



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO PARA APLICACIÓN AGRÍCOLA
EN EL VALLE DE MEXICALI, B. C., MÉXICO**

Tesis que para obtener el título de
Ingeniera en Energías Renovables

Presenta

MAYRA GPE. ARREDONDO GÁMEZ

Director de Tesis

Dr. O. RAFAEL GARCÍA CUETO

Mexicali, B. C., Junio de 2016.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO PARA APLICACIÓN AGRÍCOLA
EN EL VALLE DE MEXICALI, B. C., MÉXICO**

Tesis que para obtener el título de
Ingeniera en Energías Renovables

Presenta

MAYRA GPE. ARREDONDO GÁMEZ

Director de Tesis

Dr. O. RAFAEL GARCÍA CUETO

Mexicali, B. C., Junio de 2016.

ÍNDICE

RESUMEN	1
Capítulo I. INTRODUCCIÓN	
1.1. Antecedentes.....	2-4
1.2. Planteamiento del problema.....	4-5
1.3. Objetivo General.....	5
1.4. Objetivos Específicos.....	5
Capítulo II. MARCO TEÓRICO	
2.1. La Atmósfera.....	7
2.2. El Viento.....	7-8
2.3. Energía Eólica.....	9
2.3.1. Potencia del viento.....	9
2.3.2. Área de barrido.....	10
2.4. Tratamiento de datos.....	10-11
2.4.1. Velocidad de viento.....	11
2.5. Tecnología de las turbinas eólicas.....	12
2.5.1. Configuraciones.....	12
2.5.2. Dos y tres aspas.....	12
2.5.3. Materiales de las aspas.....	12
2.5.4. Orientación.....	12
2.5.5. Robustez.....	13
2.5.6. Control de exceso de velocidad.....	13
2.5.7. Generadores.....	13
Capítulo III. METODOLOGÍA	
3.1. Base de datos.....	14
3.2. Selección de Estaciones Meteorológicas.....	14-15
3.3. Selección de variables y periodo útil de datos.....	16
Capítulo IV. RESULTADOS	
4.1. Estación de Andrade, Valle de Mexicali, B. C., México.....	17
4.1.1. Histogramas de frecuencias de viento para Andrade para Enero....	18
4.1.2. Histogramas de frecuencias de viento para Andrade para Abril.....	19

4.1.3. Histogramas de frecuencias de viento para Andrade para Julio.....	20
4.1.4. Histogramas de frecuencias de viento para Andrade para Octubre...	21-22
4.1.5. Rosas de Viento.....	23
4.1.6. Densidad de Potencia.....	24
Capítulo V. CONCLUSIONES.....	25
Capítulo VI. ANEXOS.....	26-33
Capítulo VII. REFERENCIAS.....	34

RESUMEN

El objetivo de esta tesina es la caracterización del comportamiento y evaluación preliminar del recurso eólico para su posible aplicación en la zona agrícola del Valle de Mexicali, B.C., México. Para lograr lo anterior se recopilaron mediciones de viento de cinco estaciones climatológicas durante los años 20XX a 20XX, distribuidas en el mencionado Valle. Se realizó un análisis de la velocidad media del viento y su desviación estándar, y se construyeron histogramas de frecuencia y rosas de viento de cada estación climatológica para analizar su comportamiento. Mediante la función de distribución de Weibull se analizó la velocidad del viento para encontrar los factores de forma y de escala para tener indicadores del potencial eólico de la región, y se obtienen densidades de potencia. Los resultados indican que la velocidad promedio del viento, estimada a 10 metros de altura varía entre 1.9 y 2. m/s, con valores de densidad de potencia, también estimados a 10 metros de altura, entre 191 W/m² y 464 W/m².

Por las características del viento y la potencia energética encontrada se concluye que una potencial aplicación de utilidad a los agricultores es el bombeo de agua o el molido de grano, ya que la densidad de potencia encontrada no es lo suficientemente alta como para pensar en la generación de energía eléctrica.

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El viento es el aire en movimiento que se produce en la atmósfera por causas naturales, y aunque tiene un movimiento tridimensional, para aprovechamientos eólicos sólo se considera la velocidad y la dirección de la componente horizontal. Los principales orígenes del viento son la radiación solar, la rotación de la tierra y las perturbaciones atmosféricas (Manwell et al, 2002).

La necesidad de energía limpia y el temor ante una menor disponibilidad del petróleo en el futuro han renovado el interés en la producción de energía de fuentes renovables. El advenimiento de la máquina de vapor, seguido por la aparición de otras tecnologías para la conversión de combustibles fósiles en energía útil, hizo que el viento no fuera considerado para generación de energía. Sin embargo a finales de 1960, los primeros signos de una inversión se podían discernir, y a principios de 1990 fue cada vez más evidente que un cambio fundamental estaba en marcha.

Cinco factores principales deben mