa del Estado de California para la transmisión de energía renovable (Renewable Energy Transmission Initiative, RETI), estimó a finales del 2008 que Baja California tendría un potencial eólico de 2,400 MW, y existen también estimaciones de otras fuentes que señalan un potencial de hasta 10,000 MW, (Luengo, 2009).

En el 2003 se presentó un estudio del potencial eólico en la zona de La Rumorosa, por el CICESE para el gobierno del Estado de Baja California (CICESE, 2003).

La finalidad de este trabajo fue proporcionar al gobierno del Estado las zonas con mayor potencial eólico para el establecimiento de aerogeneradores de gran potencia. La zona montañosa de La Rumorosa, fue seleccionada como una de las localidades potenciales por su cercanía con Mexicali, que es considerado como el principal centro consumidor de la energía eléctrica, en el Estado, particularmente durante el verano. Otro de los puntos importantes al considerar esta región, es que la red de la Comisión Federal de Electricidad, CFE, pasa por este sitio, (CICESE, 2003).

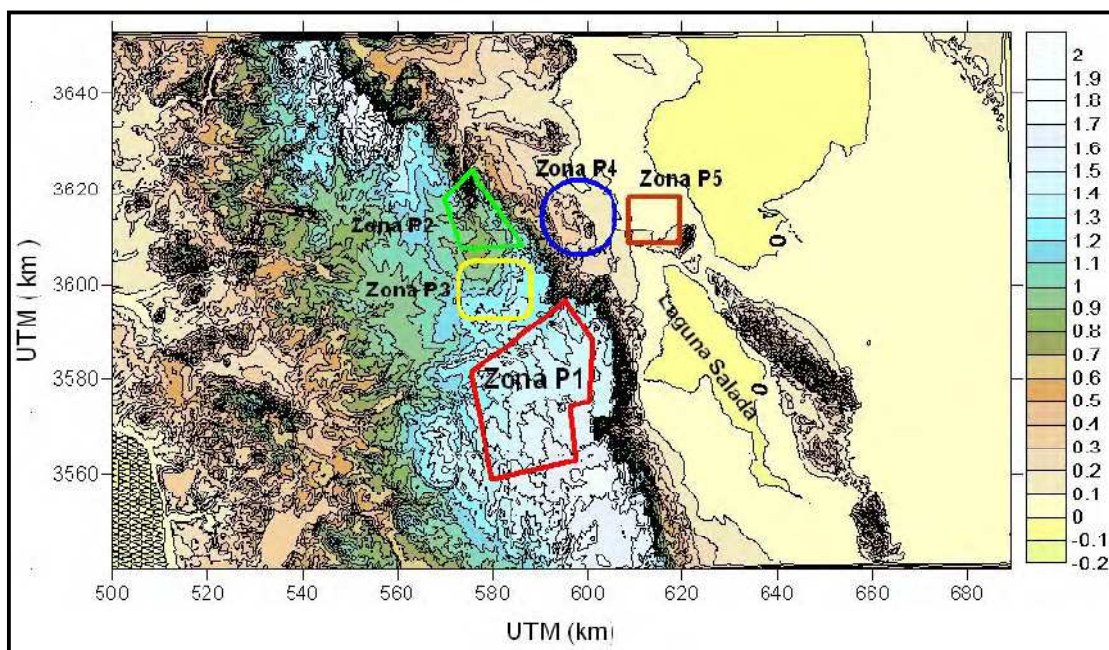


Figura 3.15: Zonas propuestas por CICESE para establecer una granja eólica en la región de la Rumorosa.

3.2.1 Parques eólicos en operación

En el 2009 se construyó el parque eólico La Rumorosa I, en la región montañosa que lleva el mismo nombre. Este parque surgió por la necesidad de aprovechar el recurso eólico en la región, contribuir con la disminución de CO₂ a la atmósfera y sobre todo, la necesidad de apoyar a la economía de las familias más pobres de Mexicali (Comisión Estatal de Energía, 2009).

La inversión del Parque Eólico es de 26.1 millones de dólares, contando con una capacidad instalada de 10MW, con una generación estimada promedio anual de 27,156 MWh, que se utilizarán para el alumbrado público, beneficiando así a 35 mil familias. Con este tipo de generación de energía se abatirán en Baja California anualmente 17 mil Ton de emisiones de CO₂ a la atmósfera. (Comisión Estatal de Energía de Baja California, 2009).

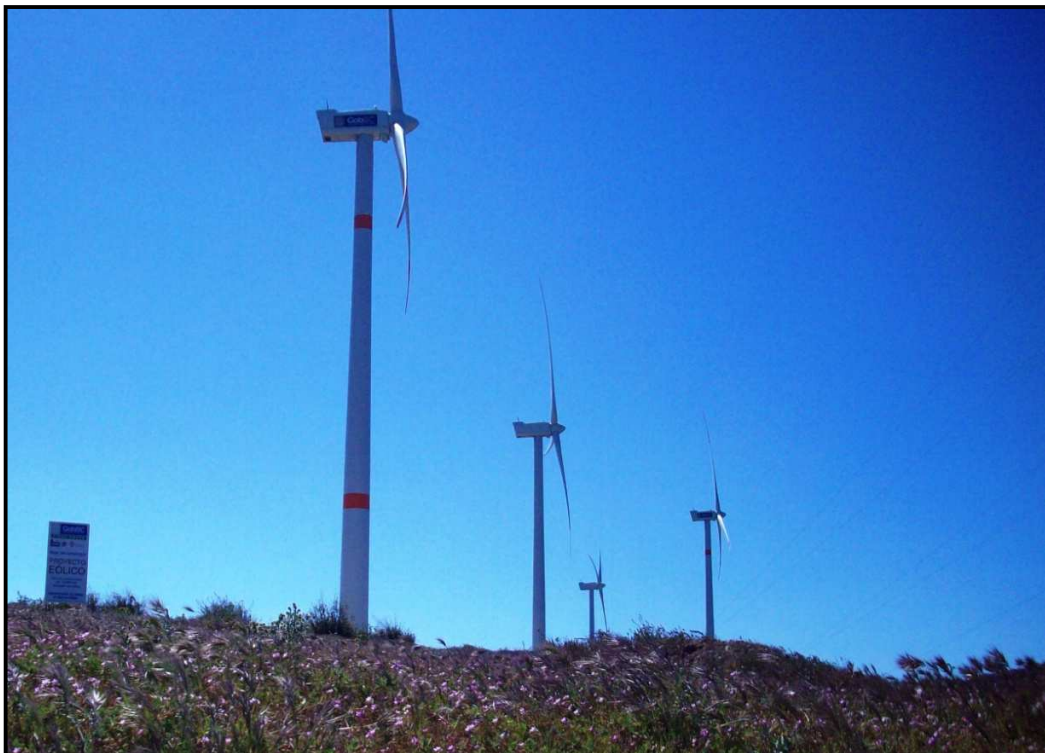


Figura 3.16: Parque eólico La Rumora I, Baja California, México.

El Parque eólico La Rumorosa I es el primero en el Norte de México, con aerogeneradores de mayor altura y capacidad nominal en nuestro país.

3.2.2 Parques eólicos en desarrollo

La inversión en parques eólicos en Baja California está en aumento, ya que estudios sugieren la presencia de gran potencial en la zona. Un indicativo sugerente de un potencial aún mayor que el estimado por RETI, es que el operador del sistema eléctrico de California (CAISO) ha recibido solicitudes de interconexión internacional en relación a cinco proyectos eólicos localizados en el Estado de Baja California, con una capacidad agregada de 3,020 MW, (Luengo, 2009).

La Tabla 3.4 Muestra los proyectos en desarrollo en el Estado de Baja California, que pretende alcanzar una generación de energía eólica de 3,800 MW (AMDEE, 2011).

Tabla 3.4: Proyectos en desarrollo en el Estado de Baja California

Proyectos Eólicos en Desarrollo						
Proyecto	Ubicación	Esquema	Desarrollador	Turbinas	FOC	MW
Unión Fenosa	Baja California	Exportación	Gas Natural/Unión Fenosa	Por Definir	2011-2014	1000
Sempre	Baja California	Exportación	Sempre	Por Definir	2011-2015	1000
Asociados Panamericanas	Baja California	Exportación	Asociados Panamericanos	Por Definir	2011-2016	1000
Wind Power de México	Baja California	Exportación	Wind Power de México	Por Definir	2011-2017	500
Fuerza Eólica de Baja California	Baja California	Exportación	Fuerza Eólica de Baja California	Por Definir	2011-2018	300
Total						3,800

OPF: Obra Pública Financiada (Licitaciones de CFE)

FOC: Fecha de Operación Comercial

PIF: Productor Independiente de Energía (Proyectos licitados por CFE)

Fuente: AMDEE

<http://amdee.org/Proyectos/AMDEE%20Presentacin%20en%20Espaol%202011.pdf>

Todos los proyectos que solicitaron interconexión internacional se localizan en la zona fronteriza entre el Estado de Baja California, México y California, Estados Unidos.

En la Tabla 3.5 se indican los proyectos que solicitaron interconexión, así como también su localización en México y el punto de interconexión propuesto en Estados Unidos.

Tabla 3. 5: Proyectos que solicitaron interconexión internacional

Localización del proyecto	Punto de interconexión propuesto	FPEO	(MW)
La Rumorosa, BC	SDG&E 500kV Imperial Valley-Miguel transmission line	Jun-2009	400
Mexicali/Ensenada/Tecate	SDG&E Imperial Valley 500 kV bus	Dic-2011	1000
La Rumorosa, BC	SDG&E Imperial Valley 230 kV Substation	Jun-2010	500
La Rumorosa, BC	SDG&E 500kV Imperial Valley-Miguel transmission line	Nov-2009	300
La Rumorosa, BC	SDG&E New 230/500 Kv substation near the 500 kV IV-ML line	Dic-2010	400
	SDG&E Imperial Valley-Miguel 500 kV	May-2011	420
Total			3,020

SDG&E: San Diego Gas Energy

FPEO: Fecha posible de entrada en Operación

Fuente: California ISO Generator Interconnection Queue (Febrero 2009)

Sin embargo, no existen en la actualidad en Baja California proyectos eólicos que estén exportando comercialmente energía al mercado californiano, aunque el proyecto de Fuerza Eólica/Clipper Windpower ha obtenido de la CRE un permiso de exportación por 300 MW, (Luengo, 2009).

La situación de exportación de energía eléctrica podría cambiar significativamente en un mediano o largo plazo, si se considera que en la actualidad hay empresas que están desarrollando activamente nuevos parques eólicos en Baja California, destacándose las siguientes:

- *Unión Fenosa / Zemer Energía* (400-1,000 MW). En el año 2007, Unión Fenosa adquirió una participación mayoritaria en la empresa mexicana Zemer con el objetivo de desarrollar un parque eólico en la zona de La Rumorosa. El consorcio UF/Zemer no ha

solicitado aún a la CRE un permiso de exportación. La meta es instalar 400 MW, con posibilidades de expandir dicha capacidad en el futuro hasta 1,000 MW.

- *Fuerza Eólica / Clipper Windpower* (300 MW). La compañía mexicana Fuerza Eólica de Baja California es el único desarrollador que ha obtenido un permiso de la CRE para exportar energía eólica. Está trabajando en asociación con la empresa manufacturera de turbinas eólicas Clipper Windpower.
- *Sempra Generation* (250-1,000 MW). Sempra Generation anunció en 2007 la adquisición de terrenos en la zona de La Rumorosa con la intención de desarrollar (a través de su filial en México, Energía Sierra Juárez) un parque eólico de 250 MW, pero con potencial de hasta 1,000 MW. Posteriormente, aseguró la venta a Southern California Edison de la energía eléctrica que produciría, bajo un PPA de 20 años asociado al programa RPS. Sempra ya ha solicitado a CAISO un permiso de interconexión por 1,000 MW que se prevé entrará en operación a finales del año 2011 o principios del 2012.

4. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO EN BAJA CALIFORNIA

Como se presentó en el capítulo anterior, el potencial eólico en Baja California para aplicaciones de mayor escala está en desarrollo sobre todo en la zona montañosa de La Rumorosa. Pero se ha dejado a un lado el estudio para aplicaciones rurales y éste es importante para tener conocimiento de la existencia del recurso eólico y que sea aprovechado en aplicaciones de baja potencia.

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos en un proyecto denominado “México Wind Resource Assessment Project”, 1995, elaboró un mapa donde se encuentra recurso eólico para aplicaciones a menor escala, Figura 4.1. En este mapa se observa la forma en la que se distribuye el potencial eólico para aplicaciones rurales. En la zona de Baja California muestra que existe potencial bueno en la zona Valle de Mexicali y la costa del Pacífico Norte, y un potencial excelente en la Sierra Juárez.

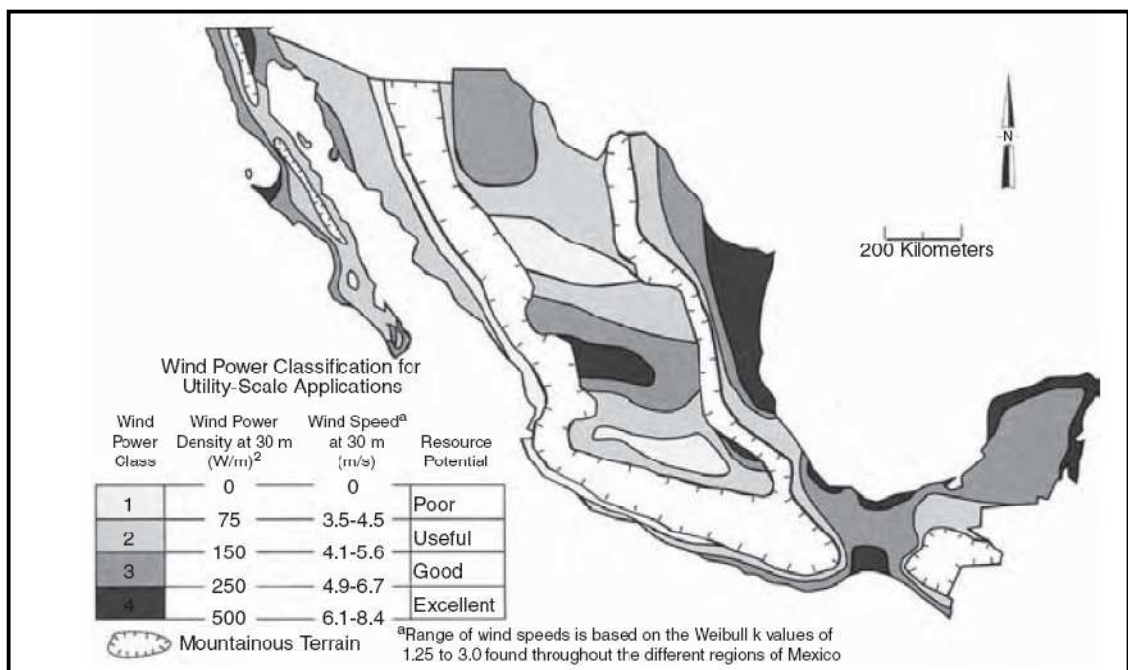


Figura 4. 1: Mapa para aplicaciones rurales en la República Mexicana (Patel, 2006).

4.1 Estaciones climatológicas

Para el presente trabajo se utilizaron datos anemométricos de seis estaciones climatológicas automáticas, ubicadas en diferentes partes del Estado de Baja California. Los datos de velocidad de viento fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Los periodos de evaluación difieren para cada estación por la disposición de datos.

La estación automática está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios 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 TUC (Tiempo Universal Coordinado) ó UTC (de sus siglas en inglés) por lo que se tomaron consideraciones para la correcta interpretación de los datos.

El área representativa de las estaciones es de 5 km de radio aproximadamente, en terreno plano, excepto en terreno montañoso y el anemómetro se encuentra a 10 m de la superficie del terreno. (CONAGUA, 2011)

VARIABLES meteorológicas que se registran en cada estación:

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Presión atmosférica
- Temperatura y Humedad relativa
- Radiación solar
- Precipitación

En la Figura 4.2 se muestra un arreglo característico del montaje de las estaciones en una estructura de tipo torre triangular.

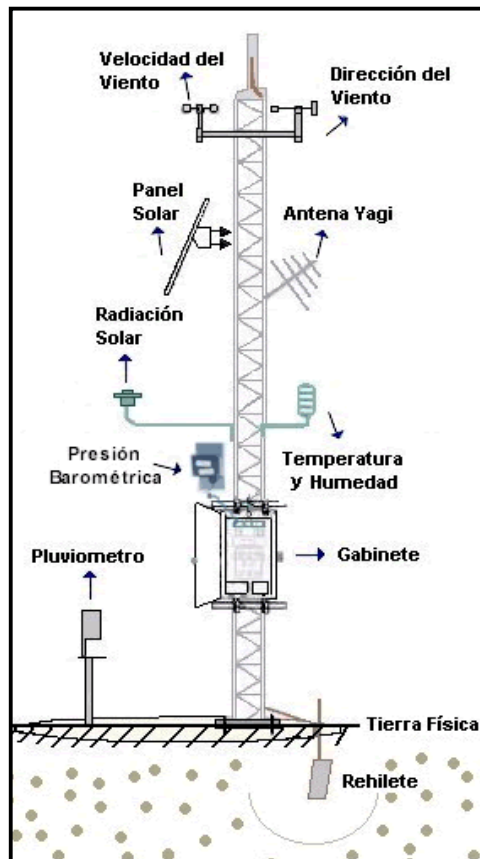
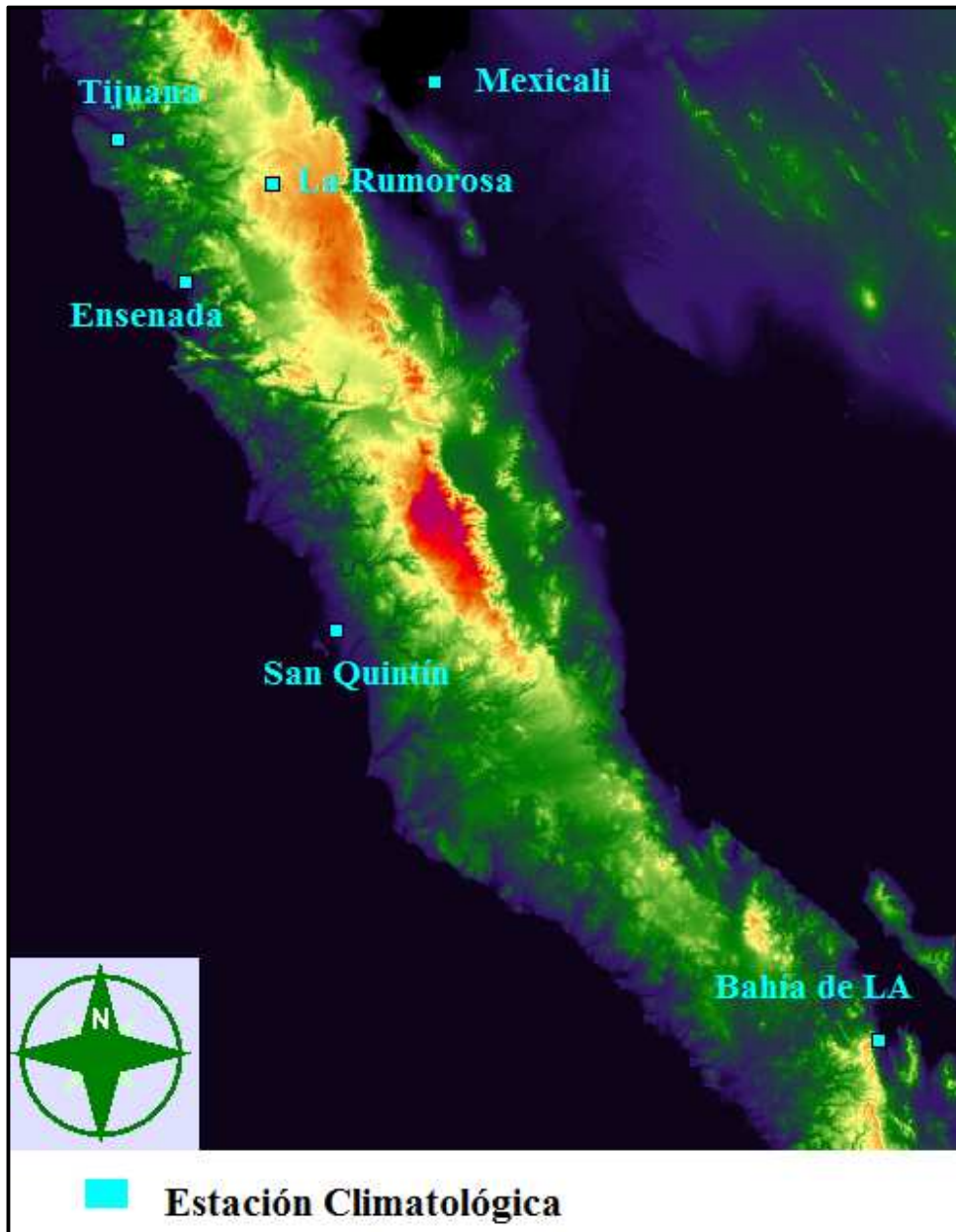


Figura 4.2: Estructura de tipo torre triangular.
<http://smn.cna.gob.mx/emas/>

Tabla 4. 1: Estaciones climatológicas utilizadas.

Estación Climatológica	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Altitud (msnm)	Periodo (años)
<i>Presa Abelardo L. Rodríguez (Tijuana)</i>	32°26'50.31"N	116°54'31.41"O	156	2005-2009
<i>Presa Emilio López Z. (Ensenada)</i>	31°53'29.48"N	116°36'11.20"O	32	1999-2009
<i>La Rumorosa</i>	32°16'20.00"N	116°12'20.00"O	1262	2005-2009
<i>San Quintín</i>	30°31'54.00"N	115°56'13.00"O	32	2001-2007
<i>Mexicali</i>	32°40'0.23"N	115°27'28.30"O	15	2000-2008
<i>Bahía de Los Ángeles</i>	28°56'44.99"N	113°33'36.46"O	10	2005-2008



Fuente MDE: INEGI

Figura 4.3: Ubicación de las estaciones climatológicas en un Modelo Digital de Elevaciones del Estado de Baja California.

4.2 Variación de la velocidad del viento con la altura

La velocidad del viento varía en el tiempo y el espacio como se mencionó antes. La velocidad real del viento en cualquier lugar también varía en el tiempo y la dirección en torno a su valor medio, debido al efecto de la turbulencia. Si se mide la velocidad del viento en la atmósfera a diferentes alturas se observará el fenómeno denominado cizalladura del viento, (Manwell, 2009).

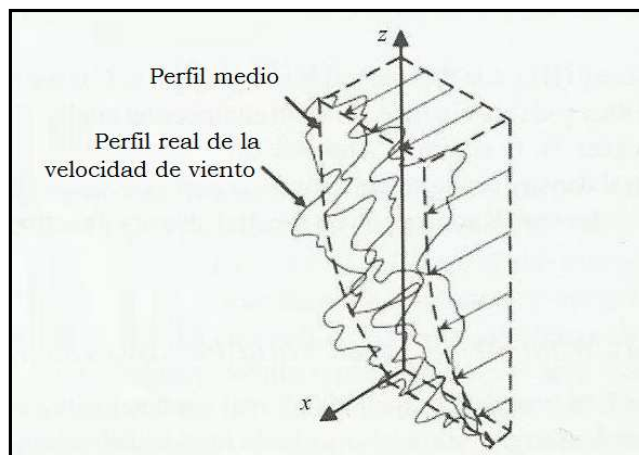


Figura 4.4: Perfil de velocidad experimental, (Manwell, 2009).

El flujo del aire y, por lo tanto, la velocidad del viento se verán afectados si se presentan obstáculos artificiales o naturales a su paso. Los obstáculos artificiales se definen como construcciones realizadas por el hombre como casas, edificios, puentes, etc. Y los obstáculos naturales son aquellos como filas de árboles, montañas, etc.

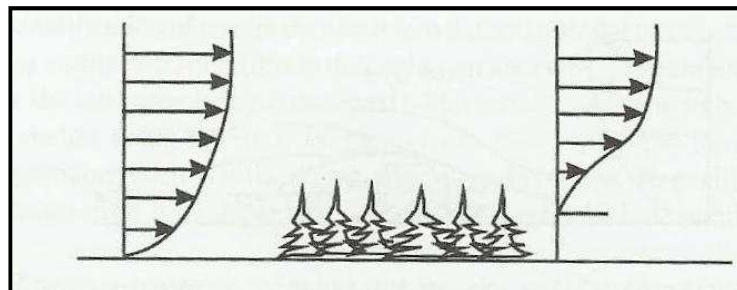


Figura 4.5: Efecto en el viento con obstáculos naturales, cambio en la rugosidad del terreno, (Manwell, 2009).

El efecto de frenado se ejerce también en zonas libres de obstáculos. Las fuerzas de rozamiento, que actúan en las capas de la atmósfera, que se encuentran en contacto con el suelo tienden a disminuir su velocidad, siendo sus efectos menores a medida que se incrementa la altura.

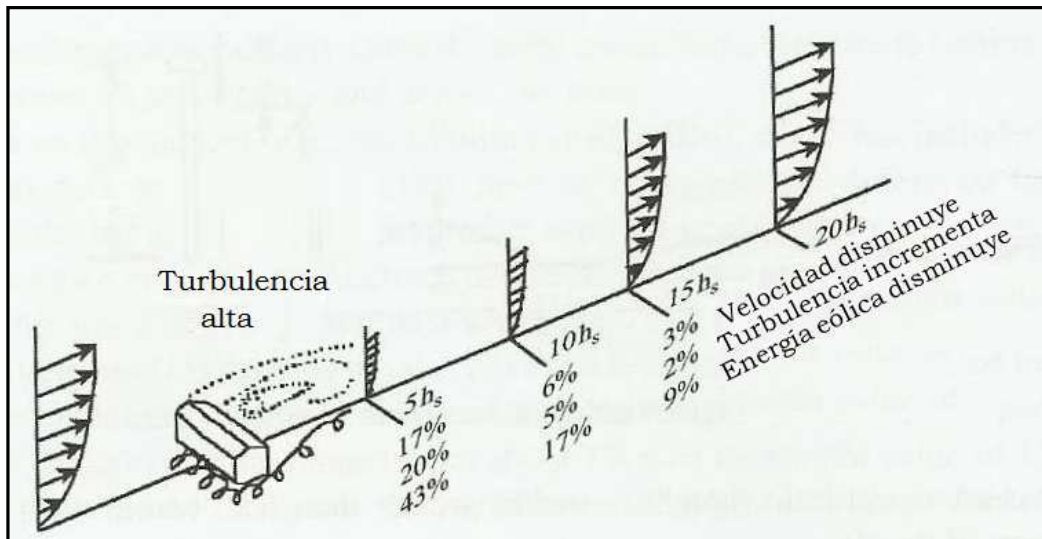


Figura 4.6: Efectos en la velocidad, potencia y turbulencia aguas abajo de un obstáculo artificial, (Manwell, 2009).

La orografía del lugar es muy importante para determinar la velocidad del viento en un punto localizado. El aire que se desplaza en la proximidad de la corteza terrestre debe sortear los innumerables obstáculos que se encuentra a su paso, alternando en mayor o menor medida las líneas de corriente y sus velocidades correspondientes, (Cádiz, 1984).

Los factores que definen el régimen de vientos en un punto determinado dependen de:

- La situación geográfica.
- Las características microclimáticas locales.
- Las irregularidades del terreno.
- La altura sobre el nivel del suelo.

4.3 Análisis estadístico de los datos de viento

La velocidad del viento es la información más importante para evaluar el potencial eólico, ya que éste depende del cubo de la velocidad de viento. El viento no es constante en ningún sitio, éste está influenciado por el clima, el terreno local del suelo y la altura sobre la superficie de éste.

La velocidad del viento como se vio con anterioridad tiene variaciones temporales. Por lo que la velocidad media anual debe ser considerada como un promedio de 10 años o más. En tales situaciones las mediciones a largo plazo son muy caras y los proyectos no pueden esperar tanto tiempo, por lo que los datos de corto plazo se comparan con datos de largo plazo de un sitio cercano. El patrón de vientos general se repite cada año, por lo que las variaciones durante ese periodo pueden ser descritas por una función de probabilidad, (Patel, 2006).

4.3.1 Función de distribución de probabilidad de Weibull

La variación de la velocidad del viento es mejor descrita por la distribución de probabilidad de Weibull en función de dos parámetros:

- Factor de forma k [-] el cual describe la distribución de las velocidades del viento.
- Factor de escala c , el cual típicamente se relaciona con la velocidad promedio del viento por medio del factor de forma expresado en m/s.

La probabilidad de la velocidad del viento v , durante cualquier intervalo de tiempo está dada por la siguiente función:

$$P(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \text{ para } 0 < v < \infty \quad (1)$$

k = Factor de forma [-]

c = Factor de escala [m/s]

v = Velocidad del viento [m/s]

Los factores de distribución de Weibull se estiman mediante las ecuaciones 2 y 3, utilizando los valores de la Velocidad promedio horaria mensual y la desviación estándar, (Hernández, 2007).

Factor de forma

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_m}\right)^{-1.086} \quad (2)$$

σ = Desviación estándar (m/s)

V_m = Velocidad promedio (m/s)

Una manera aproximada de obtener el factor de escala es:

$$c \cong \frac{V_m}{C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3 + C_4x^4} \quad (3)$$

$$C_0 = 0.886259184149$$

$$C_1 = 0.00852888014766$$

$$C_2 = 0.0257748943765$$

$$C_3 = -0.002117760028167$$

$$C_4 = 0.000664358428$$

$$x = 4(1+1/k) - 6$$

En la Figura 4.7 se muestra una distribución de probabilidad de Weibull con un parámetro de escala = 10 y parámetros k = 1, 2 y 3.

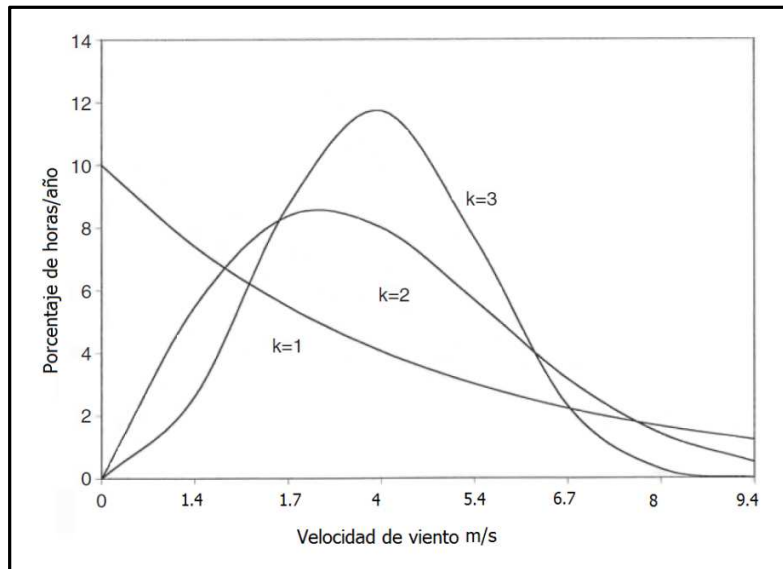
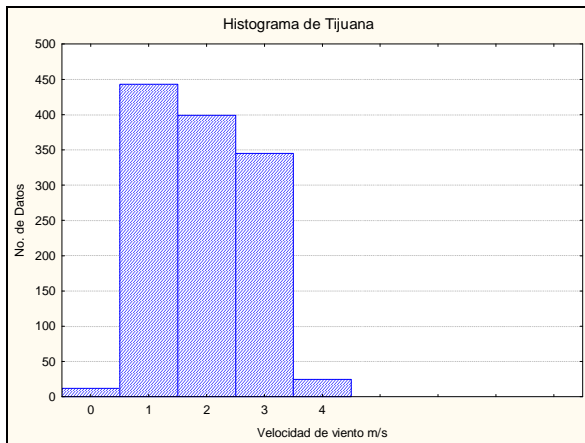


Figura 4.7: Función de densidad de probabilidad de Weibull, (Patel, 2006).

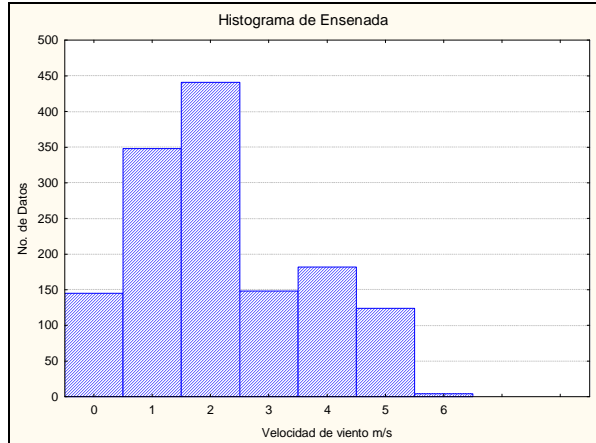
4.3.2 Histogramas de frecuencias

Una descripción informativa de cualquier conjunto de datos está dada por la frecuencia de ocurrencia u arreglo distribucional de las observaciones en el conjunto. El histograma es una gráfica muy importante para describir la naturaleza de la distribución. El histograma es una gráfica de barras donde la escala horizontal representa clases de valores de datos y la escala vertical representa frecuencias. Las alturas de las barras corresponden a los valores de las frecuencias; en tanto que las barras se dibujan de manera adyacente, sin huecos entre sí (Triola, 2009).

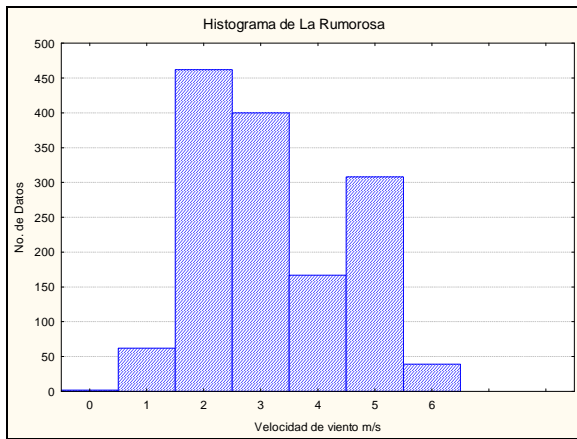
El periodo de evaluación para cada estación climatológica varía por la disposición de datos, por lo que la escala vertical será distinta en las estaciones, ver Figura 4.8. La escala horizontal de la velocidad de viento, también será distinta en cada estación, ya que existen lugares con mejor velocidad de viento que otros.



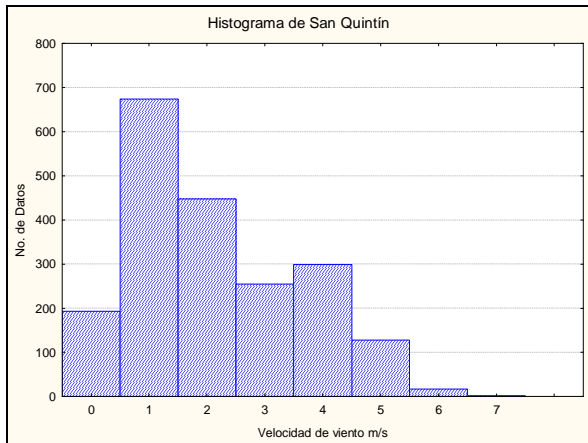
1.- Tijuana.



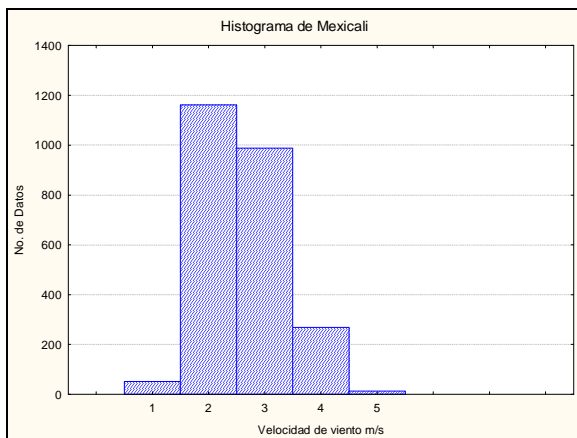
2.- Ensenada.



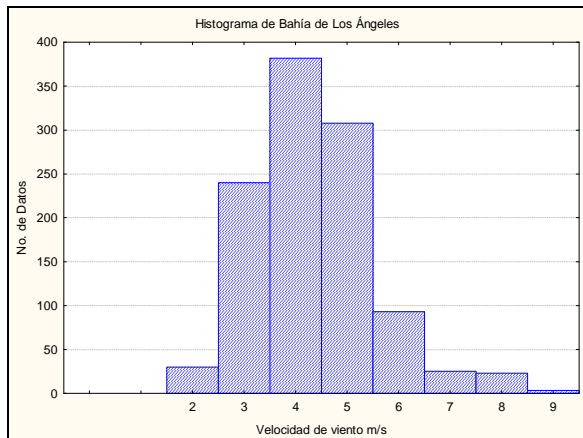
3.- La Rumorosa.



4.- San Quintín.



5.- Mexicali.



6.- Bahía de Los Ángeles.

Figura 4.8: Histograma de frecuencias relativas para la velocidad del viento en cada estación climatológica.

4.3.3 Funciones de distribución de probabilidad de Weibull por estación climatológica

Se calcularon las distribuciones de Weibull para cada estación climatológica Figura 4.9 y 4.10, en periodos anuales y mensuales, esto nos indicará el panorama de la variación de la velocidad media del viento a lo largo del periodo de evaluación. La metodología que se utilizó para las distribuciones de Weibull se muestra en la siguiente sección.

4.3.3.1 Metodología para el cálculo de las distribuciones de Weibull

1. Se ordenan los valores de la velocidad del viento en periodos: diario, mensual y anual de cada estación climatológica, con la base de datos en Excel proporcionada por CONAGUA. El orden de los datos se realizó de las 0:00 h hasta las 24:00 h.
2. Se calculan las variables estadísticas: media V_m y desviación estándar D_s para cada periodo a evaluar de la velocidad de viento.
3. Mediante las aproximaciones de los parámetros de Weibull k y c , ecuaciones (2) y (3) sección 4.3.1 se calculan los parámetros para el periodo mensual y anual de la velocidad de viento, en cada estación climatológica.
4. Con los valores de k y c , se procede a graficar las distribuciones de probabilidad de Weibull en el programa Minitab. Se varían los parámetros para obtener las distribuciones de los diferentes años y meses.
5. Una vez graficados los parámetros se procede a realizar un filtrado dejando sólo los valores k y c , de cada periodo de la estación climatológica.
6. Dar formato a la gráfica, nombrarla e introducir las variables de velocidad media y año.

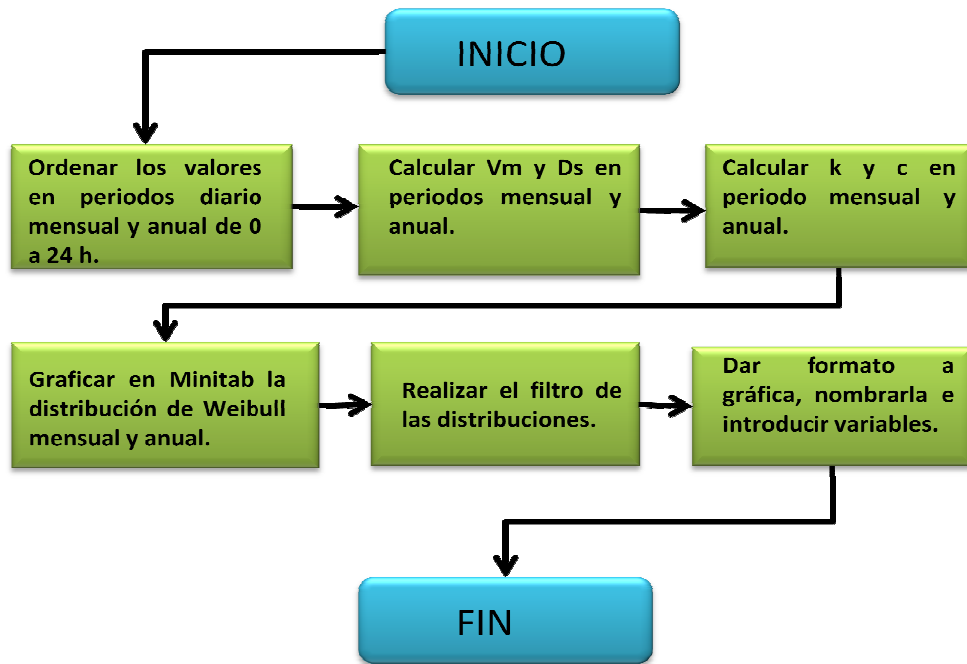


Figura 4.9: Diagrama de flujo para determinación de las distribuciones de probabilidad de Weibull.

Distribución de la probabilidad anual para cada estación.

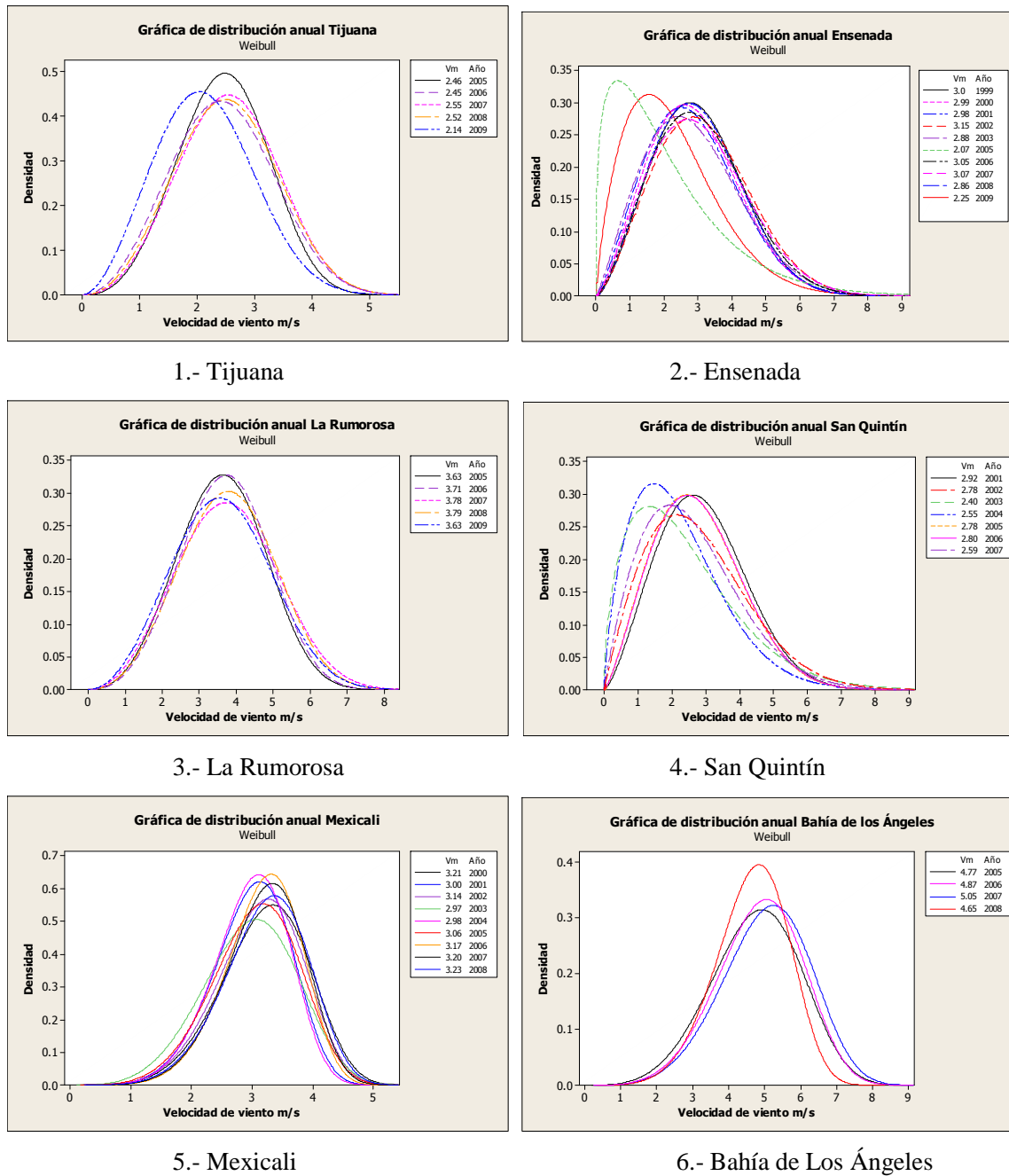


Figura 4.10: Distribución anual de la densidad de probabilidad de Weibull para cada estación climatológica.

La distribución anual de Weibull para cada estación se presenta en la Figura 4.10. Como se observa en algunas de las estaciones hay cambios en la velocidad media anual del viento, sobre todo es muy notable en las estaciones de la costa del Pacífico Norte, como Ensenada, Tijuana y San Quintín.

Este cambio en la disminución de la velocidad media del viento parece ser atribuible al fenómeno de El Niño, que se presentó entre 2002 y 2003 con un incremento de la temperatura oceánica de once meses consecutivos ver Tabla 2.4. En el 2004-2005 también se presentaron nueve meses consecutivos, y de manera más débil entre 2006 y 2007 con una duración de seis meses. En el 2009 se repite el incremento en la temperatura oceánica con once meses.

Cabe mencionar que esta relación de la disminución de los vientos por la presencia del fenómeno de El Niño, se tomó en cuenta sólo con el incremento de la temperatura, ya que cualquiera de estos periodos pudo haber atraído diversas anomalías como lluvias, sequías, etc.

El fenómeno de El Niño hace que disminuyan los vientos en una forma considerable para las estaciones de la costa por lo que también afectará directamente la generación de potencia eólica. Este tipo de fenómenos debe tomarse en cuenta a la hora de realizar una instalación de turbinas eólicas en la región de la costa del Pacífico en Baja California.

Distribución de la probabilidad mensual para cada estación.

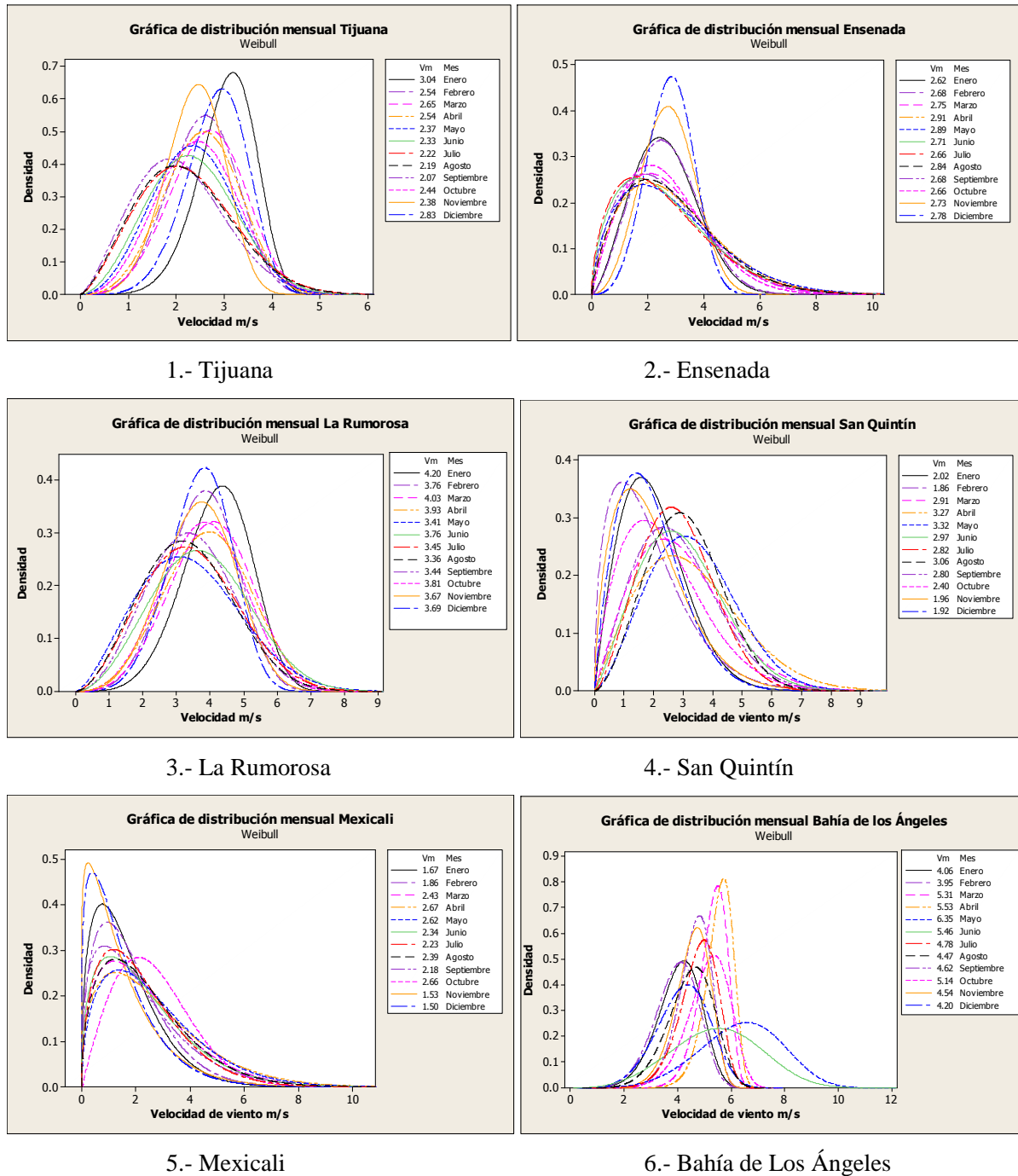


Figura 4.11: Distribución mensual de la densidad de probabilidad de Weibull para cada estación climatológica.

Las distribuciones mensuales de Weibull para cada estación, nos indican en qué meses la velocidad del viento disminuye o se mantiene constante. Para el caso de las estaciones de la zona Norte que son Tijuana, Ensenada y La Rumorosa, presentan un comportamiento similar en las distribuciones de Weibull, ya que en el periodo de invierno de Noviembre a Febrero, las distribuciones se mantienen simétricas y en los demás meses toman en algunos casos una asimetría positiva, es decir recargada a la izquierda.

En las estaciones de San Quintín, Mexicali y Bahía de Los Ángeles, los mejores meses de viento son de marzo a junio, y en el invierno hay una debilidad más marcada a diferencia de las otras estaciones de la costa del Pacífico, en la zona norte del Estado.

4.4 Distribuciones temporales de la velocidad del viento

La distribución estacional del recurso eólico para un sitio en particular depende de la elevación, su ubicación y su exposición a los flujos de vientos dominantes y más fuertes. Las estaciones se ubican en diversos sitios del Estado, en la zona costa del Pacífico tenemos a Ensenada, Tijuana y San Quintín; por la parte del Golfo de California esta Bahía de Los Ángeles. En la zona valle tenemos a Mexicali y en la montaña se ubica la estación de La Rumorosa. Por lo que las estaciones abarcan parte significativa del territorio en el Estado de Baja California.

Entre las variaciones temporales para la velocidad del viento se encuentran las interanuales, anuales y diurnas. Como se vio en las distribuciones de probabilidad de Weibull anuales y mensuales, las velocidades en cada sitio varían según el mes y la ubicación geográfica de la estación.

Para ver el comportamiento del viento interanual, anual y diurno de cada estación climatológica se elaboraron gráficas. El periodo de evaluación para estas gráficas dependió de la disposición de los datos, ya que había estaciones que no tenían los mismos años.

4.4.1 Metodología para la elaboración de las series de tiempo de la velocidad y dirección de viento.

1. Se le asigna una clave a cada estación climatológica para un fácil manejo de datos.
2. Se limita a un periodo de evaluación para las cuatro estaciones climatológicas, para este estudio por la disposición de datos se tomaron 4 años para cada estación.
3. Se realiza el cambio de hora, ya que la información está en horario UTC, menos 8 h, para la visualización de datos.
4. Se clasifica la información de las dos variables de velocidad y dirección de viento en: anual, mensual y diario y se determina el promedio.
 - Para graficar la serie de tiempo anual, se utiliza el valor promedio de cada mes en un periodo de 4 años.
 - Para graficar la serie de tiempo mensual se utiliza el valor promedio por día en cada mes.
 - Para graficar la serie de tiempo diurna se utiliza el valor promedio horario de las 00:00 h a las 24 h.
5. Se obtienen los gráficos en Excel de la dirección de viento y velocidad.

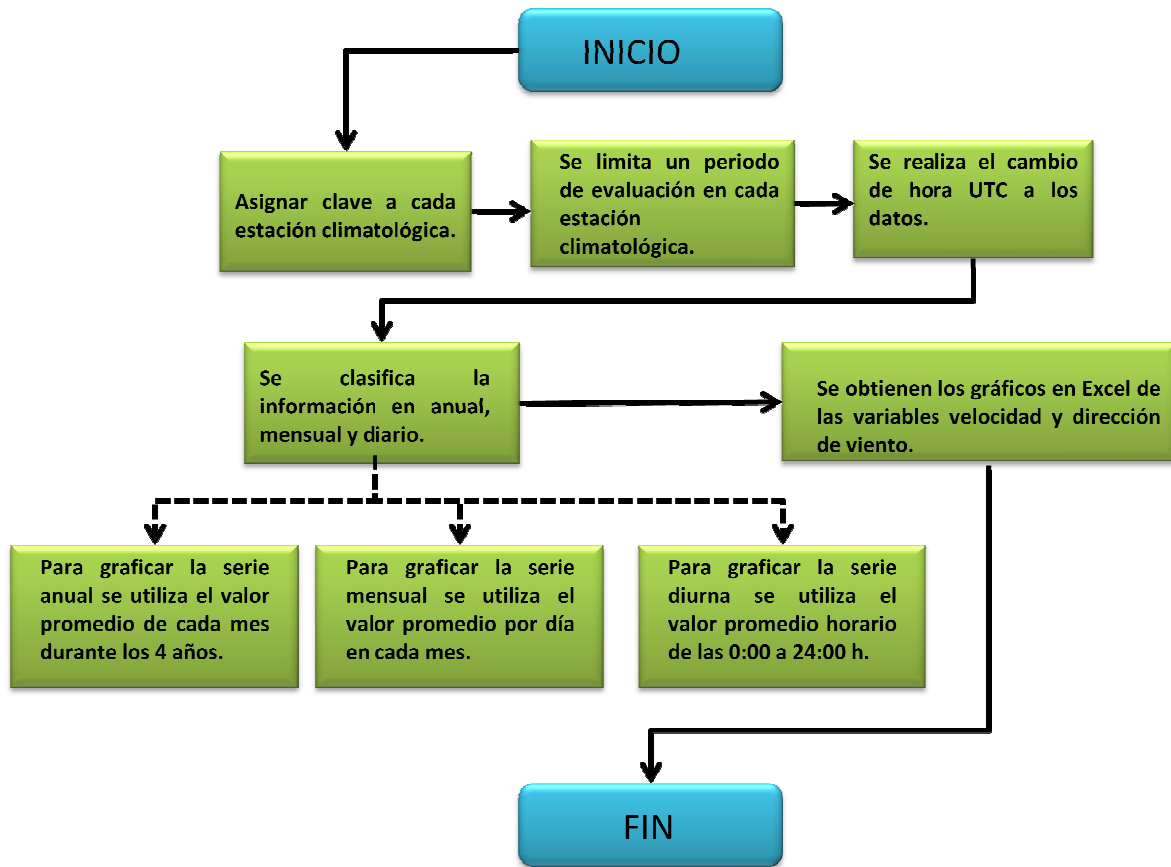


Figura 4.12: Diagrama de flujo para calcular las series de tiempo de la velocidad y dirección del viento.

4.4.2 Distribución de la velocidad anual

A continuación se muestra el nombre que se le asignó a cada estación y el periodo de evaluación para la realización de las series de tiempo de la velocidad de viento.

Tabla 4. 2: Información de cada estación climatológica.

Estación Climatológica	Clave	Periodo de Evaluación
Tijuana	TIJU	2005-2008
Ensenada	ENSE	2004-2007
La Rumorosa	LRUM	2005-2008
San Quintín	SQUN	2004-2007
Mexicali	MXCL	2005-2008
Bahía de Los Ángeles	BDLA	2005-2008

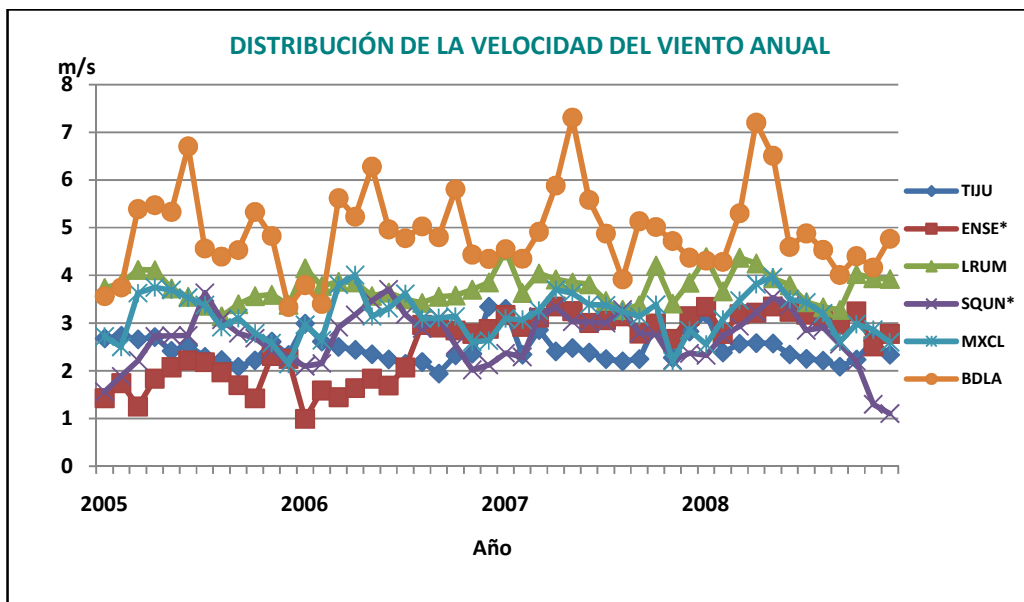


Figura 4.13: Series temporales de la velocidad del viento interanual para seis estaciones en Baja California.

En las estaciones de la costa del Pacífico, la velocidad del viento varía en el año 2005 periodo de El Niño, como se observa claramente en Ensenada. El comportamiento interanual del viento para cada estación, sigue un patrón de comportamiento similar en cada año.

El lugar que cuenta con mayores velocidades de viento es BDLA, el que tiene velocidad más baja en el 2005 y 2006 es Ensenada y en el 2007 y 2008 es Tijuana. La mayoría presenta una variación interanual, como se dan en algunos que la velocidad del viento disminuye en verano y otros en invierno, este comportamiento en la velocidad de viento se irá repitiendo de manera similar en cada año.

4.4.3 Distribución de la velocidad mensual

La velocidad del viento en cada estación climatológica varía dependiendo de la estación del año. En la siguiente gráfica se muestra la velocidad promedio mensual a lo largo de un año. Como se observa para la estación de Bahía de Los Ángeles (BDLA), la primavera está muy marcada por un considerable incremento en la velocidad promedio mensual, para bajar en verano y en otoño dar otro incremento para los meses de septiembre y octubre. Mexicali y San Quintín presentan el mismo patrón que Bahía de los Ángeles pero con una magnitud menor, está información se corrobora con las distribuciones de probabilidad de Weibull.

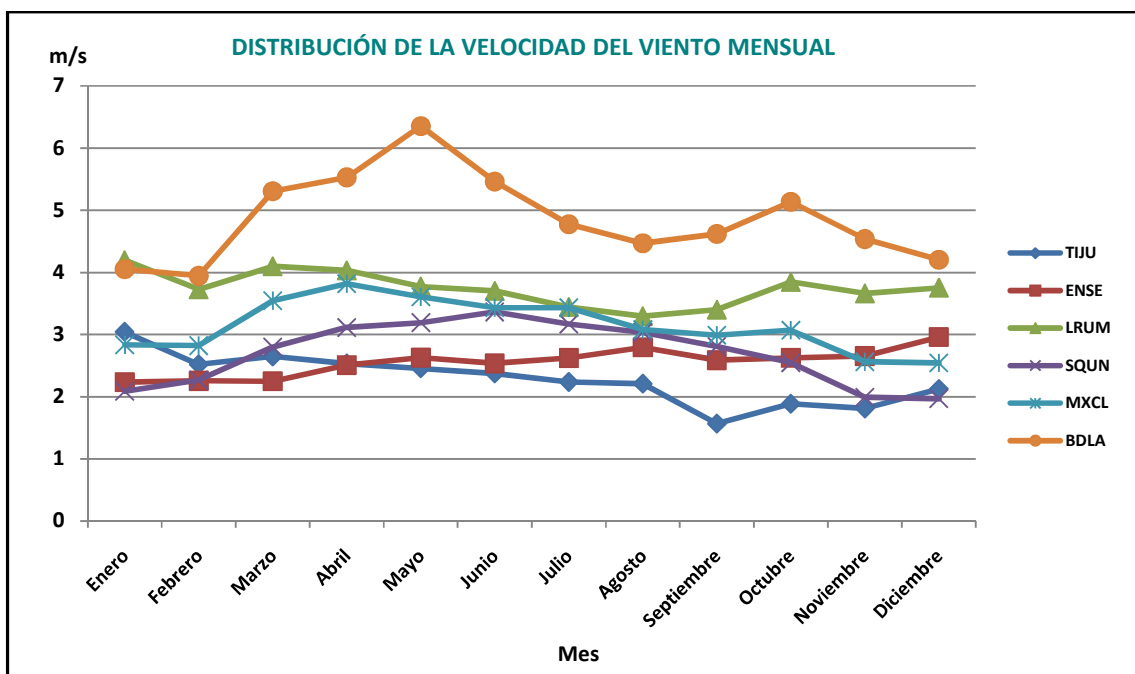


Figura 4.14: Cambios estacionales en la velocidad del viento promedio mensual.

En la Figura 4.14 se muestra cuales son los meses con mayor velocidad de viento, información útil en la planificación de una central eólica. Aunque aquí se muestra información de la velocidad promedio mensual, esto se deberá confirmar en los gráficos de cálculo de la potencia eólica en esta misma unidad sección 4.8 donde se determinará la cantidad de energía extraída del viento.

4.4.4 Distribución de la velocidad diurna

Las variaciones diurnas de la velocidad del viento dependen de la hora del día. Este tipo de variaciones en la velocidad del viento se debe a la diferencia de ganancia de energía por la superficie de la tierra durante el ciclo de radiación diaria. Por lo que en la mayoría de las estaciones, cuando sale el Sol, y empieza a calentar la superficie de la tierra, se empieza a establecer una circulación del aire debido al cambio de densidad. Esto hace que se perciba claramente el incremento en la velocidad del viento para algunas regiones cuando amanece.

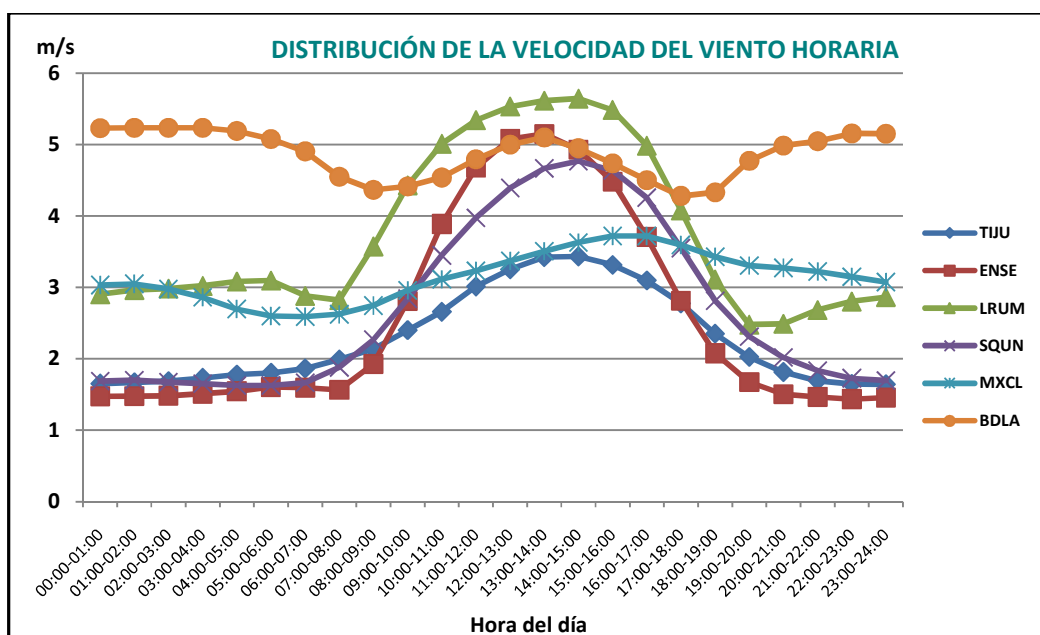


Figura 4.15: Variación diurna de la velocidad del viento, para cuatro años de evaluación.

En la mayoría de las estaciones la hora pico en la velocidad del viento oscila entre las 13:00 y 16:00 h, a excepción de Bahía de Los Ángeles donde existe un incremento notablemente marcado durante el día a las 13:00 h, y en la madrugada se da la hora pico alrededor de las 3:00 am. Para Tijuana y Ensenada la hora pico en la velocidad de viento es alrededor de las 13:00 h; para La Rumorosa y San Quintín la hora pico es alrededor de las 14:00 h; para Mexicali la hora pico es a las 16:00 h aproximadamente. Como se observa en la Figura 4.15, la velocidad promedio del viento durante la noche es muy débil para casi todas las estaciones, menos BDLA que durante la noche es cuando se presenta la hora pico alrededor de las 3:00 h.

4.4.5 Distribución de la dirección del viento anual

La dirección del viento cambia considerablemente para las diferentes escalas. En la Figura 4.16 se muestra el cambio en la dirección del viento a lo largo de un periodo de cuatro años. Como se observa hay una conexión directa entre algunas estaciones, que podrían ser influenciadas por características similares de la orografía del terreno.

Como ejemplo tomamos a Tijuana y San Quintín, que son dos estaciones que están cercanas al mar, la región dominante de viento en invierno para ambas estaciones es del Noreste y cambia en verano a Noroeste. Estas dos estaciones no tienen grandes obstáculos que impidan el cambio de dirección en el viento ya que Tijuana está sobre una presa y San Quintín está en la costa sin ninguna montaña en la zona de los vientos predominantes. Se esperaría que Ensenada tuviera la misma dirección de vientos predominantes que Tijuana y San Quintín pero a diferencia de estas dos, Ensenada tiene un obstáculo de una pequeña montaña que obstruye la dirección del viento dominante, y hace que cambie su dirección.

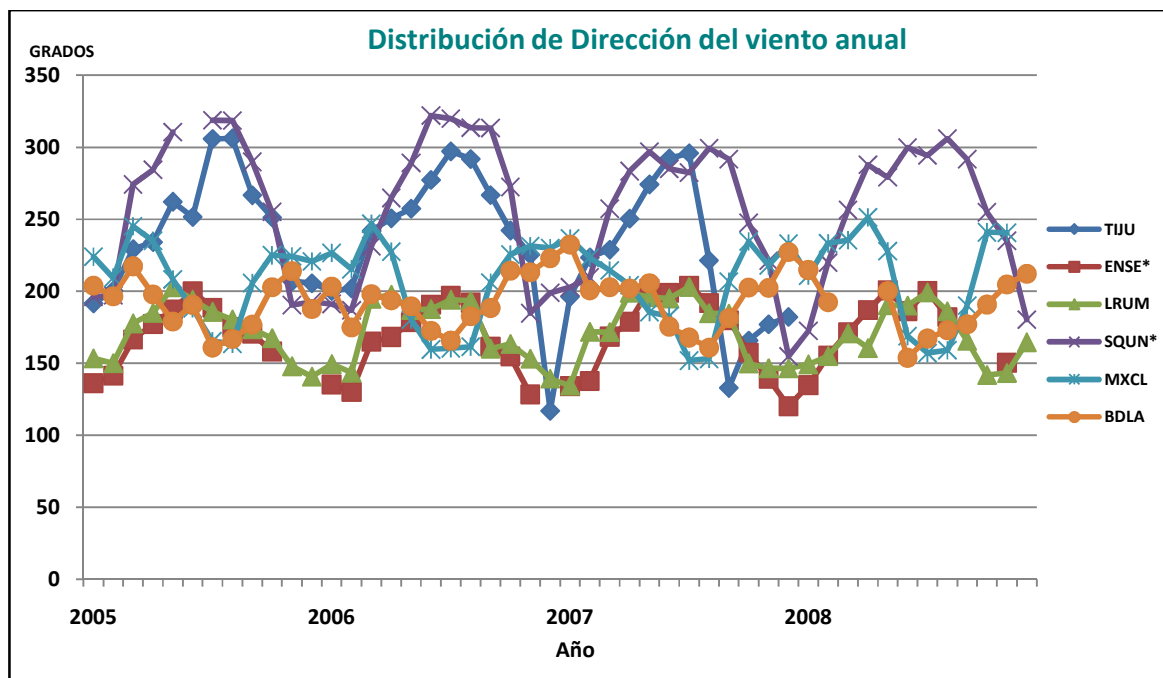


Figura 4.16: Distribución interanual de la dirección del viento.

4.4.6 Distribución de la dirección del viento mensual

En la distribución mensual nos podemos percatar de cómo cambia la dirección del viento en cada estación del año. Como en el caso de Mexicali y Bahía de los Ángeles, tienen el mismo patrón de comportamiento en la dirección del viento. Por su localización geográfica más cercana al Estado de Sonora y en el Golfo de California, estas dos estaciones resultan influenciadas por el Monzón de Norteamérica. Se observa claramente en la Figura 4.17 cómo en verano se invierte la dirección del viento de MXCL y BDLA, sobre todo en los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre, que es cuando se presenta el Monzón de Norteamérica.

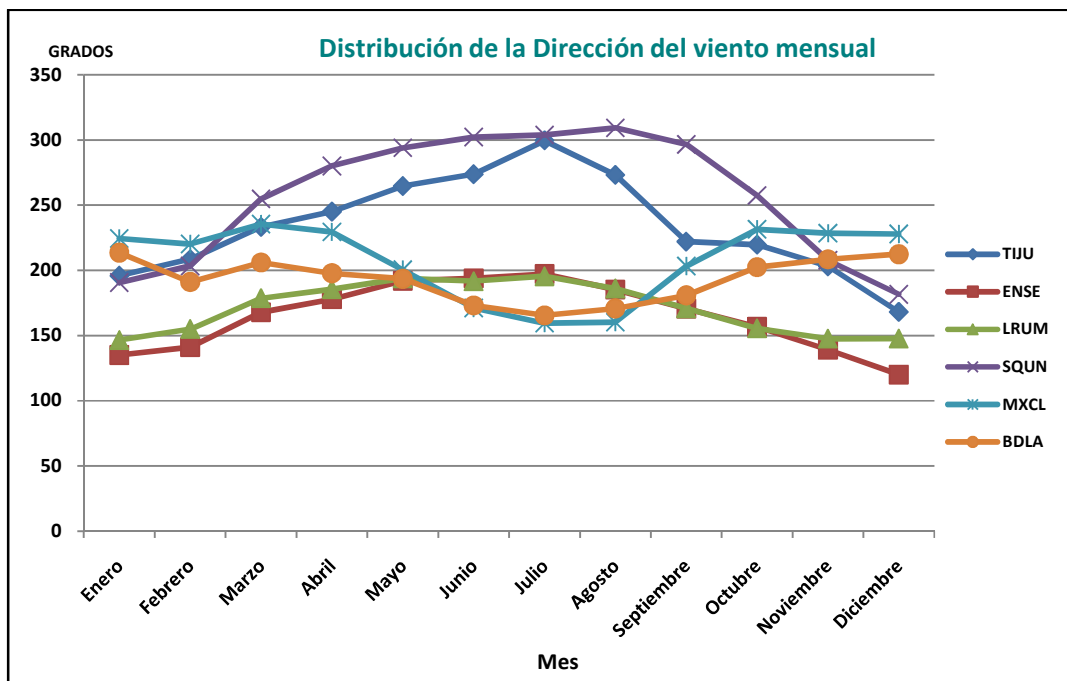


Figura 4.17: Distribución mensual de la dirección del viento.

4.4.7 Distribución de la dirección del viento diurna

El cambio de dirección diurno está relacionado con el incremento de la velocidad que a su vez se relaciona con la cantidad de radiación solar recibida. A la salida del Sol, la velocidad del viento aumenta debido al cambio de densidad y hace que haya un desplazamiento, este desplazamiento provoca un cambio de dirección en los vientos. En la Figura 4.18 se observa claramente el cambio de dirección diurno en cada estación, la mayoría de las estaciones manejan un patrón similar en el cambio de dirección a excepción de Mexicali y Bahía de Los Ángeles que en promedio, durante la noche la dirección dominante es Noroeste y en el día cambia a Sureste, más pronunciado en BDLA.

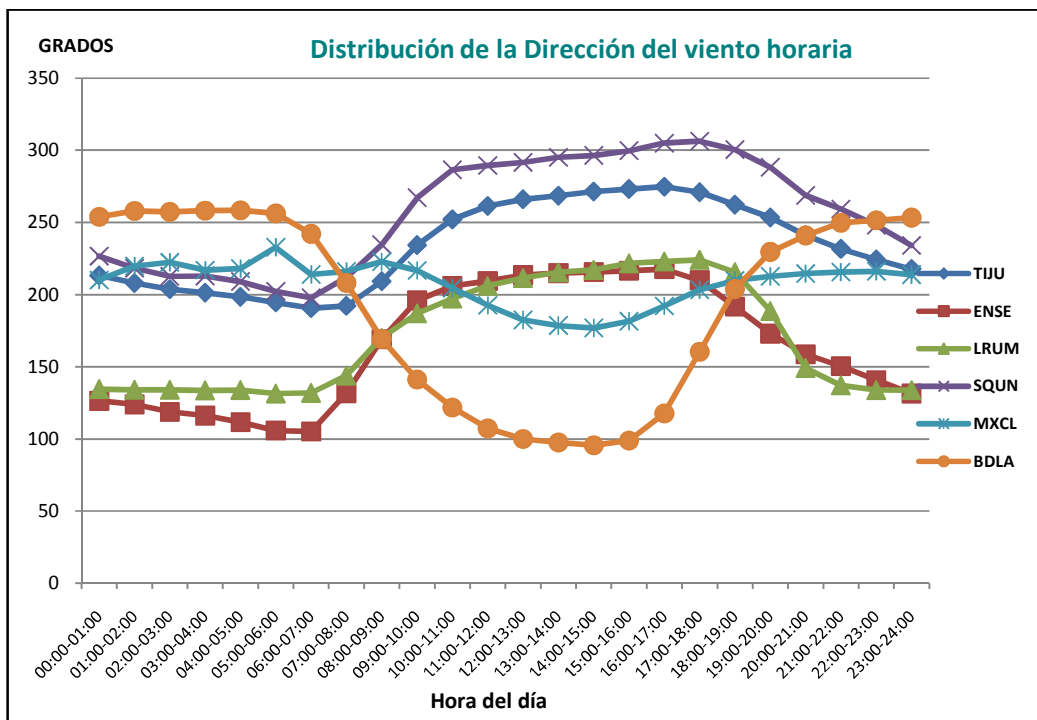


Figura 4.18: Distribución diurna promedio de la dirección del viento.

4.5 Rosas de los vientos

Según la meteorología el viento es aire que se desplaza, definido por dos parámetros que son, su magnitud y dirección. Con los datos de la dirección y rapidez del viento a lo largo de un periodo de tiempo se elabora la denominada *rosa de los vientos*.

Una rosa de los vientos es una herramienta conveniente para visualizar los datos del anemómetro en un sitio de análisis. Con esta herramienta se localizan los vientos predominantes en un sitio, generalmente se representan los datos en rosas de los vientos anuales, estacionales o mensuales, (Manwell, 2009). En ellas siempre se indica un periodo de calma para los vientos, y según el mes o intervalo que representen, se ven afectadas por la ubicación geográfica y topografía del terreno.

4.5.1 Metodología para elaborar rosas de los vientos

1. Para elaborar las rosas de los vientos se utiliza el valor promedio horario, y el programa WRPLOT.
2. Para importar los datos al programa WRPLOT se realiza a través de Excel versión 97-2003. El archivo debe contener en 6 columnas con los valores de: año, mes, día, hora, dirección de viento, velocidad de viento. Ejemplo:

A	B	C	D	E	F
2004	4	1	5	70	5.75

Las horas son de 1 a 24, los valores de dirección E y velocidad de viento F, son los valores promedios para la hora 5 del 1 de abril del 2004.

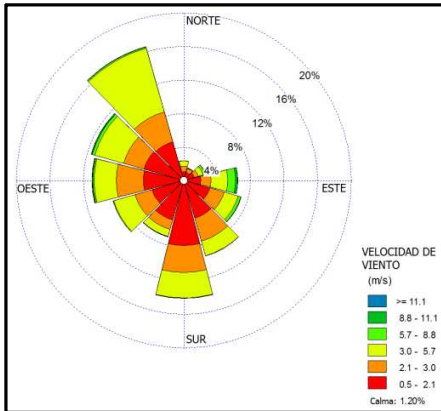
3. Se importa el archivo de Excel en el programa y se introducen los siguientes datos:
ID, ciudad, Estado, Latitud, Longitud, elevación.
4. El archivo importado queda como .sam, este se abre en el programa para la visualizar la rosa de los vientos.



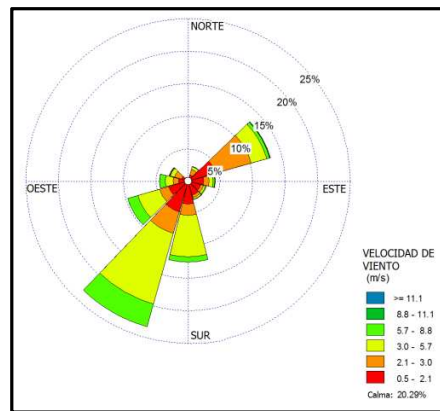
Figura 4.19: Diagrama de flujo para obtener las rosas de los vientos de cada estación climatológica.

4.5.2 Rosas de los vientos por estación climatológica

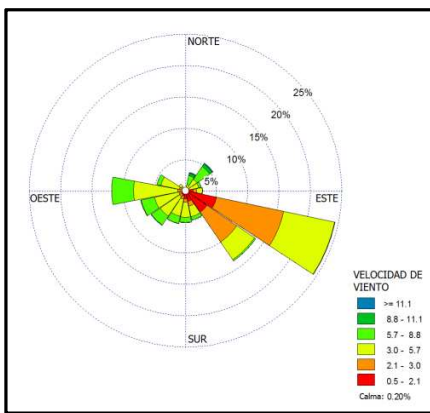
En esta sección se presenta una rosa de los vientos por estación climatológica en periodo correspondiente a cuatro años de evaluación.



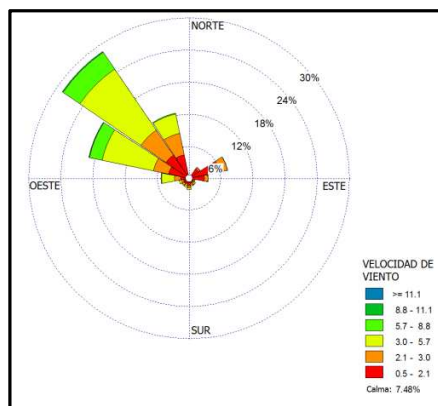
1.- Rosa de los vientos Tijuana



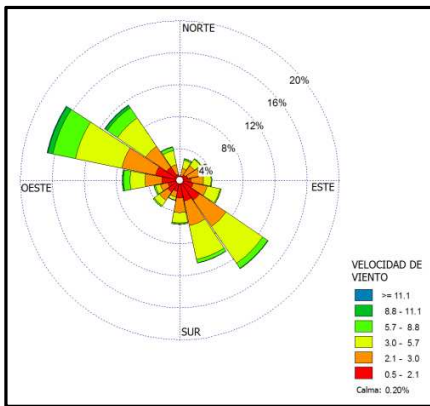
2.- Rosa de los vientos Ensenada



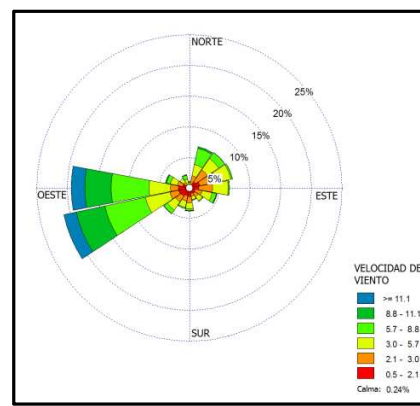
3.- Rosa de los vientos La Rumorosa



4.- Rosa de los vientos San Quintín



5.- Rosa de los vientos Mexicali



6.- Rosa de los vientos Bahía de LA

Figura 4.20: Rosas de los vientos para cada estación climatológica.

En la Figura 4.20 se presentan las rosas de los vientos para cada estación climatológica en un periodo de 4 años. Tijuana se ve influenciada en mayor proporción por los vientos del Noroeste en un 40 % y del Suroeste en un 31 % y en menor proporción del Sureste con 23 %

aproximadamente. La estación de Ensenada se ve más influenciada por vientos del Suroeste con un 51 % y en menor proporción del Noreste con un 20 % aproximadamente, y presenta un 20 % de periodos de calma, lo que la hace, la estación con mayor porcentaje de calma.

Para la estación de La Rumorosa los vientos se presentan del Sureste en un 43 % y del Suroeste en un 38 % aproximadamente, es una de las estaciones que menos calma tiene junto con Mexicali. La estación de San Quintín es la estación que tiene más influencia en una sola dirección con un 68 % de vientos provenientes de Noroeste y en menor proporción 16 % del Noreste, con un periodo de calma de 8 % aproximadamente.

Mexicali se ve influenciada por los vientos del Noroeste en un 41 % y del Suroeste con un 35 % aproximadamente, esto es, debido a la inversión de los vientos cuando se presenta el Monzón de Norteamérica durante el verano. Bahía de Los Ángeles se ve influenciada en mayor porcentaje por vientos provenientes del Suroeste con un 54 % y del Noreste con 24 % aproximadamente. El ultimo porcentaje es el que se le atribuye al Monzón de Norteamérica, que provoca una inversión de la dirección de los vientos en la época de verano.

4.6 Energía del viento

La energía puede existir en numerosas formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear, y su forma constituye la energía total E (o e con base en una unidad de masa) de un sistema.

Gran cantidad de sistemas de fluidos se diseñan para transportar un fluido de un lugar a otro con un gasto, una velocidad y una diferencia de elevación especificada, y durante este proceso el sistema puede generar o consumir trabajo mecánico en una turbina o una bomba. Los sistemas de este tipo se pueden analizar de manera conveniente cuando se consideran sólo las formas *mecánicas de energía*.

La **energía mecánica** se define como la forma de energía que se puede convertir completa y directamente a trabajo mecánico por medio de un dispositivo mecánico ideal como lo es una turbina ideal. Las formas más comunes de la energía mecánica son las energías cinética y potencial. La energía que un sistema tiene como resultado de su movimiento en relación con algún marco de referencia se llama **energía cinética**, (Cengel, 2006).



Figura 4.21: Turbina que aprovecha la energía cinética del viento, con una capacidad de 2 MW. La Rumorosa I, Baja California.

El trabajo de flujo se expresa en función de las propiedades del fluido y es conveniente verlo como parte de la energía de un fluido fluyente y llamarlo *energía de flujo*. La energía mecánica de un fluido fluyente se puede expresar a través de la ecuación de Bernoulli en cuanto a la unidad de masa como (Cengel, 2006):

$$e_{mec} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \quad (4)$$

Donde:

$P/\rho =$ *energía de flujo*

$V^2/2 =$ *energía cinética*

$gz =$ *energía potencial*

La única forma de energía mecánica que posee el viento y que puede convertirse por completo en trabajo es la energía cinética.

$$e_{mec} = \text{energía cinética} = \frac{v^2}{2} \quad (5)$$

El potencial de generación de potencia del viento es proporcional a su energía cinética por unidad de masa para determinado flujo de masa.

Flujo másico:

$$\dot{m} = \rho VA \quad (6)$$

Donde:

$$\rho = \text{densidad del aire} = \frac{P}{R \cdot T} \quad (7)$$

P: presión del aire (atmosférica 101 325 Pa)

R = la constante específica de gas del aire (287 J/kg·K)

T = la temperatura del aire en grados Kelvin (Temperatura ambiente 25 °C+273).

V = *velocidad del viento*

$$A = \text{área} = \frac{\pi D^2}{4}$$

D = diámetro del rotor

Potencia máxima:

$$P = \dot{m}ec = \rho VA \cdot \frac{v^2}{2} = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (8)$$

Cabe señalar que:

- La densidad de potencia del viento es proporcional a la densidad del aire. Para condiciones estándar (Temperatura ambiente 25 °C) la densidad del aire es 1.18 kg/m³.
- La energía del viento es proporcional al área de barrido por el rotor (o el diámetro al cuadrado de una máquina de viento convencional de eje horizontal).
- La densidad de potencia del viento es proporcional a la tercera potencia de la velocidad del viento.

4.6.1 Teorema de Betz

Betz supuso que el viento al atravesar el disco que se forma en el área de captación del rotor, sufre una acción de frenado que se manifiesta en una expansión de las líneas de corriente. Las líneas de corriente que atraviesan el área de la turbina, atraviesan un área inferior aguas arriba y una superior aguas abajo (Cádiz, 1984).

Con las velocidades ocurre lo contrario V_1 es superior a V y V_2 inferior.

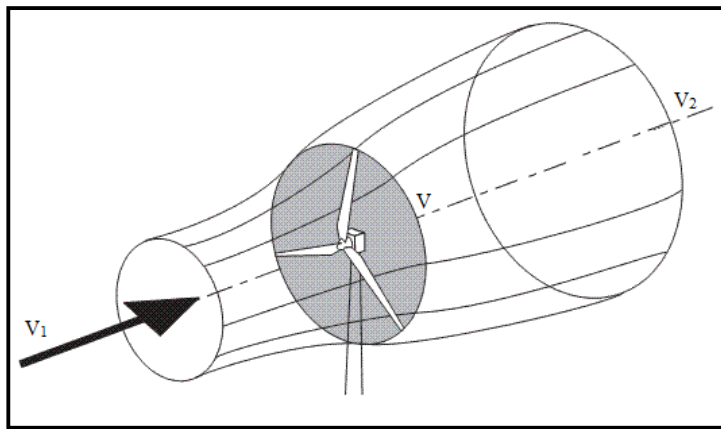


Figura 4.22: Aerodinámica de los aerogeneradores de eje horizontal.
<http://winds-energy.blogspot.com/2007/09/energy-extracting-stream-tube-of.html>

Según el límite de Betz la cantidad de energía disponible del viento que puede ser aprovechada está determinada por:

$$E_{\text{aprov}} = 16/27 = 0.593 \quad (9)$$

Sólo un 59.3 % de la energía del viento puede ser convertida en energía útil del viento, este es el límite superior de las eficiencias de las turbinas y hélices. La eficiencia de las turbinas reales de viento es alrededor de la mitad de este valor, alrededor del 30 % (Cengel, 2006).

La potencia máxima que puede entregar una turbina de viento sería:

$$W_{\text{eléc}} = W_{\text{max}} \cdot \eta_{\text{aerogenerador}} \quad (10)$$

$W_{\text{eléc}}$ = potencia real, W_{max} = potencia máxima, $\eta_{\text{aerogenerador}}$ = eficiencia del aerogenerador.

4.7 Características de un aerogenerador de baja potencia

El uso de aerogeneradores de baja potencia es diferente a los de gran tamaño y su diseño conceptual varía de forma importante. Los pequeños aerogeneradores están destinados a suministrar energía eléctrica en zonas aisladas donde, tanto por la distancia como por la dispersión de los centros de consumo, las redes de distribución son escasas y costosas, (Cádiz, 1984).



Figura 4.23: Aerogeneradores de baja potencia instalados en zonas aisladas.

<http://www.bornay.com/eolica/es/aerogeneradores/>

Existen gran número de fabricantes que producen aerogeneradores de baja potencia, y con diferentes capacidades. En el cálculo por efectuar de la potencia para cada estación climatológica, se tomó en cuenta un aerogenerador de baja potencia dado que la toma de los datos del anemómetro se realizó a 10 m sobre la superficie del terreno. A esta distancia aproximadamente se instalan las pequeñas turbinas de viento.

Tabla 4. 3: Características del aerogenerador de baja potencia

Aerogenerador	Bornay
No. de palas	2
Diámetro del rotor	2 m
Potencia nominal	600 Watts
Velocidad de inicio	3.5
Frenado automático	13 m/s
Dirección de rotación	Contrario a las agujas del reloj
Material	Fibra de vidrio/Carbono
Peso	38 kg

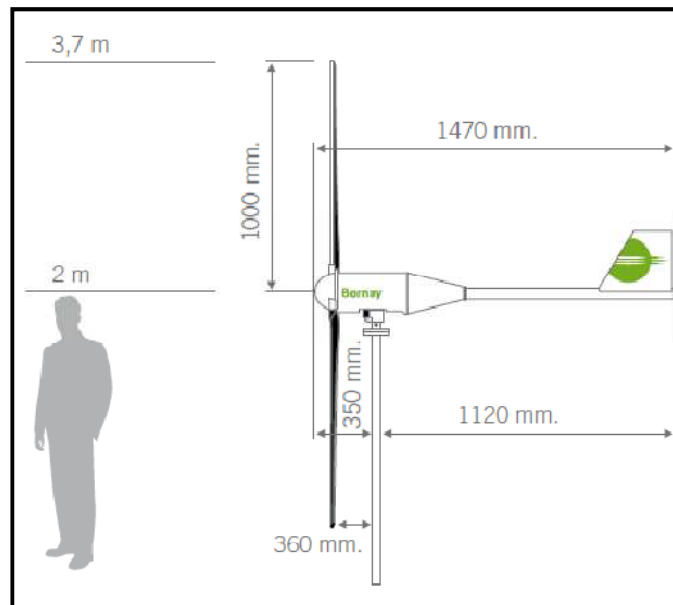


Figura 4.24: Medidas de un aerogenerador de baja potencia.



Figura 4.25: Imagen de pequeña turbina de viento.

4.8 Cálculo de la potencia eólica para cada estación climatológica

Se realizó una base de datos para calcular la potencia máxima extraída, la aprovechada según el límite de Betz y la potencia que generaría un pequeño aerogenerador. Para el cálculo se utilizaron los valores promedios horarios.

La información anemométrica fue tomada a 10 m de altura de la superficie, por lo que se tomó en consideración calcular la potencia para un aerogenerador de 2 m de diámetro. Esto se hizo, suponiendo que el equipo podría ser instalado en una vivienda rural. Si se aumentará la altura respecto a la superficie a 20 ó 30 m, el diámetro de la turbina también se incrementaría y el costo del aerogenerador más instalación ya no oscilaría entre 2,500 y \$4,000 Dlls. si no que aumentaría un 40 % aproximadamente, por lo que la inversión ya no sería tan atractiva para una vivienda rural.

4.8.1 Metodología para calcular la potencia eólica

1. Se realiza una base de datos con el promedio de velocidad de viento de las 0:00 a las 24:00 h.
2. Se ordenan los datos de manera mensual por cada estación climatológica, para después calcular el promedio anual.
3. Se realiza una inspección de calidad en los datos de tal manera que se excluyen aquellos datos que sean negativos, siguiendo la experiencia y recomendación de personal técnico encargado de instrumentos.
4. Se realiza una interpolación en los datos en las celdas con espacios vacíos o “huecos”.
5. Se calcula la densidad del aire a todos los datos de velocidad de viento, ecuación (7) sección 4.6. Se toma como características generales para todas las estaciones la temperatura ambiente de 25 °C y presión atmosférica.
6. Se calcula la energía mecánica del viento con la ecuación (5).
7. Se calcula el flujo másico ecuación (6), el diámetro de la turbina se toma como 2 m.
8. Se calcula la potencia máxima ecuación (8).

9. Se calcula la potencia eléctrica ecuación (10), tomando una eficiencia de la turbina del 30 %.
10. Para la visualización de los gráficos se realiza la corrección horario de UTC menos 8 h.
11. Para realizar los gráficos anual, mensual y horario, se toman los valores en el eje de las x: promedio mensual durante 4 años; valores promedio diarios para cada mes y valores promedio de las 0:00 a 24:00 h.
12. Para calcular la densidad de potencia se realizan los puntos del 1 al 5 de la misma manera, el área se toma como 1 m^2 , $W/A = \frac{1}{2} \rho v^3$. La cantidad total anual se divide entre el número de horas al año 8760. Los resultados se presentan en la Tabla 4.5.

En el diagrama 4.26 se resumen los pasos anteriores.

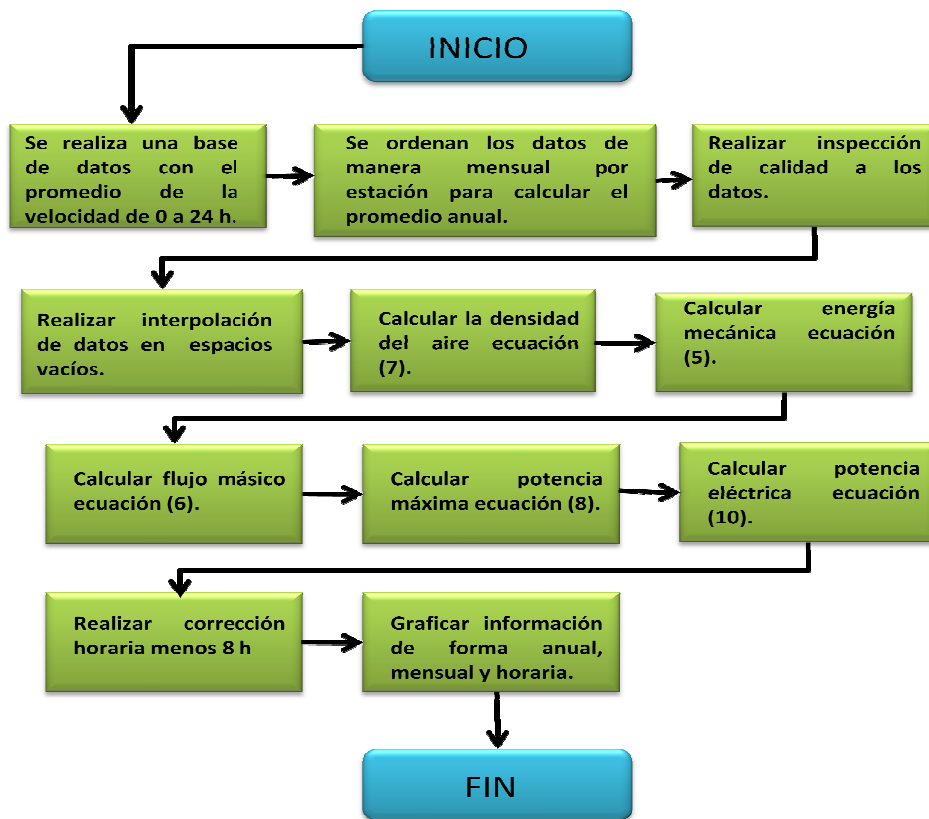


Figura 4.26: Diagrama de flujo para calcular la potencia eólica durante cuatro años en cada estación climatológica.

Para una mejor visualización de la potencia del viento se realizaron gráficas de la variabilidad de potencia anual, estacional y diurna en cada lugar.

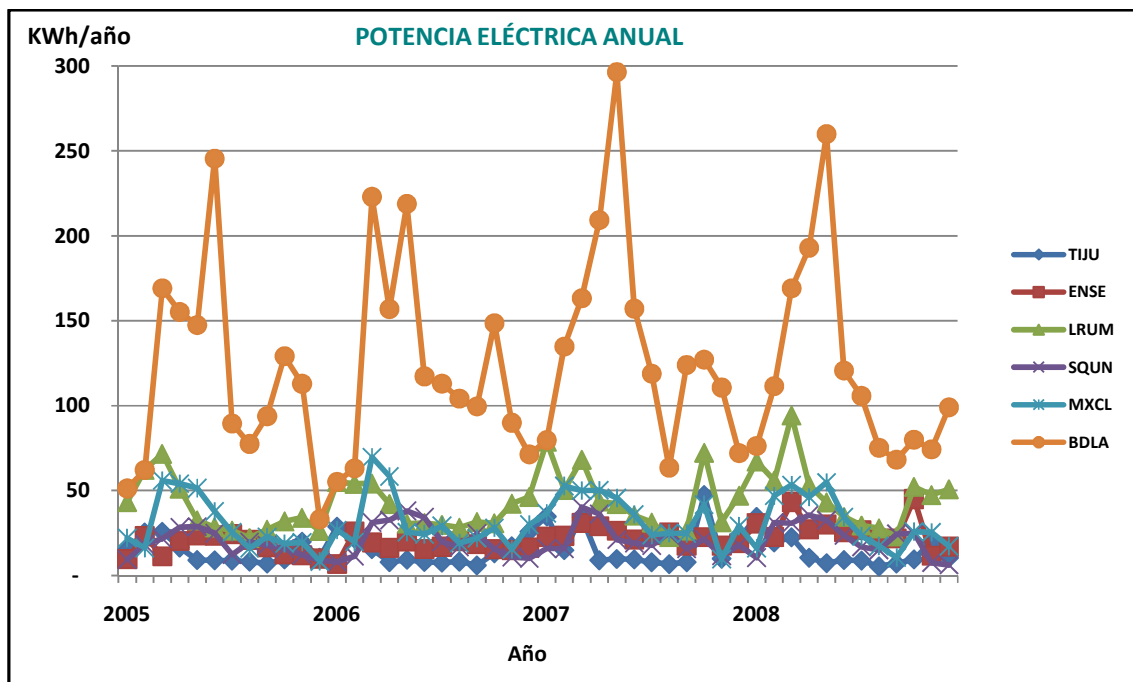


Figura 4.27: Potencia eléctrica anual por estación.

Como se observa en la Figura 4.27 la potencia en BDLA es mucho mayor que en el resto de las zonas, lo que la hace un lugar con excelente potencial eólico. El comportamiento de la potencia es parecido al patrón de comportamiento de la velocidad del viento. Para el caso de BDLA se observa más pronunciada la potencia eólica que es resto de las estaciones, ya que ésta depende directamente de la tercera potencia de la velocidad del viento.

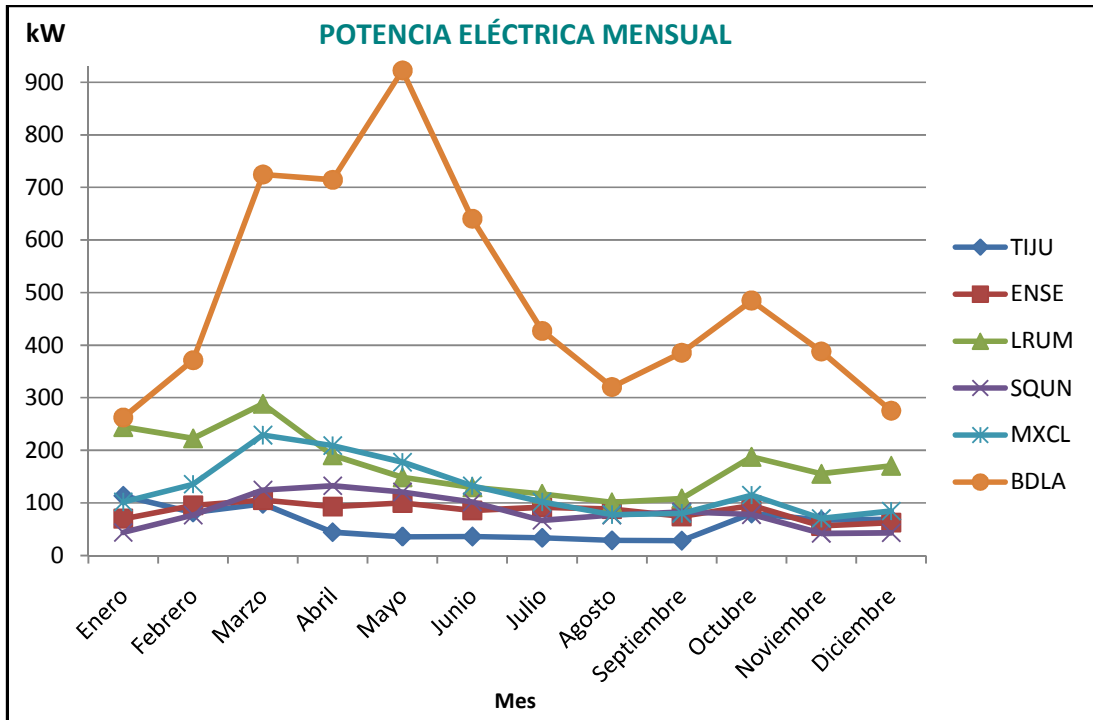


Figura 4.28: Potencia estacional o mensual para cada zona.

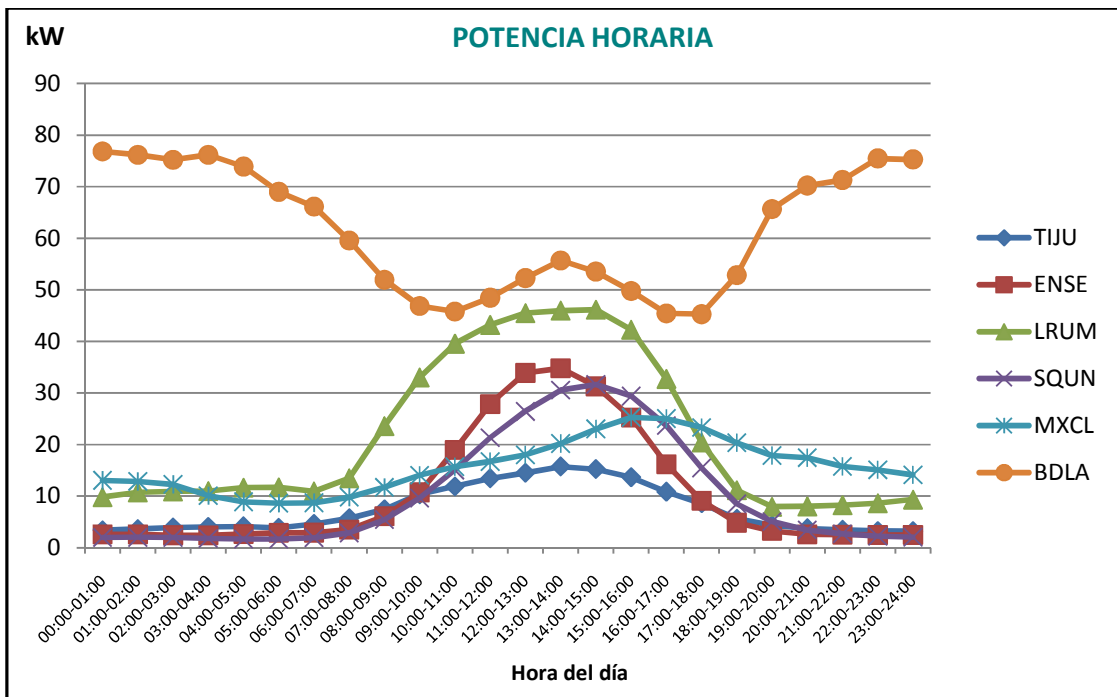


Figura 4.29: Potencia horaria calculada en cada zona.

La mayoría de las zonas de evaluación sigue el mismo patrón de comportamiento, por la noche muy débil y por el día su hora máxima de producción se encuentra entre las 13:00 h y las 15:00 h a excepción de Mexicali que la hora máxima de producción se alcanza alrededor de las 16:00 h y hay más producción en la tarde. También está Bahía de Los Ángeles que es sin duda un lugar con mayor producción de energía eólica durante la noche. Esta situación se puede explicar por la topografía del terreno o a fenómenos meteorológicos que causan un mayor incremento del viento durante la noche.

En la Figura 4.30 se muestra un histograma para observar la producción de energía eólica acumulada en cada año por estación.

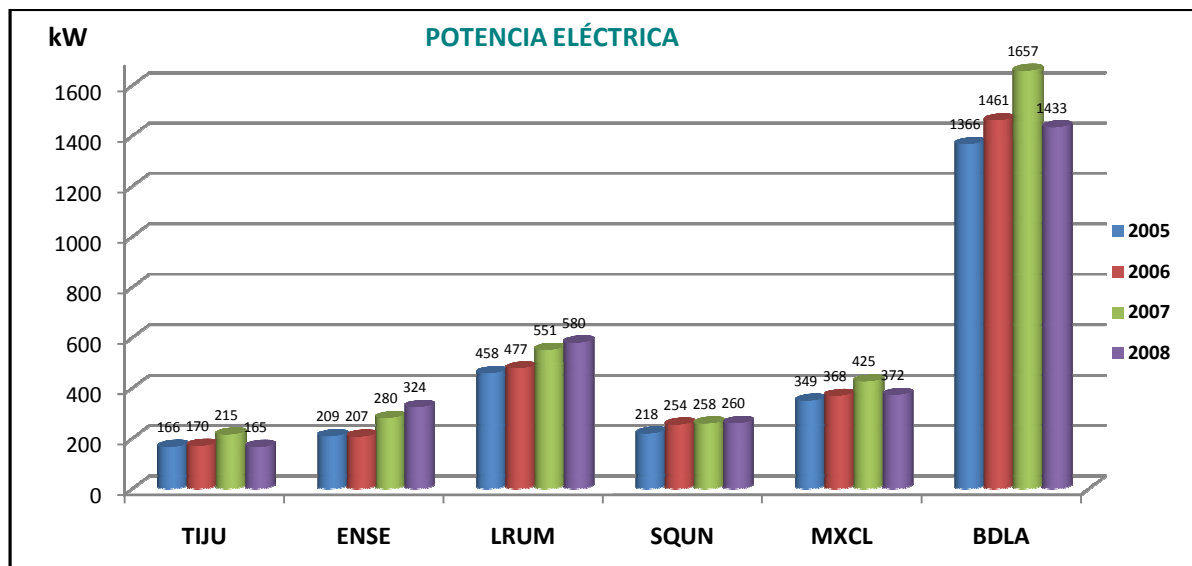


Figura 4.30: Histograma para la potencia eléctrica calculada en cada zona de estudio.

En todas las estaciones existen un incremento de producción eólica del primer año de evaluación en adelante, (para el caso de Ensenada y San Quintín, como ya se mencionó antes, el periodo de evaluación es del 2004 al 2007, por disposición de datos). Aunque se debe mencionar que existió un evento El Niño entre 2004 y 2005. Los resultados mostrados en la Figura 4.30 corroboran el efecto que tiene sobre la velocidad del viento la presencia de este fenómeno meteorológico en el Estado de Baja California.

Para el caso de Tijuana, Mexicali y Bahía de Los Ángeles el último año de evaluación se presentó un decremento en la producción de energía comparado con otras zonas, y sería complicado desarrollar modelos que predigan el comportamiento del siguiente año. Es por ello la importancia de realizar una evaluación del recurso eólico en una zona de por al menos 6 a 10 años. Así se daría seguimiento a fenómenos que afectan la producción de energía eólica y estimaríamos la producción de los años siguientes.

Con la información obtenida en el histograma de la Figura 4.30 anterior se aprecia cómo varía la producción de energía eólica en las diferentes zonas y en los diferentes años. En donde, el lugar con mayor producción de energía eólica es Bahía de Los Ángeles. En dicha zona el recurso podría ser aprovechado tanto en aerogeneradores de baja potencia como en comerciales.

4.8.2 Clasificación de la potencia del viento

Los valores que aparecen en los mapas eólicos se basan en la densidad de potencia del viento, no en la velocidad del viento. La densidad de potencia del viento es un indicador más útil del recurso disponible, ya que incorpora los efectos combinados de la distribución de la frecuencia de la velocidad del viento, la dependencia de la potencia del viento sobre la densidad del viento y el cubo de la velocidad del viento, (Elliot, 2004).

Tabla 4. 4: Clases de densidad de potencia eólica a 10 m de altura de la superficie.

Potencia eólica	10 m	
	Densidad de Potencia del viento (W/m^2)	Velocidad de viento (m/s)
1	0	0
2	100	4.4
3	150	5.1
4	200	5.6
5	250	6.0
6	300	6.4
7	400	7.0
	1000	9.4

Fuente: NREL

Las primeras 4 clases de la Tabla 4.4 abarcan dos densidades de potencia eólica. Por ejemplo, la energía eólica Clase = 3 representa el rango de densidad de energía eólica de 150 W/m² y 200 W/m².

Las áreas designadas de clase 3 o superior son adecuadas para la mayoría de las aplicaciones de la turbina de viento en escala comercial, mientras que la clase 2 o menos son las áreas marginales para aplicaciones a escala de servicios públicos, y pueden ser adecuados para aplicaciones rurales.

Se determinó la cantidad de energía por unidad de tiempo y unidad área (W/m²), ya que los cálculos anteriores correspondieron a la cantidad de energía (kWh). Se muestran en la Tabla 4.5 la densidad de potencia del viento para cada zona en un periodo de un año, perteneciente al 2007.

Tabla 4. 5: Clasificación de la potencia del viento a 10 m en cada zona

Estación	Media	Desv. Std.	Densidad de Potencia (W/m ²)
Tijuana	2.55	0.85	19
Ensenada	3.07	1.4	38
La Rumorosa	3.78	1.34	66
San Quintín	2.59	1.44	30
Mexicali	3.2	0.64	43
Bahía de LA	5.05	1.21	166

Según la clasificación de NREL el único lugar para aplicaciones comerciales es Bahía de Los Ángeles ya que queda en la clase 3, para el caso del resto de las zonas están en la clase 1 según la NREL es marginal aunque se puede utilizar para aplicaciones rurales. Cabe mencionar que los indicadores obtenidos son para 10 metros sobre el nivel del terreno.

De acuerdo con la cantidad de potencia obtenida en cada zona se comparará con la cantidad de energía en kWh que necesita un hogar con artículos básicos, esto se realiza para determinar la cantidad de energía que se puede cubrir con la potencia generada por cada sitio. O en dado caso, la cantidad en porcentaje de energía eólica que se cubriría en la zona, si se utilizara un aerogenerador de baja potencia.

4.9 Demanda de energía para un hogar rural

En esta sección se determinará el porcentaje de energía eléctrica que se puede cubrir en una vivienda rural, con el uso de un aerogenerador de baja potencia, y tomando los datos de energía calculados en la sección 4.8 para cada estación climatológica.

Para realizar este cálculo se investigó la cantidad de energía en kWh que facturó ante Comisión Federal de Electricidad una vivienda de una localidad rural a lo largo del año 2010, con aparatos eléctricos básicos.



Figura 4.31: Casa ejemplo para un hogar en una localidad rural.

Se calculó la cantidad de energía eléctrica que demanda la vivienda en promedio para el año 2010. En la Tabla 4.6 se observan los resultados de los cálculos para dicho año.

Tabla 4.6: Aparatos eléctricos con los que cuenta la vivienda rural.

Cantidad	Aparato	Potencia promedio Watts	Tiempo uso al día (períodos típicos)	Tiempo de uso al mes horas	Consumo mensual kW-hora (Watts/1000) x hora	Meses de uso	Consumo en kW mensual
5	Focos	11	5 h diarias	150	8.25	12	99
1	T.V.	90	3 h diarias	90	8.1	12	97.2
1	Licuadaora	400	10 min/día 4 h 5	5	2	12	24
1	Máquina de coser	100	vec/sem	80	8	12	96
1	Ventilador (se usa sólo en verano)	125	7 h diarias	210	26.25	4	105
1	Enfriador de aire (Sólo en verano)	310	7 h diarias	210	65.1	4	260.4
1	Regadera eléctrica (Sólo en invierno)	3200	10 min/día	5.0	16	4	64
1	Refrigerador chico.	250	7 h diarias	210	52.5	12	630
1	Teléfono de casa.	25	7 h diarias	210	5.25	12	63
1	Cargador de celular.	3	10 min/día	5	0.015	12	0.18

Total = 1,401

Algunos datos de consumo eléctrico promedio fueron tomados de la tabla de consumo de CFE:
<http://www.cfe.gov.mx/sustentabilidad/ahorroenergia/Paginas/Tabladeconsumo.aspx>

Energía Calculada = 1,401 kWh

Energía Facturada = 866 kWh

La cantidad de energía eléctrica que demandó la vivienda en el año 2010 fue de 866 kWh, y la calculada fue de 1,438, la diferencia es de 535 kWh al año.



Figura 4.32: Algunos de los aparatos que se utilizan en el hogar.

La Figura 4.33 muestra el comportamiento de la demanda de energía eléctrica para un hogar rural y el comportamiento de la generación de potencia eólica en las diferentes zonas del Estado de Baja California.

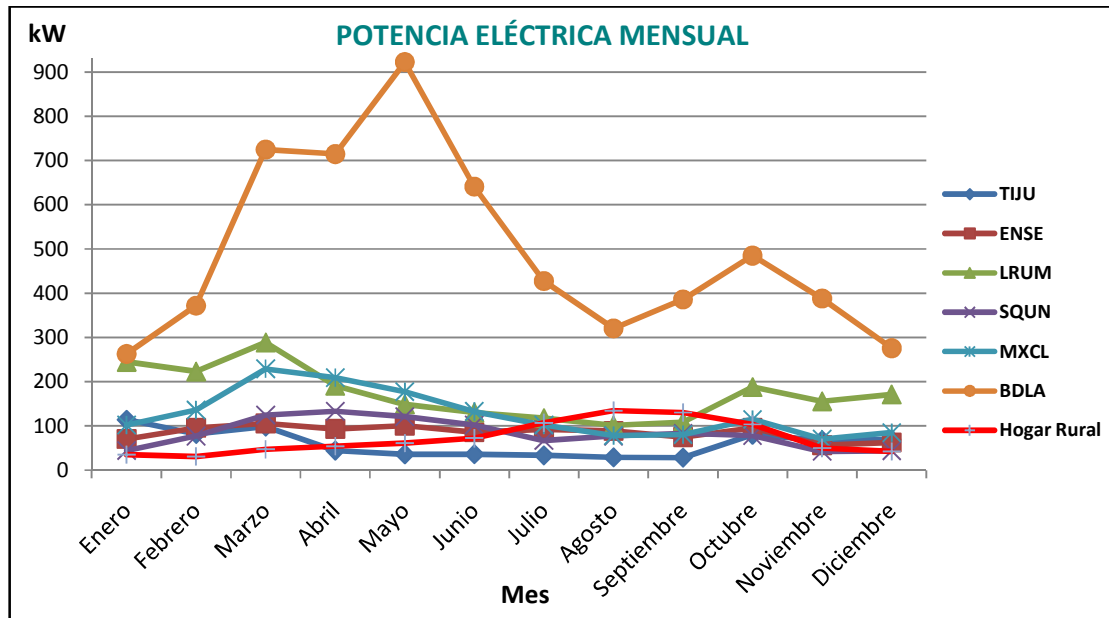


Figura 4. 33: Comportamiento de la demanda eléctrica del hogar rural y energía eléctrica producidas en cada zona.

Como se observa en la Figura 4.33 el comportamiento de la demanda en verano hace un notable incremento por el uso de aparatos eléctricos para combatir el calor, y en la mayoría de las estaciones no producen energía eléctrica en verano, por lo que es indispensable la disposición de un banco de baterías que almacene parte de la energía que produce el aerogenerador.

4.9.1 Cantidad de energía eólica aprovechable en cada sitio

La cantidad de energía facturada demandada por un hogar rural en un año, es de 866 kWh con los aparatos enlistados en la Tabla 4.6. Si se toma como referencia la energía facturada por la vivienda y se supone que en cada sitio donde están las estaciones climatológicas, habría un hogar con las mismas características. Se realiza la comparación de energía entre la vivienda y los sitios de evaluación en la Figura 4.34.

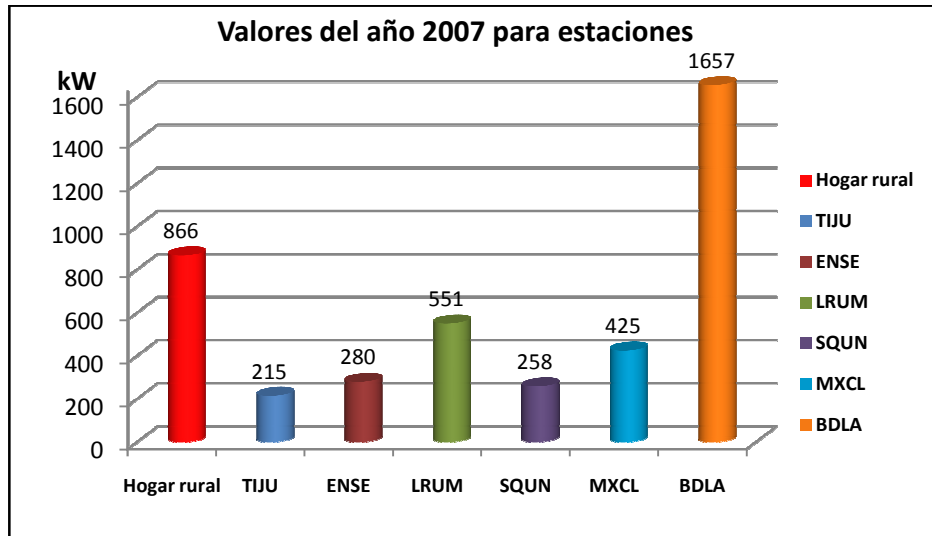


Figura 4.34: Comparación de producción eólica calculada con una carga propuesta.

Se debe tomar en cuenta, que ésta carga corresponde a un hogar típico, por lo que si se quiere aprovechar la cantidad de energía eólica en cada sitio se podría realizar sólo para electrificación rural al considerar una altura del aerogenerador de 10 m.

Tabla 4.7: Porcentaje de energía que cubriría el aerogenerador de baja potencia en cada sitio.

Estación Climatológica	% Energía eólica
Tijuana	25%
Ensenada	32%
La Rumorosa	64%
San Quintín	30%
Mexicali	49%
Bahía de LA	191%

El lugar que definitivamente cubriría por completo la carga y aún más es Bahía de LA, le sigue La Rumorosa con un 64 % y Mexicali con un 49 %. Para Ensenada, Tijuana y San Quintín el porcentaje de utilización de energía eólica es menor, aunque si cubriría parte de esta carga con energía renovable, si se utilizará sólo para alumbrado el resultado sería diferente.

4.9.2 Simulación de energía eólica

Como ya se vio en la sección anterior el recurso en algunas estaciones no es suficiente para suministrar energía al 100 % para una carga en un hogar. Pero si se requiere utilizar sólo para alumbrado y utilización de un pequeño equipo de entretenimiento, si se cubriría esta menor carga. Para determinar la cantidad de energía que podría cubrir sólo para alumbrado, se realiza una simulación en cada sitio.

La simulación de la cantidad de energía eólica que puede ser aprovechada por una turbina de viento de baja potencia se realizó con el software HOMER 2.68 para un sistema sin conexión a la red y el aerogenerador utilizado es el descrito en la sección 4.7.

Tabla 4.8: Resultados de energía eoloeléctrica obtenida para el año 2007

Estación Climatológica	Carga		Producción kWh/Año	Consumo kWh/Año	Horario demanda diaria	Banco de baterías
	Focos 30 W	Radio 25 W				
Tijuana	2	1	220	92	18-21	24
Ensenada	5	1	455	189	18-21	20
La Rumorosa	7	1	620	254	18-21	20
San Quintín	3	1	416	124	18-21	22
Mexicali	3	1	398	124	18-21	15
Bahía de LA	9	1	132	352	18-21	22

La batería propuesta en la simulación es una Vision 6FM55D con un voltaje nominal de 12 V, capacidad nominal de 55Ah y un rendimiento de por vida de 256 kWh.

Se sabe que la energía varía de acuerdo con el periodo estacional y diario. En la Figura 4.35 se muestran los resultados obtenidos de la simulación para cada sitio, como se observa en algunas zonas el recurso simulado según la velocidad promedio es bajo. La simulación se realizó para una demanda de carga eléctrica de las 18 a 21 h durante todo el año, así mismo el programa recomendó un banco de baterías en cada sitio, si se quiere soportar esta carga, ya que en algunos meses hay más producción que en otros.

Se hizo una comparación de la cantidad de energía eoloeléctrica simulada y la que fue calculada con promedios horarios diarios. La Figura 4.35 muestra la relación entre cada estación y su producción de energía eólica.

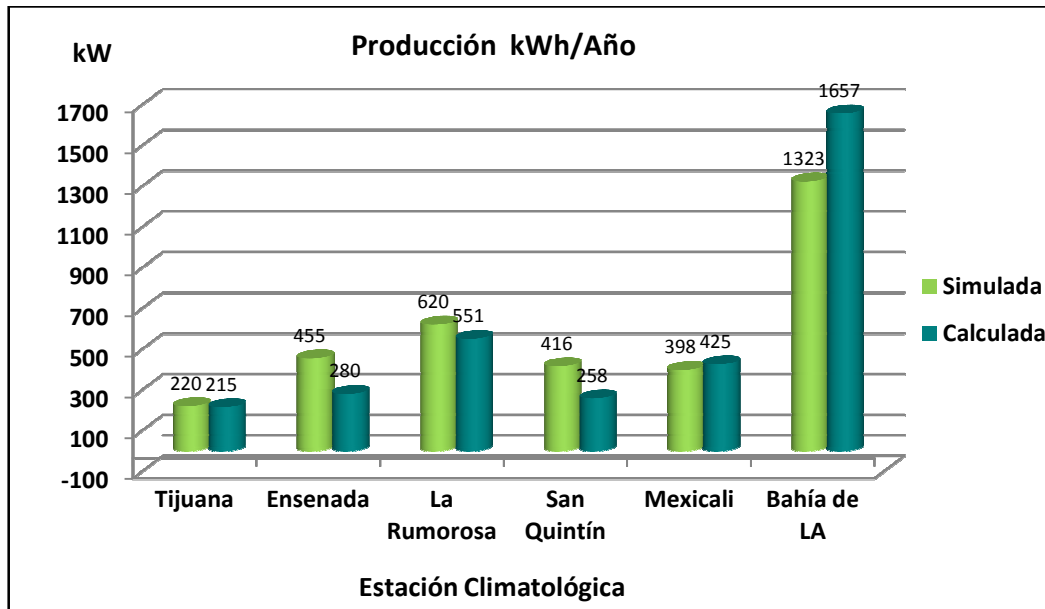


Figura 4.35: Comparación de resultados entre la simulación y el cálculo de la producción de energía eólica para el año 2007.

En el cálculo de la potencia eólica se toma un mayor número de valores de la velocidad de viento que en la simulación. Ya que en el cálculo se utilizan valores promedios horarios diarios de la velocidad del viento que son 8760 valores de la velocidad de viento, y en la simulación sólo son los valores promedios mensuales que corresponden a 12 valores por año. Lo interesante en los resultados para el año 2007 es que varían los resultados por zona, es decir, para el caso de Tijuana y Mexicali se obtienen valores muy similares. Para Ensenada, La Rumorosa y San Quintín la potencia eólica simulada es mayor y en el caso de Bahía de Los Ángeles la calculada es mucho mayor que la simulada. Sólo para dos estaciones climatológicas la potencia calculada es mayor que la simulada, por lo que en general existe buena relación entre los valores a pesar de que los valores promedios mensuales de la velocidad de viento enmascaran mucho la potencia eólica.

Si se quiere utilizar la energía del viento en estas zonas como se mostró para una carga básica de un hogar rural, se puede cubrir desde el 25 % al 191 %, y si se quiere utilizar para iluminación se puede cubrir desde 2 focos a 9 focos de 30 W y un radio de 25 W.

Es importante tener conocimiento acerca de la carga eléctrica que una vivienda rural demanda, y saber la ubicación geográfica del lugar, ya que en algunos lugares si se cubrirá en mayor porcentaje la demanda eléctrica con energía eólica que en otros.

Cabe mencionar que la simulación y el cálculo de potencia son valores teóricos en la práctica estos valores pueden aumentar o disminuir. Pero la instalación de pequeños aerogeneradores ayudará no sólo a disponer de electricidad a muchos hogares que no disponen de ella, sino que también coadyuvará al ahorro de tendido de líneas de transmisión eléctrica a lugares remotos y sobre todo permitirá la disminución de CO₂ a la atmósfera.

5. SISTEMA DE INFORMACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN BAJA CALIFORNIA

Los sistemas de Información Geográfica (SIG) son definidos como una tecnología integradora que une varias disciplinas con el objetivo común del análisis, creación, adquisición, almacenamiento, edición, transformación, visualización, distribución, etc. de información geográfica (Goodchild, 2000). Se utilizan para ver el comportamiento o definir zonas geográficas por sus diferentes parámetros que lo componen.

Los SIG están formados por cuatro elementos básicos fundamentales, que fueron definidos por Maguire (1991) como: hardware del computador (parte física del sistema), software del computador (programas de aplicación), datos y el liveware o parte viva del sistema. (Gómez, 2006). A continuación se brinda una breve definición de estos conceptos, a saber:

Hardware todos aquellos aparatos físicos que sean indispensables para el desarrollo del SIG, como pueden ser equipo informático Laptop, unidades de almacenamiento, escáneres, entre otros.

Software es la parte que se encarga de realizar el procesamiento de los datos, por medio de paquetes de SIG, existe una rama de paquetes en el mercado para aplicaciones diferentes.

Datos, posiblemente éste sea el elemento más crucial, ya que sobre él son realizadas todas las operaciones posibles de desarrollar en un SIG. (Gómez, Barredo, 2006).

Liveware es considerado como el elemento más importante de un SIG, siendo representado por “las personas encargadas del diseño, implementación y uso del SIG”.

En un SIG se pueden visualizar los datos estadísticos obtenidos sobre un mapa o capa raster para una mejor interpretación.

En este trabajo el SIG se compone de capas temáticas como:

- Archivos raster
- Archivos vectoriales
- Modelo Digital de elevación
- Otros archivos (Imágenes importadas).

En una capa de datos raster el espacio está representado por un conjunto de unidades espaciales llamadas celdas o píxeles, las cuales representan unidades homogéneas de información espacial, éstas establecen su localización por un sistema de referenciación en filas y columnas (Gómez, 2006). Los archivos raster comúnmente son las imágenes satelitales o composición de diversos archivos raster como los Modelos Digitales de Elevación.

Un SIG siempre se relaciona a Software y Hardware, llevando siempre a su utilización y análisis de datos. En el presente trabajo se utiliza el Software IDRISI Andes para la obtención de mapas con diferentes capas temáticas.

Se realizó la captura de las localidades rurales a un Sistema de Información Geográfica (SIG) con información obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2005). La capa raster de imágenes satelitales son de LandSat ETM Data 2000. El ETM+ es un sensor multiespectral radiométrico a bordo del satélite Landsat 7, que provee una resolución espacial de 30 metros.

5.1 Metodología para la generación de SIG.

1. Se obtienen las coordenadas geográficas de los diferentes datos como estaciones climatológicas y localidades rurales. Las coordenadas geográficas de cada localidad rural se obtuvo de la “Base de datos con información estatal, regional y municipal” de la Secretaría de la Reforma Agraria.

2. Se transforman las coordenadas geográficas a coordenadas UTM con una calculadora geográfica disponible en <http://www.cartesia.org/article.php?sid=196>. El sistema de referencia utilizado es el WGS84 Huso 11.
3. Una vez calculado las coordenadas UTM en x y y, el valor z es el porcentaje de la cantidad de energía eléctrica que dispone cada localidad rural. La obtención de estos valores se calculó con la cantidad de hogares por localidad entre el número de hogares sin energía eléctrica. Para obtener estos valores se realizó a través de la base iterativa de datos de INEGI disponible en http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/conteos/conteo2005/Viviendas.asp?s=est&c=17357&proy=cpv05_viviendas.
4. Una vez obtenidas las coordenadas x, y y z, se guardan en un archivo en formato .txt en columnas con un espacio delimitado, para proceder a importarlo en un programa SIG, en este caso se utilizó el IDRISI Andes.
5. Se importa el archivo como XYZIDRIS, el sistema de referencia es UTM-11n y esto lo hace convertirse en archivo vectorial.
6. Se realizan los diferentes archivos con localidades de 100 % sin Energía Eléctrica (EE), 89-99 % sin EE, 50-79 % sin EE y menos de 50 % sin EE.
7. Se importan imágenes .JPG con un archivo existente de referencia para georeferenciada con UTM-11n, en este caso se tomó una imagen satelital LandSat.
8. Se crean los diferentes mapas con las diversas capas.

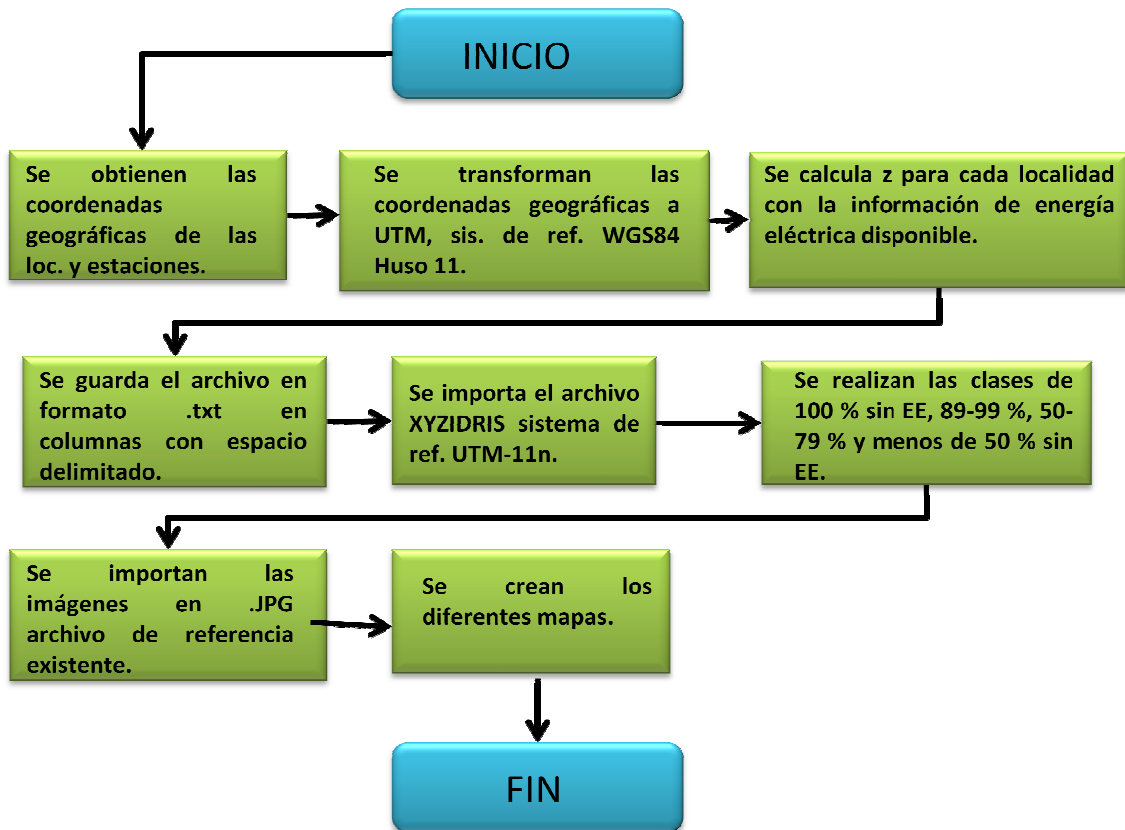


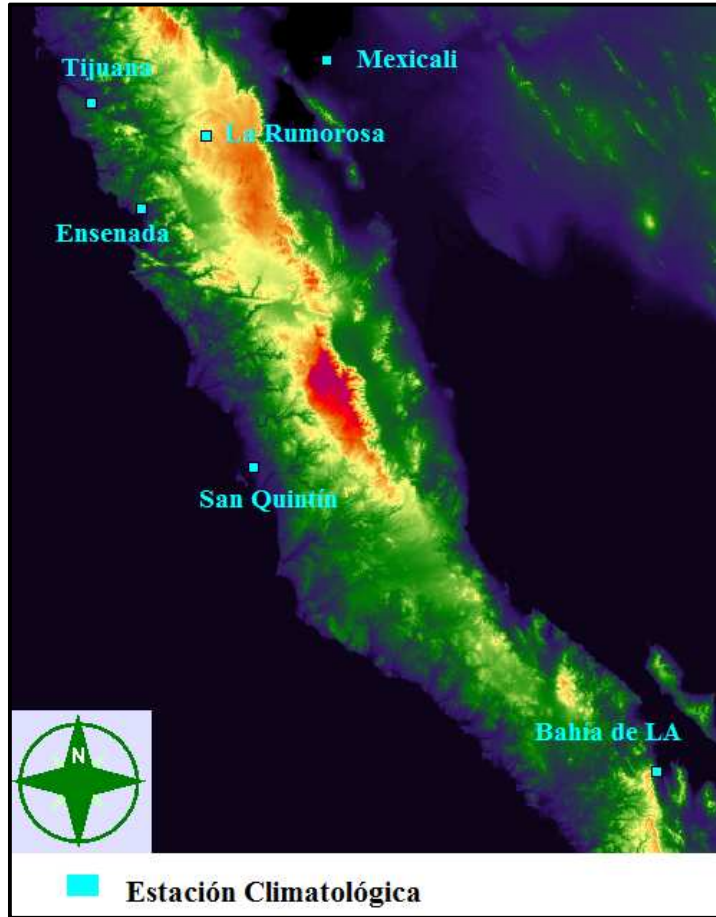
Figura 5.1: Diagrama de flujo para la creación de las diferentes capas en el SIG.

5.2 Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas

Los valores de la velocidad del viento y dirección fueron proporcionados por Comisión Nacional del agua, la ubicación geográfica de las estaciones climatológicas se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5. 1: Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo

Estación Climatológica	Latitud (N)	Longitud (O)	UTM X	UTM Y	Altitud (msnm)	Distancia al mar (km)
Tijuana	32°26'50.31"N	116°54'31.41"O	508579.2951	3590021.868	156	19
Ensenada	31°53'29.48"N	116°36'11.20"O	537532.4801	3528480.531	32	5
La Rumorosa	32°16'20.00"N	116°12'20.00"O	574818.0081	3570887.089	1262	67
San Quintín	30°31'54.00"N	115°56'13.00"O	601981.1638	3378181.368	32	10
Mexicali	32°40'0.23"N	115°27'28.30"O	644606.6934	3615392.199	50	145
Bahía de LA	28°56'44.99"N	113°33'36.46"O	835325.6807	3206859.642	10	0.5



Fuente MDE: INEGI

Figura 5.2: Ubicación geográfica en un MDE de Baja California.

5.1.1 Clima en cada zona

Las estaciones de monitoreo están distribuidas en diferentes regiones del Estado de Baja California, como se vio con anterioridad el Estado posee diversos tipos de clima, para tener conocimiento del tipo de clima de cada estación se elaboró el siguiente mapa.

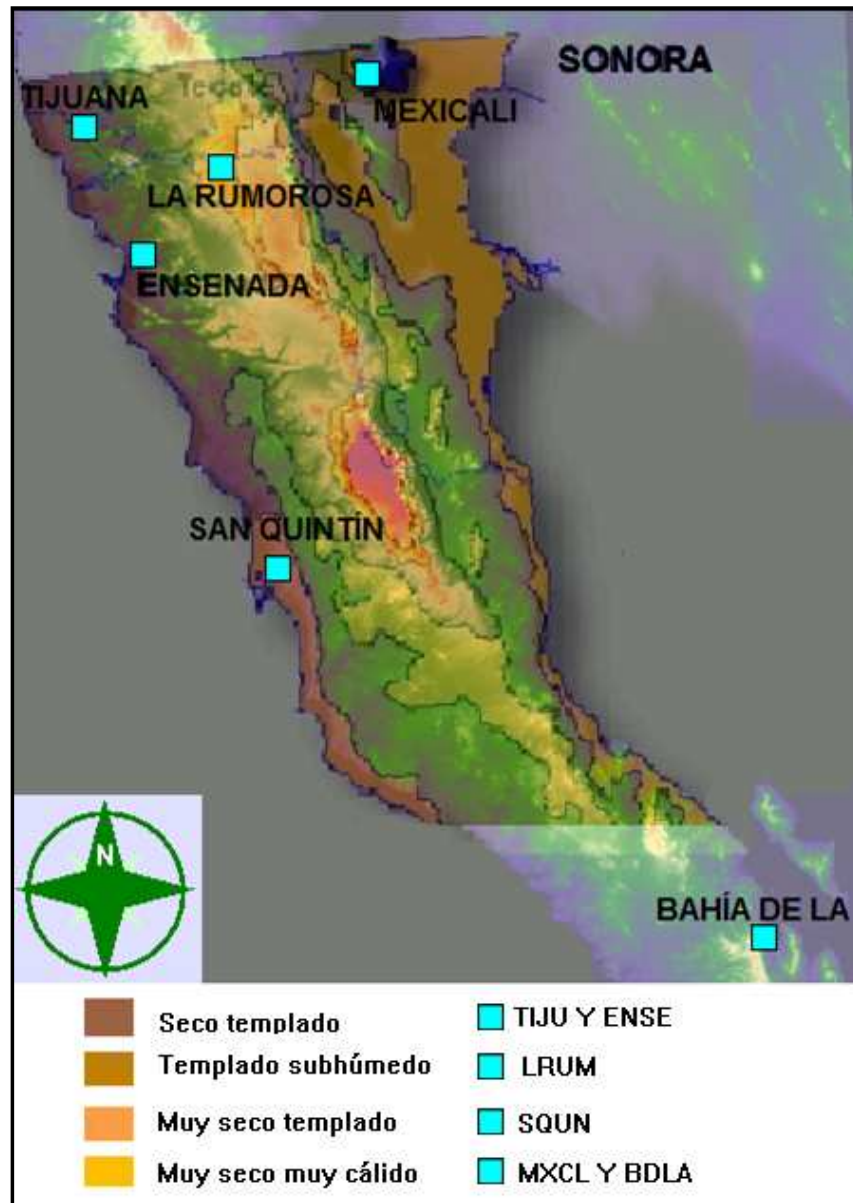


Figura 5.3: Mapa de climas INEGI, y ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo.

Las seis estaciones de monitoreo están divididas en cuatro tipos de clima, la cercanía al mar y otras características fisiográficas y topográficas hacen que el viento se comporte de diferente manera en cada región. Para el caso de Ensenada, San Quintín y Bahía de los Ángeles, su cercanía al mar hace que se desarrollen patrones de brisa marina. Pero a diferencia de Bahía de los Ángeles las primeras dos estaciones su desarrollo se ve más pronunciado en invierno, y Bahía de los Ángeles, su desarrollo se ve más pronunciado en verano y de manera más significativa.

5.2 Distribución de la población rural

En Baja California alrededor del 9 % de la población según el II conteo de Población y Vivienda 2005 INEGI, se concentra en las zonas rurales que corresponden a 247, 486 personas. De estas personas que viven en zonas rurales existen 10, 260 hogares que no disponen de energía eléctrica. Muchos de ellos se encuentran en zonas muy remotas por lo que imposibilita la instalación o suministro de una red eléctrica.

Se creó un mapa para mostrar la distribución de la población rural en Baja California con la información de INEGI 2005. Para la obtención del archivo vectorial de las localidades, se tomaron en cuenta sólo aquellas localidades que tienen Nombre, Clave de municipio y Estado, y que su población oscile entre 1 a 15 000 habitantes.

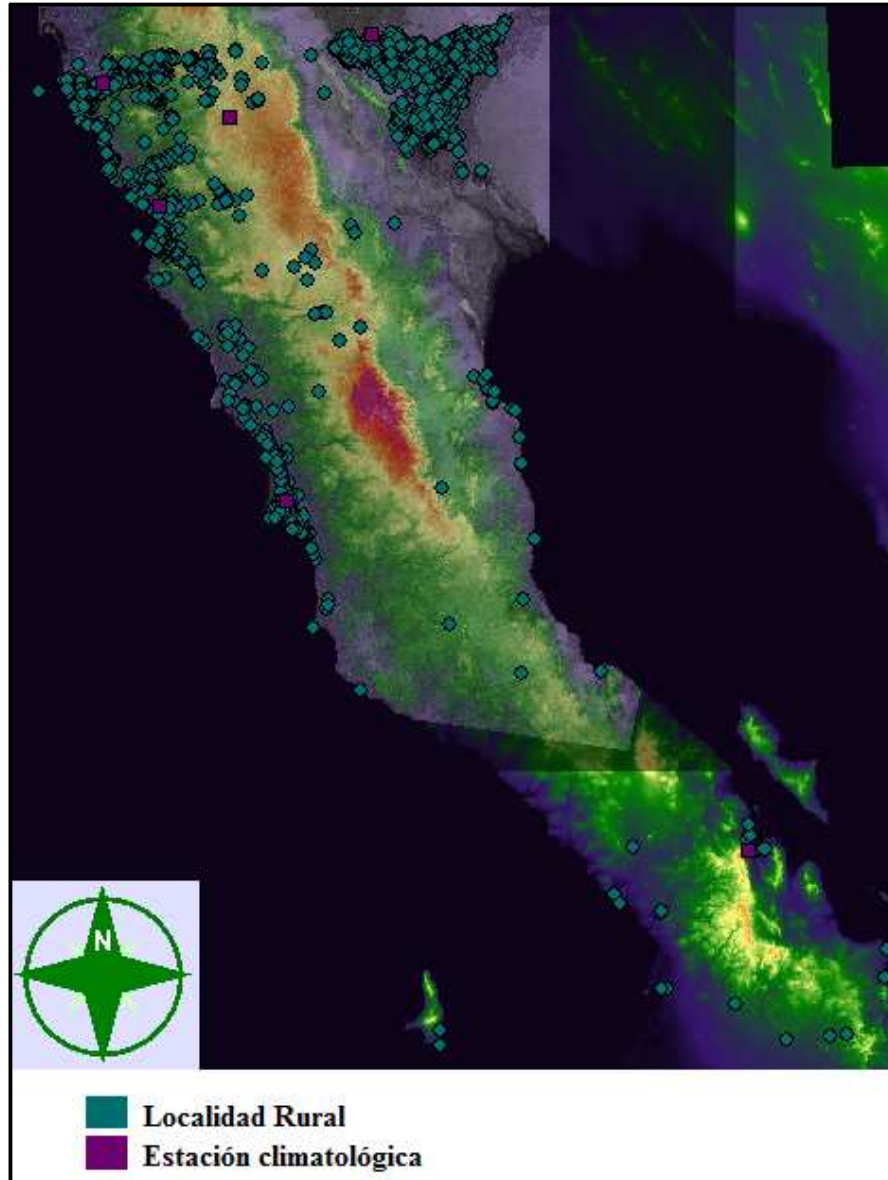
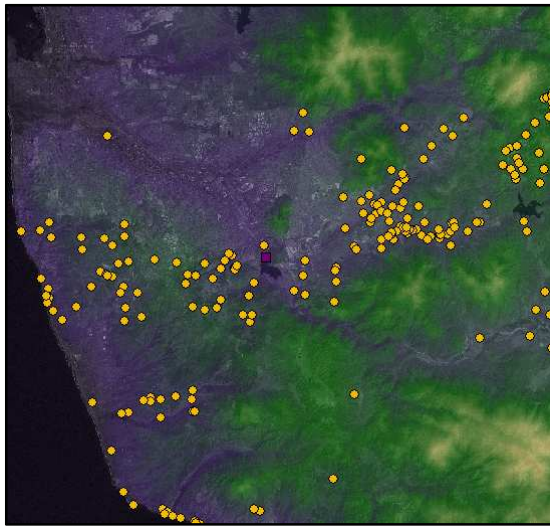
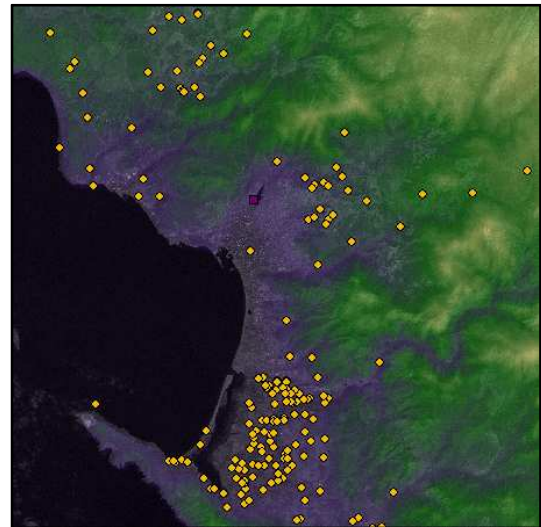


Figura 5.4: Distribución de la población rural de Baja California, 2005 sobre un Modelo Digital de Elevaciones.

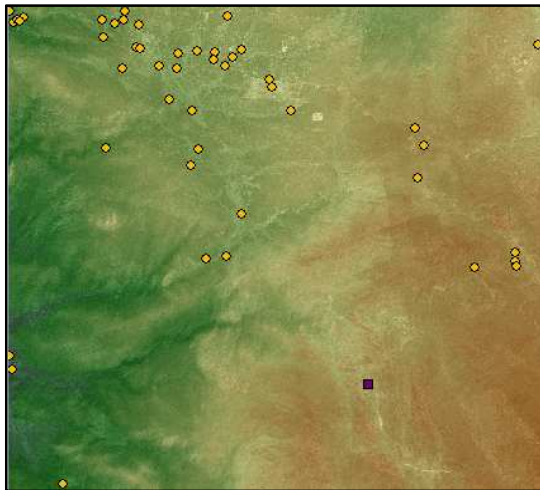
Como se ve en la Figura 5.4 la mayoría de la población del Estado se distribuye en la zona costa del Pacífico, en gran proporción desde Tijuana hasta San Quintín y otra gran parte en el Valle de Mexicali.



1.- Tijuana



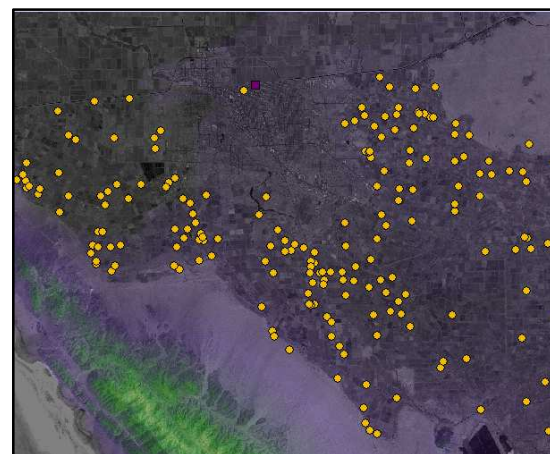
2.- Ensenada



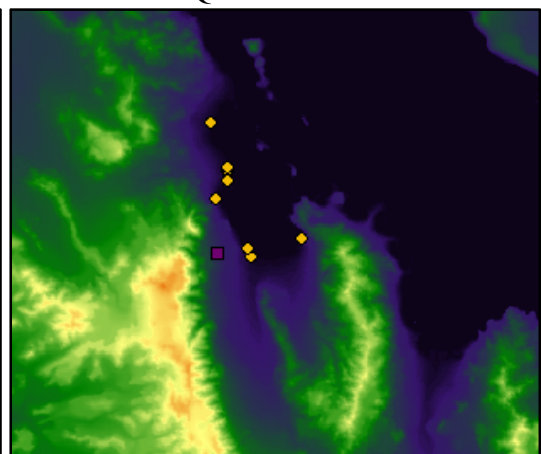
3.- La Rumorosa



4.- San Quintín



5.- Mexicali



6.- Bahía de LA

Figura 5.5: Vista de las seis estaciones de monitoreo.

En la Figura 5.5 se aprecia la ubicación de las estaciones de monitoreo con respecto a las localidades rurales, con aproximadamente 20 km a la redonda. Casualmente donde hay más recurso eólico es donde hay menos localidades rurales a los alrededores.

5.3 Acceso a recursos energéticos de la población rural

En Baja California existen localidades sin disposición del recurso eléctrico, en la Tabla 5.2 se muestran por municipio el total de localidades que se utilizaron para la creación de un mapa,

Tabla 5. 2: Distribución de la población rural sin energía eléctrica

MUNICIPIO	Localidades	Localidad Sin EE	Total hogares/localidades	Hogares sin EE	Hogares de LSN y sin EE
Ensenada	445	211	33,531	3,143	359
Mexicali	561	149	42,358	1,639	83
Rosarito	62	23	15,306	473	18
Tecate	121	68	6,056	736	128
Tijuana	153	63	27,788	4,281	84
TOTAL	1,342	514	125,039	10,272	672

LSN: Localidad Sin Nombre

EE: Energía Eléctrica

Con la información de la disposición de energía eléctrica y con una base de datos obtenida de INEGI, que proporciona la ubicación geográfica de la cada localidad rural en el Estado, se procedió a la construcción de un archivo vectorial para ubicar en el mapa las localidades rurales y el porcentaje de energía eléctrica de cada una. Para la creación de este mapa se utilizó la cantidad de hogares que disponía cada localidad y la cantidad de hogares sin Energía Eléctrica (EE), se determinó un porcentaje tomando este valor como la coordenada z y se visualizó en un mapa la distribución de las localidades rurales con la posición geográfica x y y .

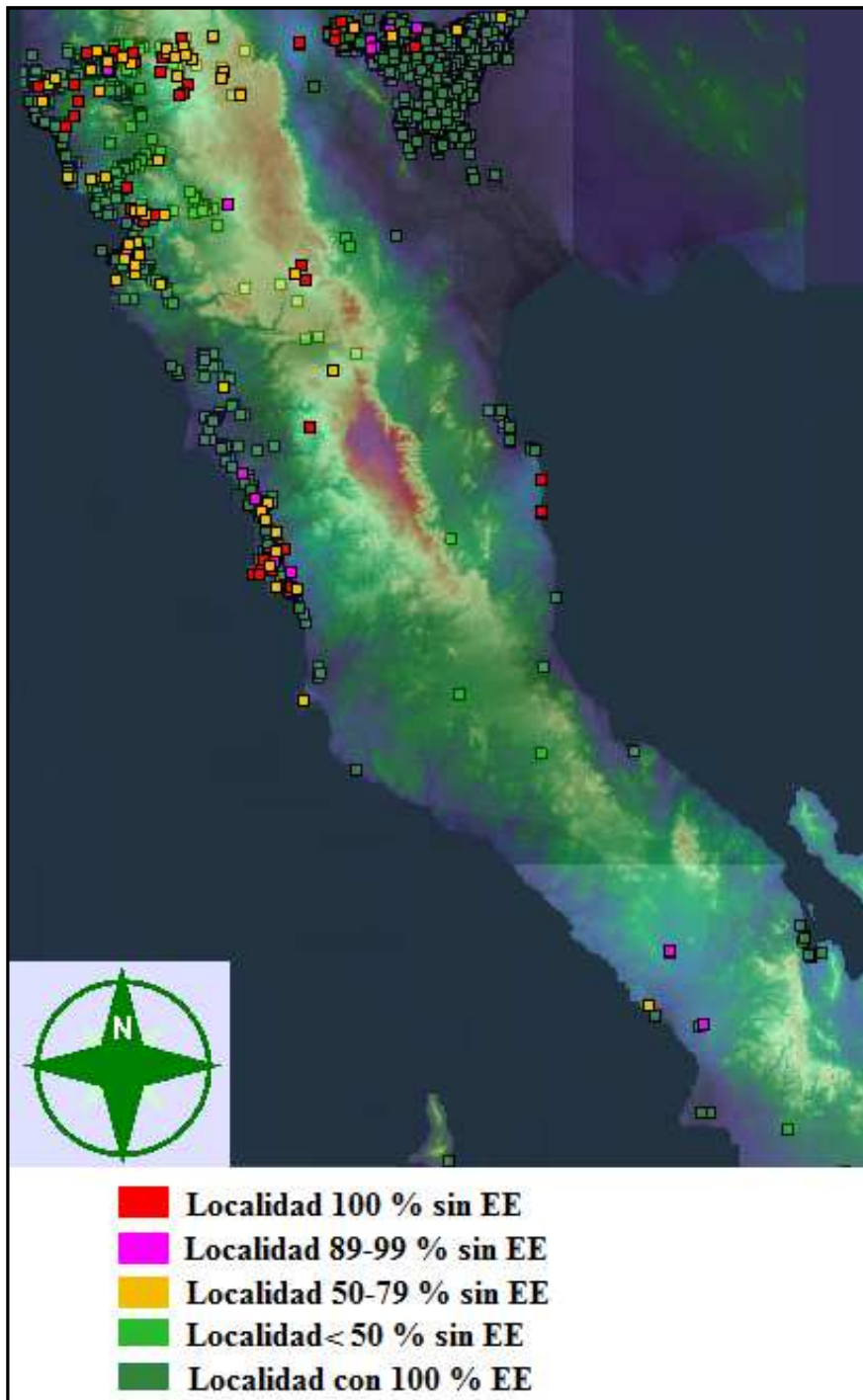


Figura 5.6: Distribución del porcentaje de EE de las localidades rurales en Baja California.

5.4 Visualización de mapa eólico del Estado

Se creó un mapa del recurso eólico tomando en cuenta el mapa elaborado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos para la zona fronteriza del Estado de Baja California.

A este mapa se le agregaron capas de la localización de las comunidades rurales en el Estado con el porcentaje de energía eléctrica que disponen, para saber la situación geográfica de la localidad y su cercanía al recurso eólico.

En la Figura 5.7 se muestra el porcentaje de energía eléctrica (EE) que disponen las localidades rurales desde 0 a 50 % es de color verde y 100 % sin EE es rojo. Las localidades están sobre el mapa eólico de NREL, esto nos indica en donde se encuentran las localidades rurales que no disponen de energía eléctrica y que están cerca de potencial eólico. La zona entre Tijuana y Tecate, se encuentran localidades sin EE y se observa que existe potencial eólico marcado por NREL.

Si se pone atención en el mapa, la zona Valle de Mexicali, la mayoría está electrificada, ya que ahí se encuentra en operación la central geotérmica más grande de México que opera con una capacidad según la CFE de 720 MW. Lo que hace que la mayoría del valle este electrificado, además de que esta zona es agrícola, se tienen un sofisticado sistema de riego que controla el manejo de agua, de ahí la importancia de la electricidad en la zona. En el mismo Valle de Mexicali, a la salida de Tijuana, en una zona más árida se encuentran localidades que no disponen de energía eléctrica y éstas están cerca de donde existe potencial eólico para aplicaciones rurales.

En la zona metropolitana de Tijuana y Tecate, existe una escasez notoria de energía eléctrica y en la zona de San Quintín de igual forma.

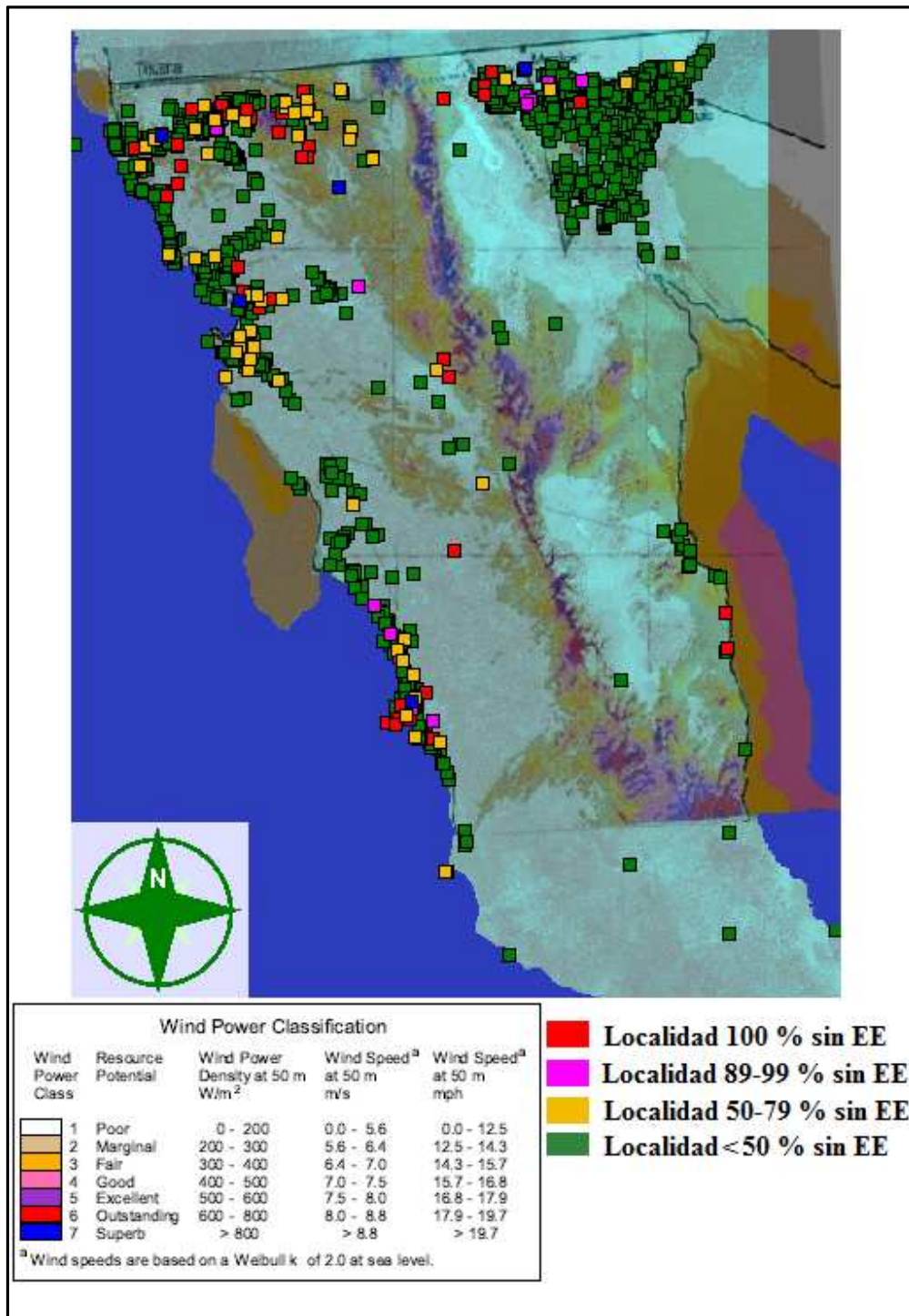


Figura 5.7: Mapa eólico en Baja California y ubicación geográfica de localidades rurales.

5.5 Influencia de la topografía del terreno en la dirección del viento

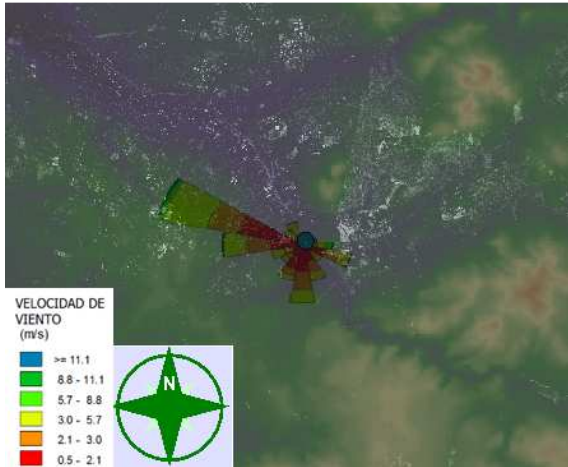
Las direcciones dominantes del viento se ven fuertemente influenciadas por la topografía, la elevación y la exposición directa a los flujos predominantes del viento. En la Figura 5.8 se aprecia claramente la topografía del terreno con una rosa de los vientos promedio para un periodo anual, superpuesta en un Modelo Digital de Elevaciones por cada estación.

Las seis estaciones climatológicas utilizadas en este trabajo varían en su posición geográfica cada una de ellas. Se tiene las estaciones ubicadas en la costa donde prevalecen los flujos de vientos terrestres y brisa marina en la mayoría de las áreas como Ensenada, San Quintín y Bahía de Los Ángeles. La dirección en el flujo de viento en dos de estas estaciones ENSE y BDLA la dirección dominante de viento es del Suroeste, y en SQUN es Noroeste. En algunos casos la composición del terreno modifica la circulación de los vientos, claro ejemplo es Ensenada. En ésta estación, por la ubicación geográfica en la costa del Pacífico Norte, se esperaría un patrón de vientos dominantes del Noroeste como SQUN, pero existe una pequeña montaña al lado izquierdo de la estación, que provoca un cambio en la dirección de los vientos y llegan a la estación vientos dominantes del Suroeste, ver Figura 5.8 para Ensenada.

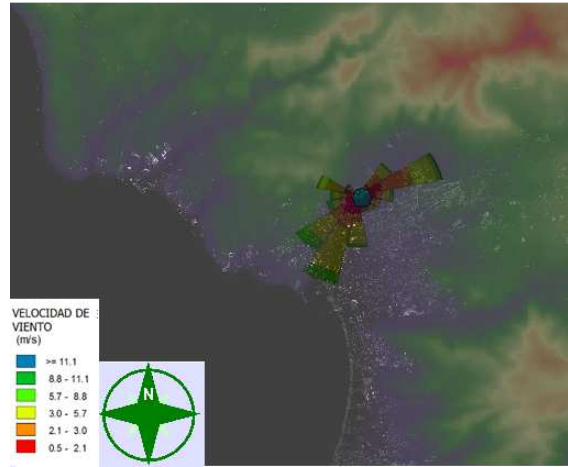
En el caso de La Rumorosa el flujo de viento de valle y montaña está muy bien desarrollado, ver Apéndice A. El cambio notable en la dirección de los vientos es notable, durante el día los vientos son del Este y Suroeste, y por la noche son del Sureste, ver Figura 5.8 para la Rumorosa.

La mayoría de las estaciones tienen elevaciones o montañas cerca, que modifican la dirección del viento, a excepción de Mexicali que está en un terreno plano, posiblemente la velocidad y dirección del viento sea afectada por la fuerza de fricción del área urbana.

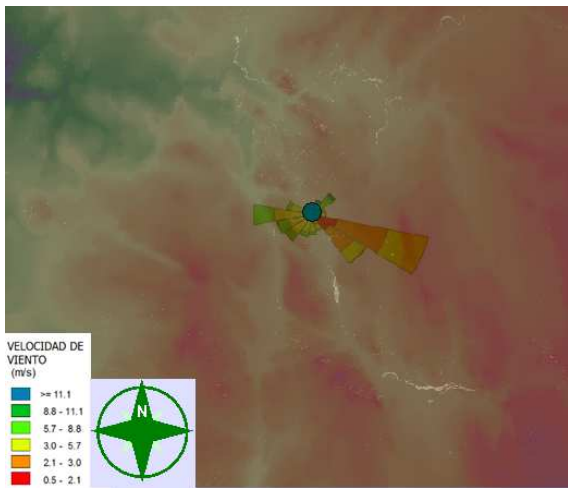
Cabe mencionar que de las seis estaciones de monitoreo utilizadas, tres se localizan cerca o en grandes centro de población urbana como Tijuana, Ensenada y Mexicali. San Quintín también está localizado en centro de población más pequeño, Bahía de Los Ángeles en una población rural y sólo La Rumorosa está más alejada de centros de población.



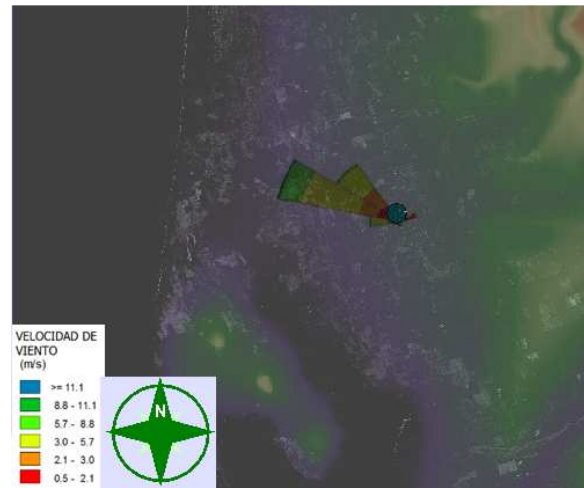
1.- Tijuana



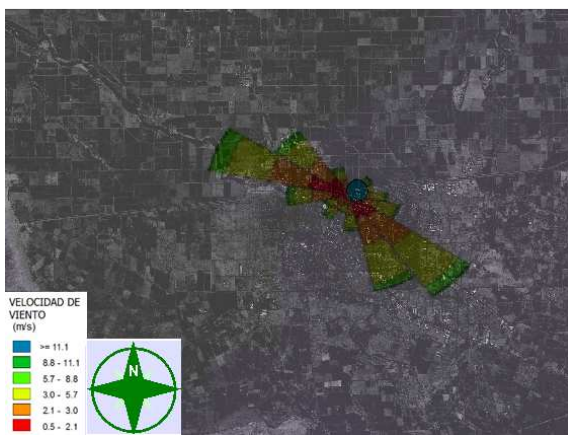
2.- Ensenada



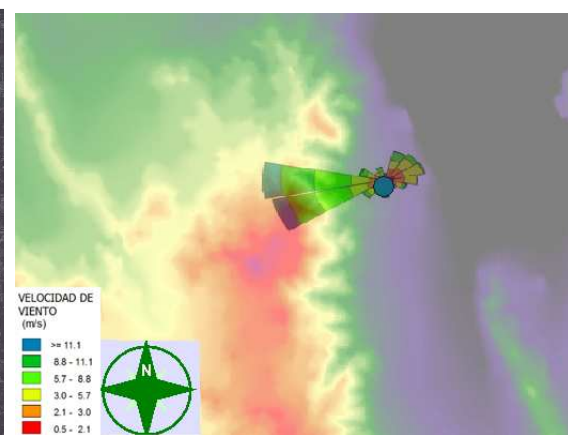
3.- La Rumorosa



4.- San Quintín



5.- Mexicali



6.- Bahía de LA

Figura 5.8: Topografía del terreno y dirección del viento.

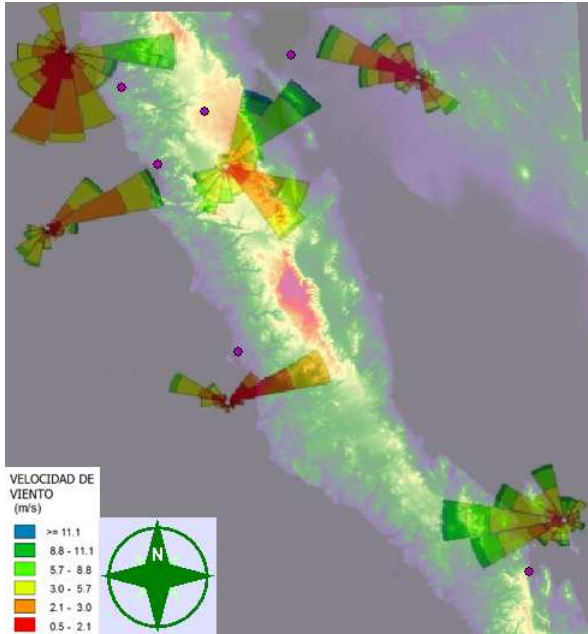
5.5.1 Rosas de los vientos mensuales por zona

Se presenta la variación de la velocidad del viento y su dirección con una rosa de los vientos en periodo mensual para cada estación de monitoreo. Se observa en las rosas de los vientos el cambio de la velocidad y dirección con el paso de cada mes durante un año, Figura 5.9.

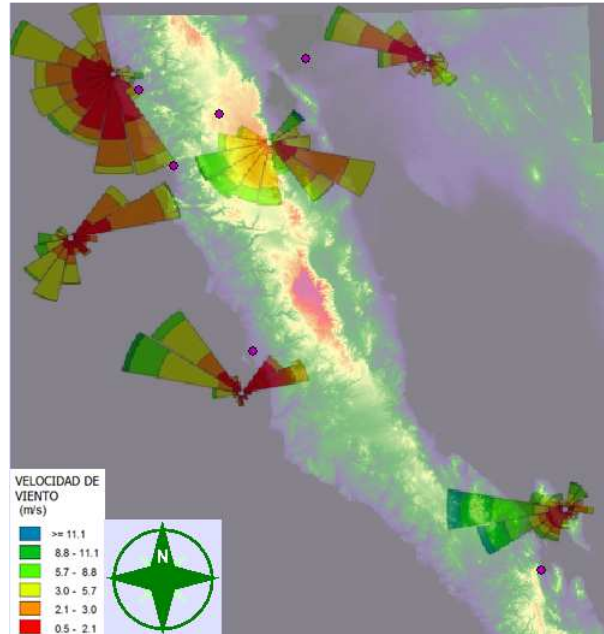
En el primer cuatrimestre, en enero se intensifican las brisas marinas en la zona costa del Pacífico en las estaciones de ENSE y SQUN. En este mismo mes hay un incremento en la intensidad del viento notable en tres estaciones al norte del Estado que son TIJU, ENSE y LRUM que podría concordar con la presencia de los vientos de Santa. En febrero se siguen apreciando el comportamiento de las brisas marinas (para corroborar la información consultar Apéndice A).

En el segundo cuatrimestre la dirección en las estaciones de la zona costa TIJU, ENSE y SQUN domina una sola dirección Noroeste TIJU y SQUN, y Suroeste ENSE. La estación de LRUM presenta el patrón de vientos de valle y montaña más desarrollada, durante el día dominan vientos del Oeste y por la noche vientos del Sureste. MXCL y BDLA presentan el cambio en la dirección de los vientos en el verano por el Monzón de Norteamérica de manera más marcada en junio, julio y agosto.

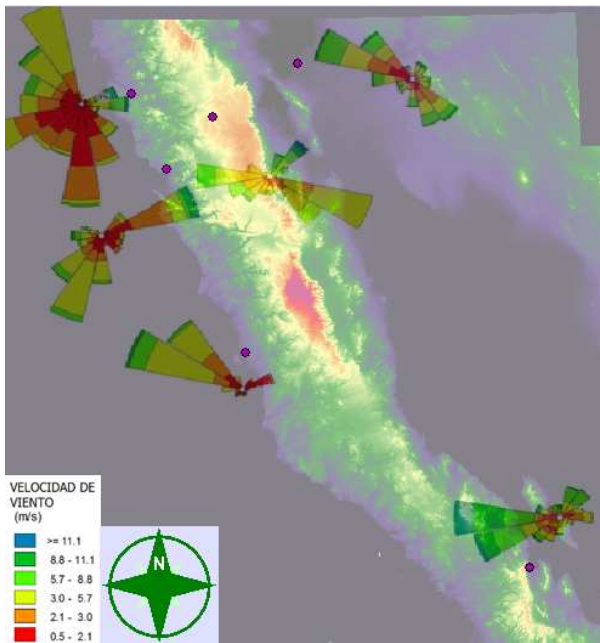
En el último cuatrimestre cambian de nuevo los vientos para MXCL los vientos dominantes provienen del Noroeste, de BDLA del Suroeste y SQUN permanece con los vientos dominantes del Noroeste. En octubre se intensifica la velocidad del viento en las estaciones de TIJU, ENSE y LRUM que son atribuidas a los vientos de Santa Ana.



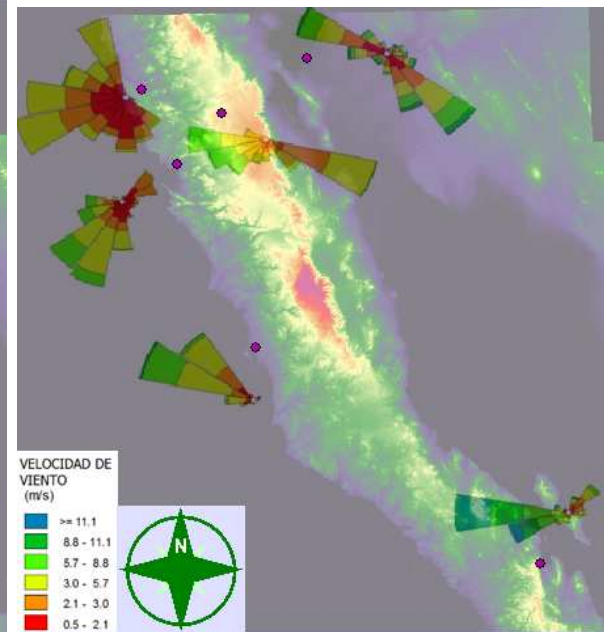
1.- Enero



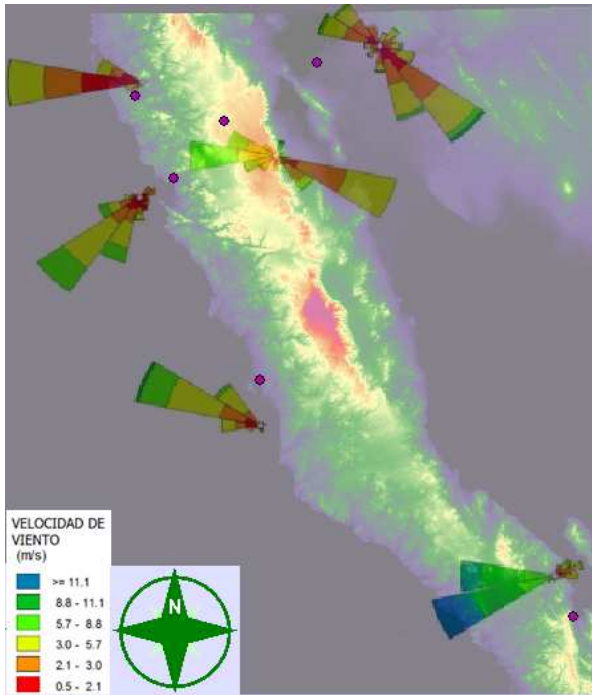
2.- Febrero



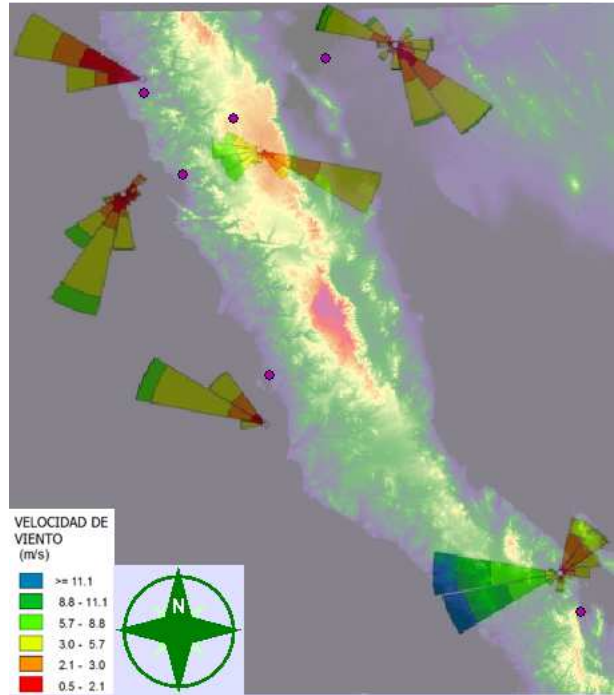
3.- Marzo



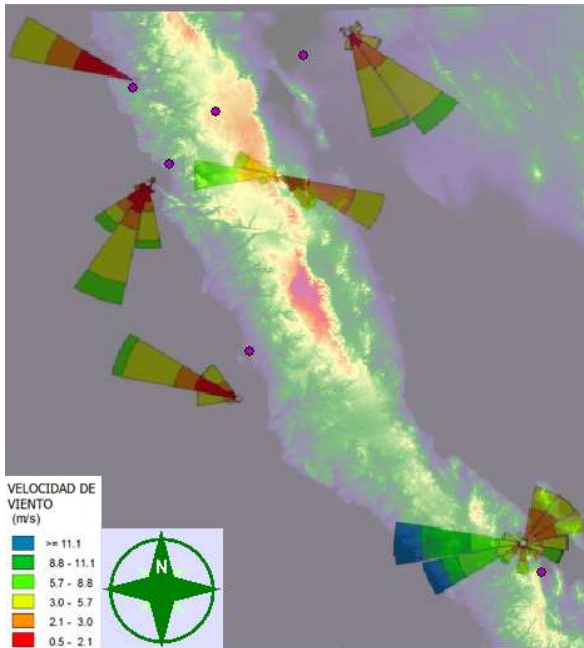
4.- Abril



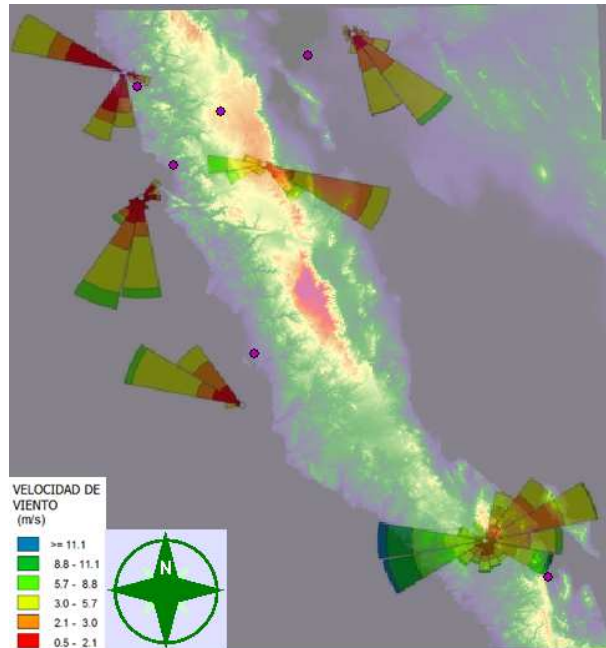
5.- Mayo



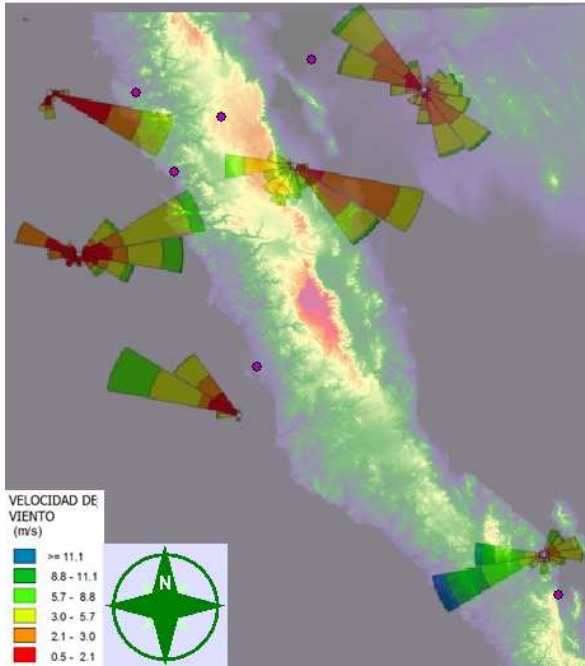
6.- Junio



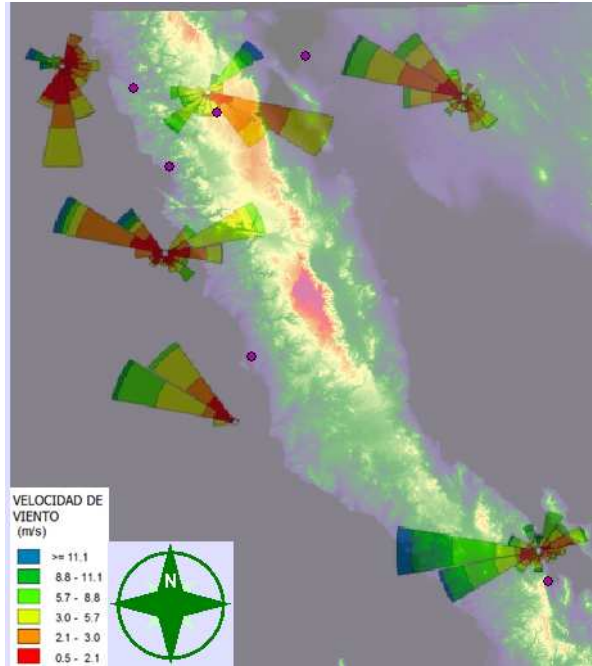
7.- Julio



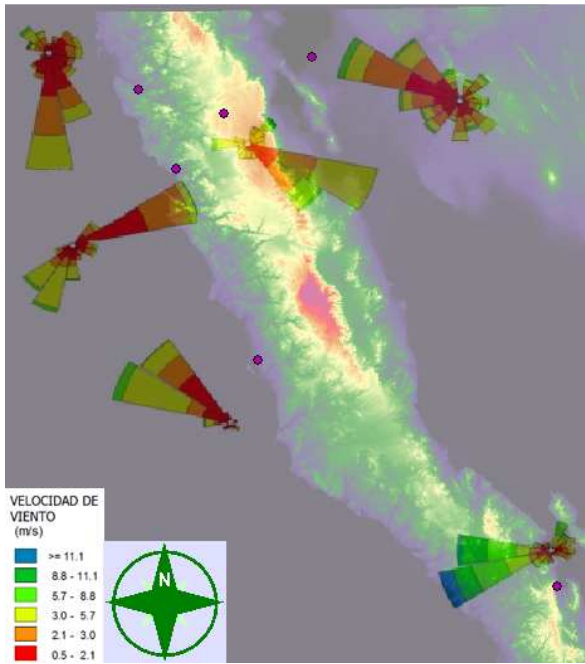
8.- Agosto



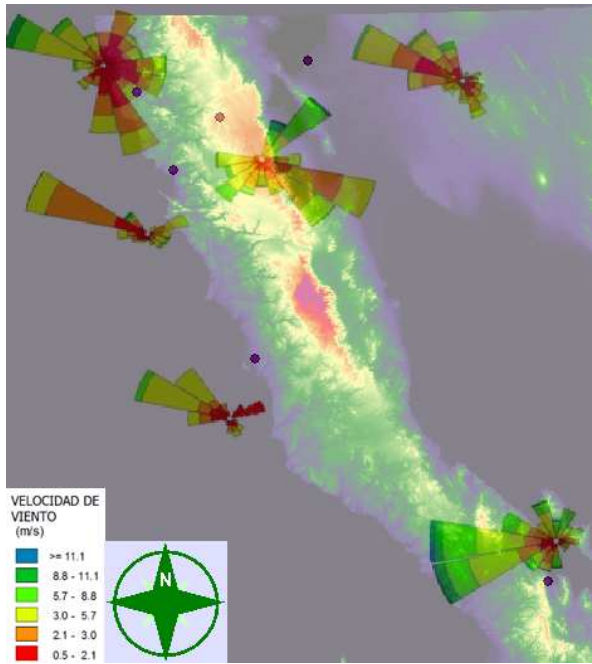
9.- Septiembre



10.- Octubre



11.- Noviembre



12.- Diciembre

Figura 5.9: Distribución de las rosas de los vientos por mes en cada zona.

6. CONCLUSIONES

En el Estado de Baja California existe potencial eólico para aplicaciones rurales, aunque existen zonas dadas sus condiciones geográficas, en las que el viento se presenta en mayor magnitud que en otras. Se tomó sólo la muestra de seis estaciones de monitoreo en diferentes partes a lo largo del Estado. Los datos fueron tomados a 10 m de la superficie del terreno por lo que sólo se analizaron para aplicaciones rurales tomando en cuenta un aerogenerador de baja potencia de 2 m de diámetro del rotor. Se tomó una carga eléctrica haciendo referencia a un hogar rural básico y con esto se determinó el porcentaje que puede cubrir de demanda eléctrica.

Los lugares de mayor a menor densidad de potencia eólica W/m^2 y el porcentaje que pueden cubrir en una vivienda rural con electrodomésticos básicos son: Bahía de Los Ángeles con 166 W/m^2 , 191 %; La Rumorosa con 66 W/m^2 , 64 %; Mexicali con 43 W/m^2 , 49 %; Ensenada con 38 W/m^2 , 32 %; San Quintín con 30 W/m^2 , 30 % y Tijuana con 19 W/m^2 , 25 %.

La zona con mejor potencial eólico es Bahía de Los Ángeles. Este lugar presenta excelentes condiciones de viento a 10 m de superficie, y según la clasificación de la densidad de potencia utilizada por la NREL se clasifica en clase 3, lo que hace de este lugar propicio para instalaciones comerciales, por sus excelentes velocidades de viento.

La generación de potencia eólica en cada región depende de diversos factores que alteran la velocidad del viento, muchos de ellos son fenómenos meteorológicos como el fenómeno de El Niño o el Monzón de Norteamérica, que se presentan en diferentes escalas de tiempo. El aumento o disminución de potencia dependerá de la ocurrencia de estos fenómenos ya que el incremento o decremento de la velocidad del viento, tiene una relación cúbica con la potencia eólica.

Con la elaboración del sistema de información geográfica creado para las variables como clima, potencial eólico, disposición energética de localidades rurales, topografía del terreno y rosas de los vientos, se observó dónde está el potencial eólico para ser aprovechado y los posibles

usuarios de este tipo de energía. Esta información servirá como base para investigación futura sobre el comportamiento del viento en estas zonas geográficas del Estado de Baja California. Y será un apoyo para la toma de decisiones en algún proyecto a realizar sobre electrificación rural con energía renovable.

Es importante proponer medidas de electrificación rural utilizando fuentes de energía renovables como lo es, la energía eólica. Según el mapa elaborado con potencial para aplicaciones comerciales, existen localidades que se encuentran cerca de donde hay excelentes condiciones de viento y que no disponen de energía eléctrica. El poner aerogeneradores de baja o gran potencia reduciría la instalación de redes de suministro de energía eléctrica a estas comunidades y ayudaría a no emitir CO₂ a la atmósfera.

1. RECOMENDACIONES

Realizar un estudio más detallado sobre los fenómenos meteorológicos que afectan directamente al Estado de Baja California, ya que tener el conocimiento sobre estos ayudará en la planeación y operación de una planta eólica.

La energía eólica es variable durante el periodo de un año, en la mayoría de los lugares tiene un decremento en verano, por lo que se recomendaría combinar este tipo de energía renovable con la energía solar, para cubrir esa parte de energía que no se generaría en verano. La energía eólica cubre un porcentaje de la facturación total de electricidad, al combinarse con la energía solar se cubriría total o parcialmente la facturación.

Continuar con el diseño y elaboración del sistema de información geográfica que aborde todo lo relacionado a la generación y comportamiento de la energía eólica.

2. REFERENCIAS

1. Asociación Mexicana de Energía Eólica AMDEE. Panorama General de la Energía Eólica en México, 2011. Disponible en: http://www.amdee.org/Recursos/Proyectos_en_Mexico
2. Borja M.; Jaramillo O. y Mimiaga F. Primer documento del proyecto eoloeléctrico del Corredor eólico del Istmo de Tehuantepec. Instituto de Investigaciones eléctricas. México, 2005.
3. Burroughs, L. Development of forecast guidance for Santa Ana conditions. Marine. Vol. 12 No. 1, pp. 4-11, 1991.
4. Cadenas R.; Saldívar G. Educación y Nuevas Tecnologías Central Eoloeléctrica La Venta II. Revista Digital Universitaria. Vol. 8, No. 12., 2007. Disponible en: <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num12/art90/int90.htm>
5. Cádiz, J.C.; Ramos J. La energía eólica tecnología e historia. Hermann Blume. Madrid, España, 1984.
6. Canavos G. C. Probabilidad y Estadística con algunas aplicaciones y métodos. McGraw-Hill. México, 1988.
7. Castro R., Mascarenhas A., Martínez-Díaz-de-León A., Durazo A. y Gil-Silva E. Spatial influence and oceanic thermal response to Santa Ana events along the Baja California Peninsula. *Atmósfera*. Vol. 19, n° 3, pp. 195-211, 2006.
8. Castro, R.; Pares-Sierra, A. Evolución y extensión de los vientos Santa Ana de febrero de 2002 en el océano, frente a California y la Península de Baja California. *Ciencias Marinas*. Vol. 29, n° 3, pp. 275-281, 2003.

9. Cengel Y.; Cimbala J.; Traducción Campos V. Mecánicas de Fluidos, fundamentos y aplicaciones. McGraw-Hill Interamericana. México, 2006.
10. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada CICESE. Zonas Potencialmente Productoras de Energía Eólica, en Baja California. Baja California, 2003. Disponible en: <http://www.bajacalifornia.gob.mx/energia/estudios.html>
11. Comisión Estatal de Energía. Presentación de Política Energética, Energías Renovables. 2009. Disponible en: http://www.bajacalifornia.gob.mx/energia/parque_eolico.html
12. CONAGUA. ¿Qué es una estación climatológica automática?. 2011. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/emas/>
13. Elliot D.; Schwartz M.; Scott G.; Haymes S.; Heimiller D.; George R. Atlas de Recursos Eólicos del Estado de Oaxaca. Informe técnico de NREL, No. TP-500-35575, Golden Co, 2004.
14. García, R.; Dávalos E. El ENOS y su relación con las lluvias en Baja California. Memoria de X Congreso de la Organización Mexicana de Meteorólogos. Veracruz, México, 2007.
15. Gómez M.; Barredo J. Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio: en la ordenación del territorio. Alfa Omega. México, D.F., 2006.
16. Goodchild, M. New horizons for the social sciences: geographic information systems. Social Sciences for a Digital World: Building Infrastructure and Databases for the future. Organisation for Economic Cooperation and Development. París, 2000.
17. Hernández R.; De la Torre J.; Soto C.; Romo G.; Ibarra S.; Álvarez J.; Bañuelos F. Proyecto de Evaluación de la Capacidad Solar y Eólica en la Región de Zacatecas, México. Memoria del 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, Perú, 2007.
18. INEGI, II Censo de Población y vivienda 2005. México, 2005.

19. INEGI, Información Geográfica, Mapa de climas. 2011.
<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/bc/clim.cfm?c=444&e=03>
20. Luengo M.; Oven M., Estudio del potencial de exportación de energía eólica de México a los Estados Unidos. Reporte No. EPP-I-03-03-00008-00, PA Government Services Inc, Washington, DC, 2009.
21. Maguire D.; Goodchild, M.; Rhind, D. An overview and definition of GIS. Geographical Information Systems. Vol. 1 No. 1. New York, 1991.
22. Manwell J.F.; Mcgowan J.G.; Rogers A.L. Wind energy explained theory, design and application. John Wiley& Sons Ltd. England, 2009.
23. Plan Estatal de Desarrollo 2008-2013. Desarrollo Regional Sustentable. Disponible en:
<http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/gobierno/ped/ped.htm>
24. Reyes S., Introducción a la meteorología. Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, México, 2001.
25. Secretaría de Energía, SENER. (2009) Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. Disponible en:
http://www.energia.gob.mx/webSener/0/ER_para_Desarrollo_Sustentable_Mx_2009.pdf
26. Servicio de Extensión Petrolera/Instituto Mexicano del Petróleo. El viento, las olas y el estado del tiempo. Manual de la industria de Perforación Rotatoria. Unidad 5, Lección 1. Universidad de Texas. Austin, Texas, 1982.
27. Triola M; Traducción Pineda L. Estadística. Pearson Educación de México. México 2009.
28. Villarubia M., Energía Eólica. Ed. Ceac. Barcelona, España, 2004.

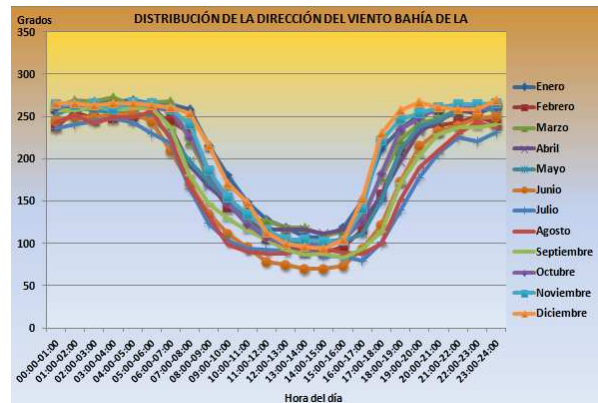
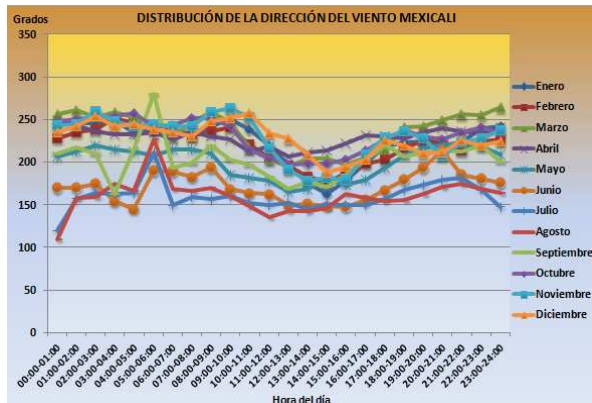
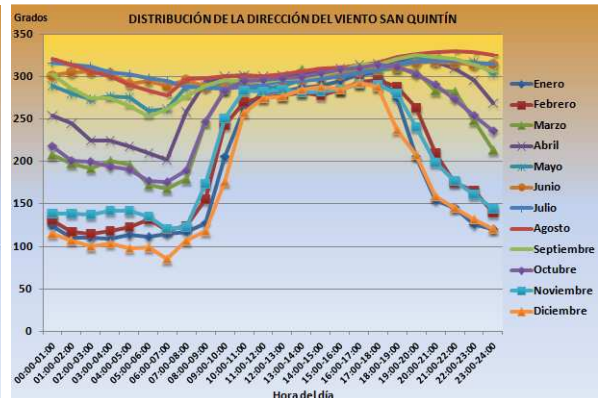
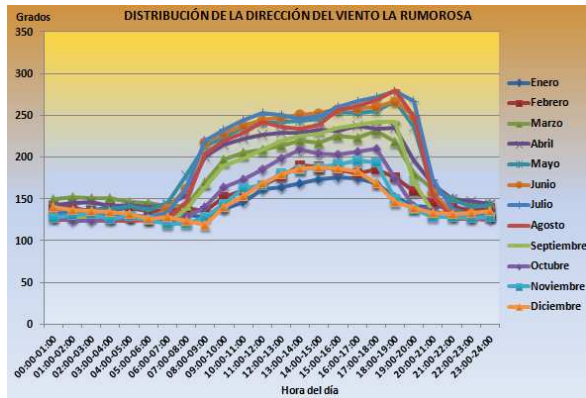
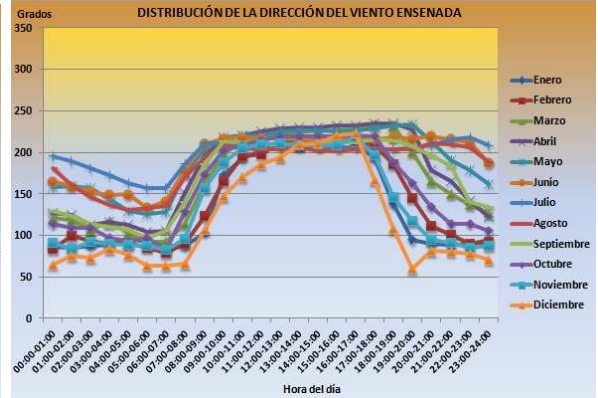
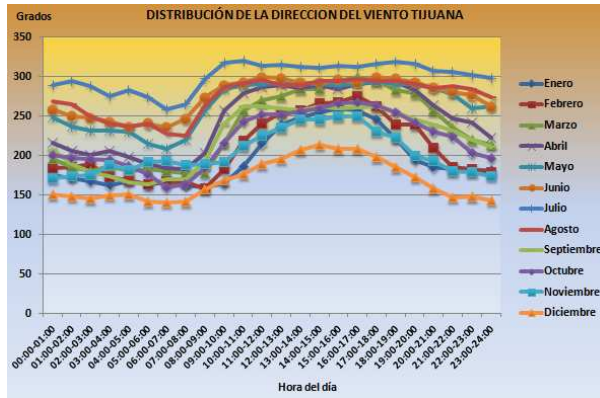
29. World Wind Energy Association (WWEA). World Wind Energy Report 2010. Germany, 2010.

http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_s.pdf

3. APÉNDICES

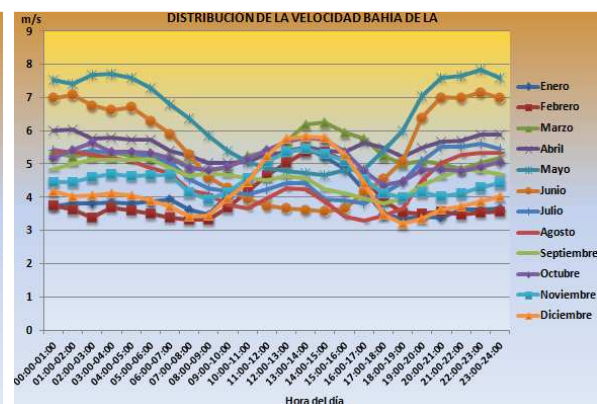
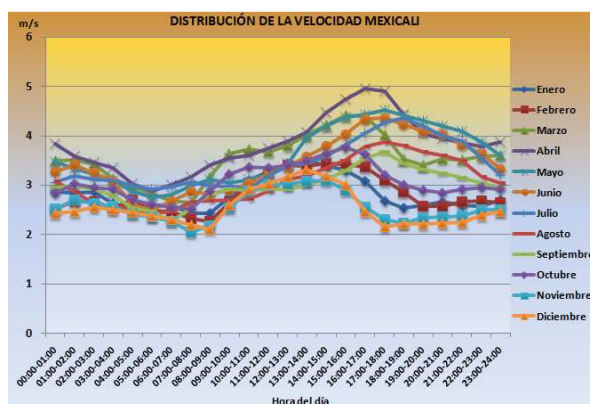
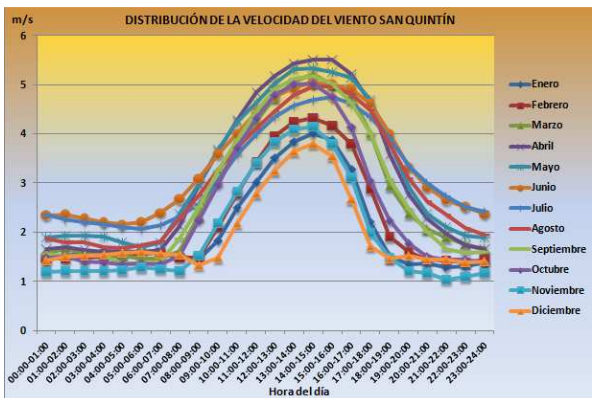
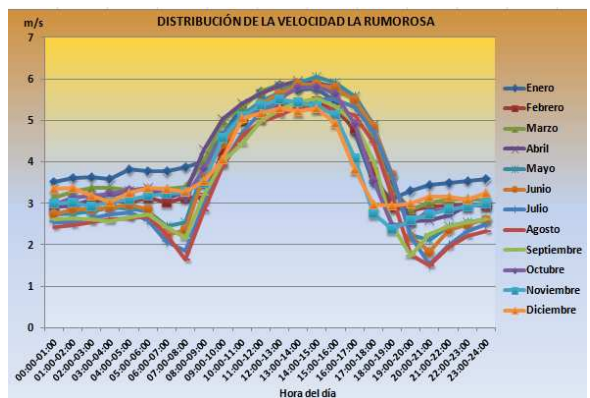
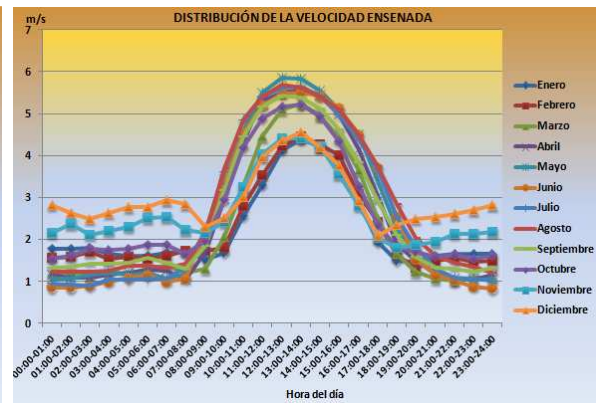
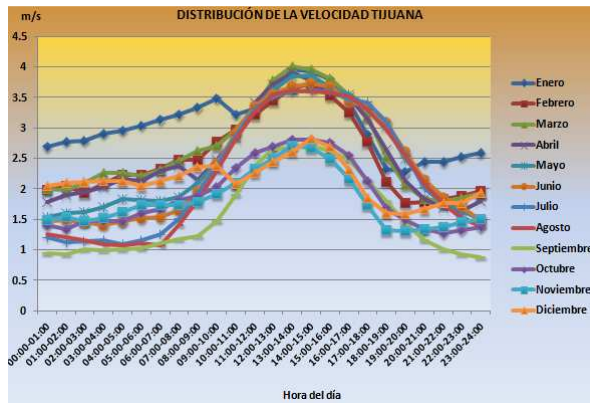
Apéndice A

Distribución de la dirección del viento promedio diurna para las seis estaciones de monitoreo en un periodo de cuatro años.



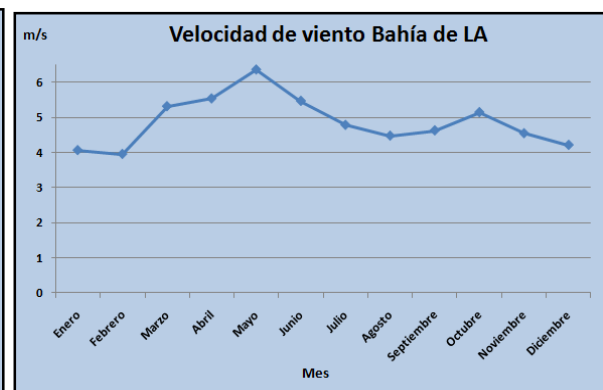
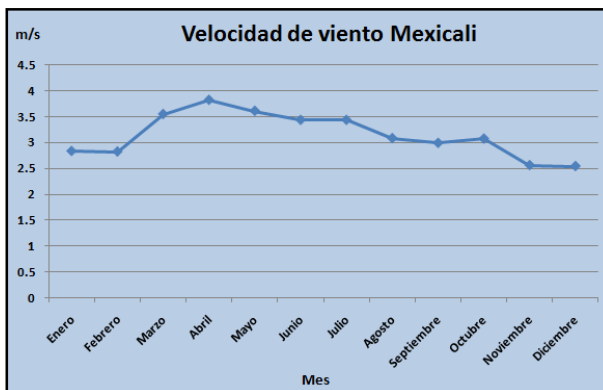
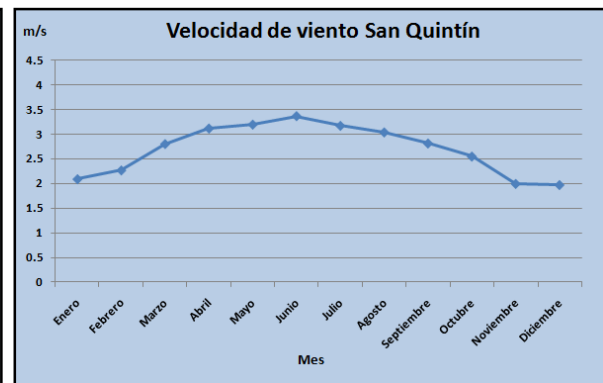
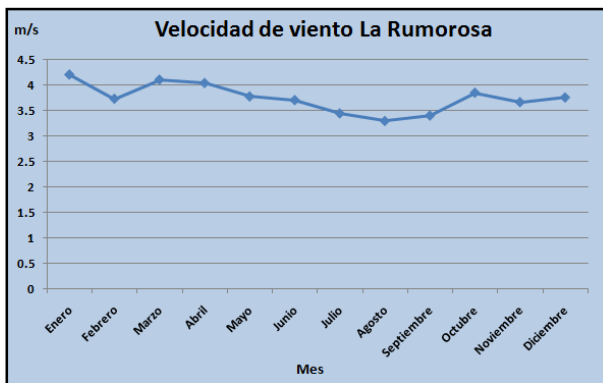
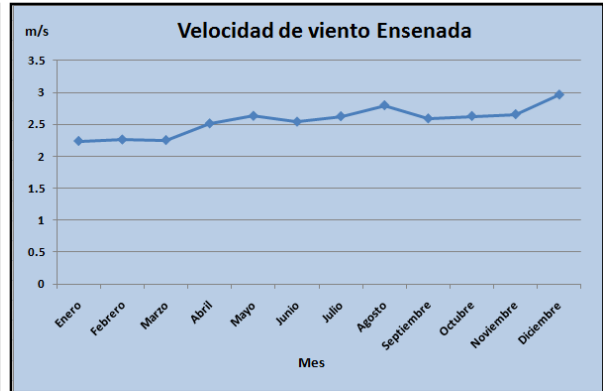
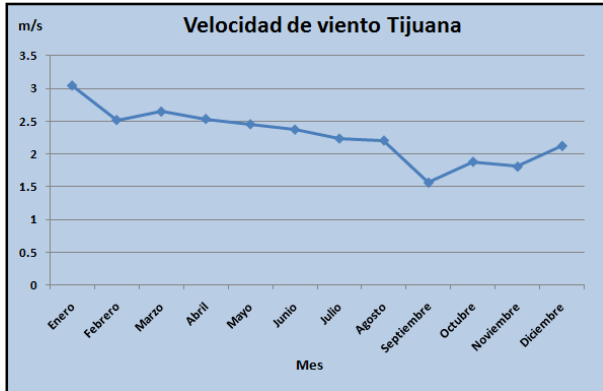
Apéndice B

Distribución de la velocidad diurna promedio en cada estación climatológica para un periodo de cuatro años.



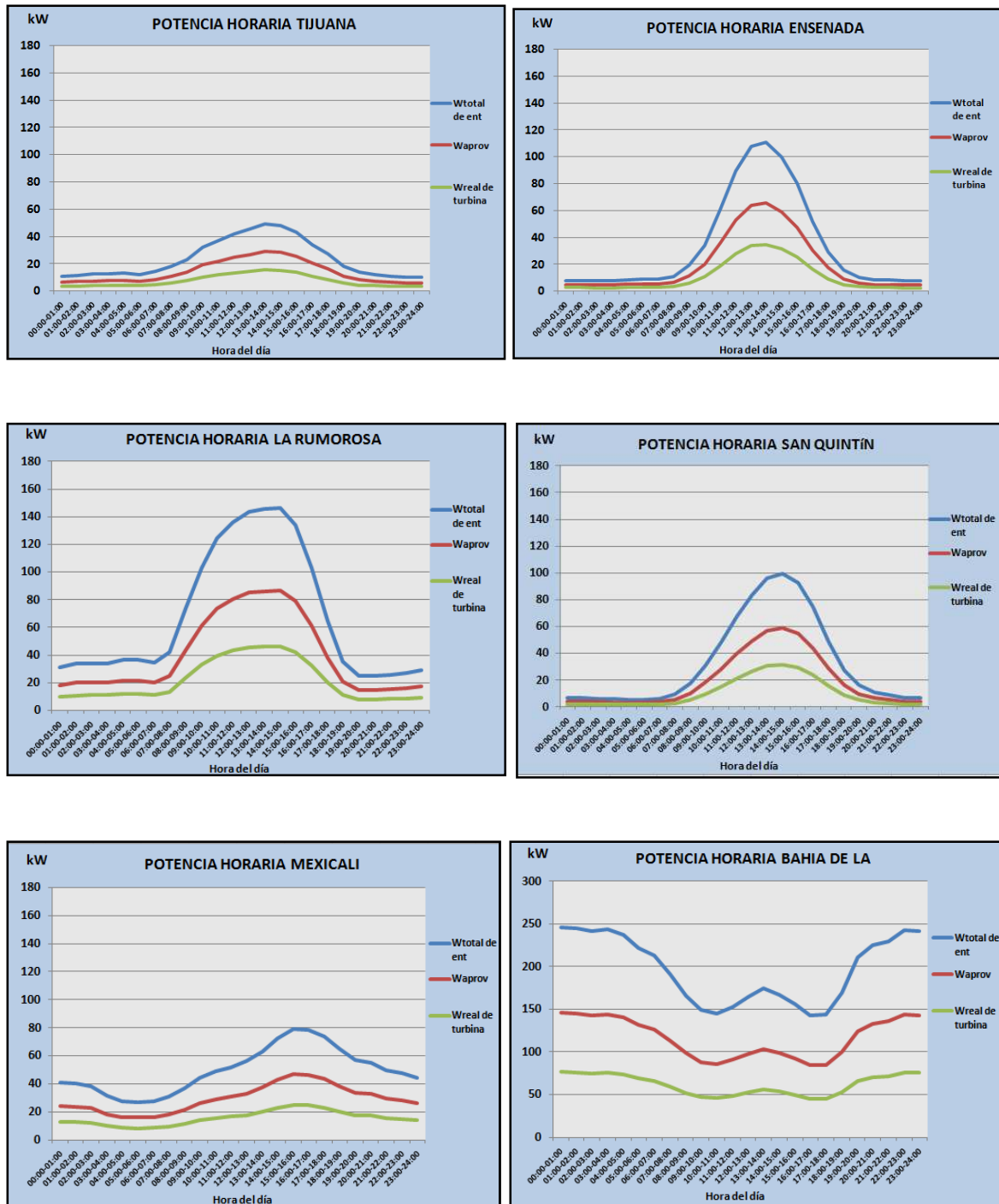
Apéndice C

Distribución de la velocidad de viento promedio mensual.



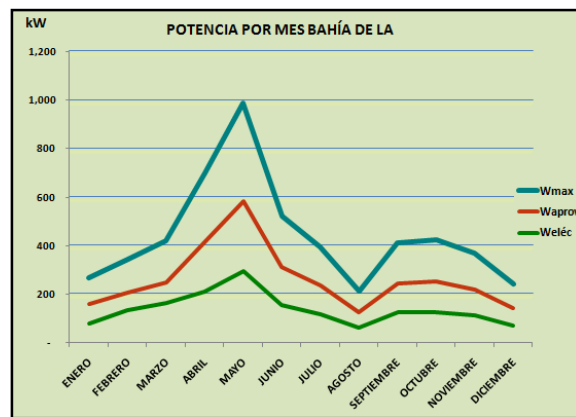
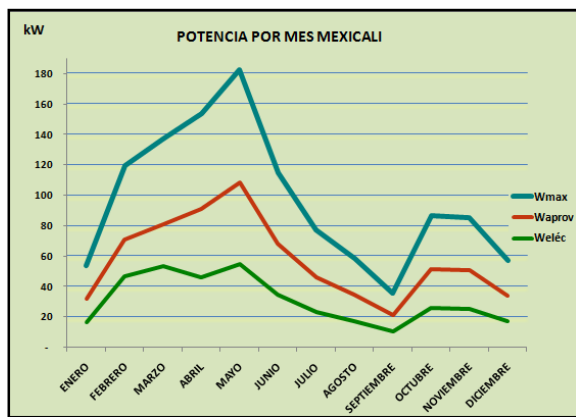
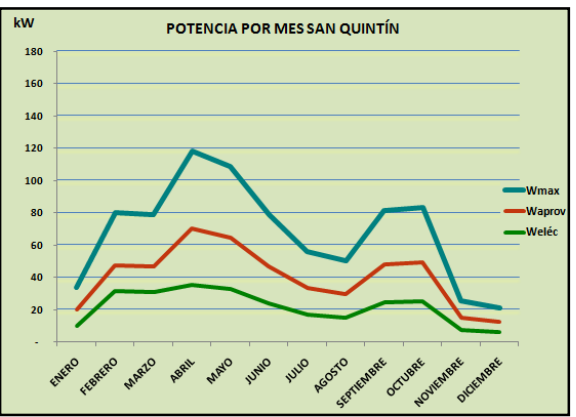
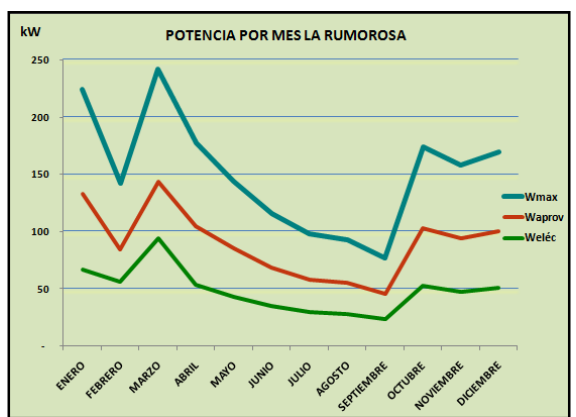
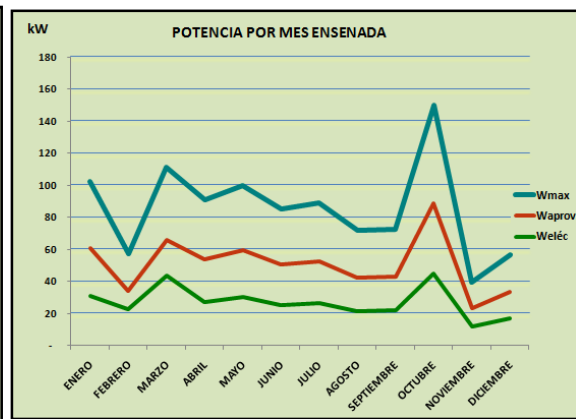
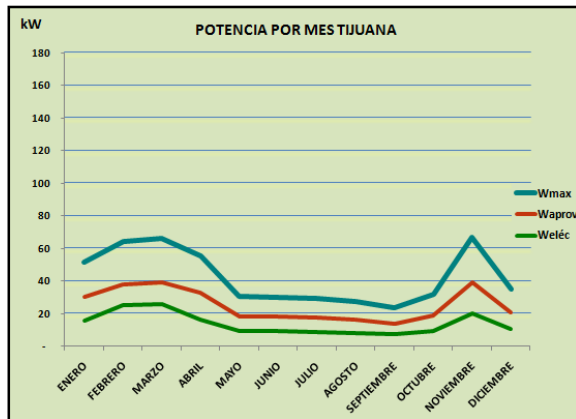
Apéndice D

Potencia obtenida del viento promedios diurnos para potencia total, potencia aprovechable y potencia producida por una pequeña turbina de viento.



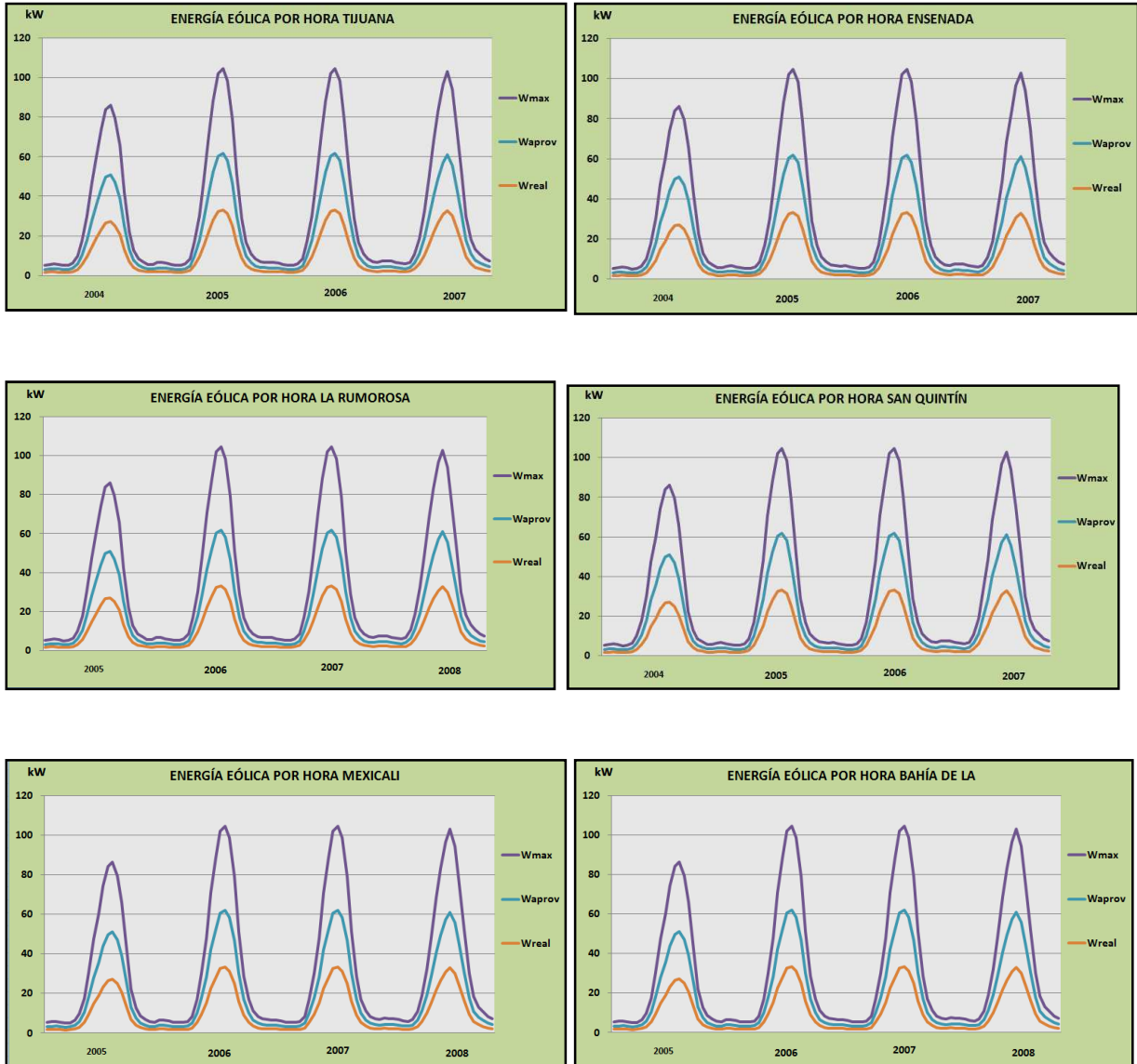
Apéndice E

Distribución de la potencia mensual para cada estación de monitoreo.



Apéndice F

Distribución de la potencia horaria a lo largo de cuatro años en cada estación.



Apéndice G

Potencia real anual calculada para una turbina de viento de baja potencia en cada estación de monitoreo.

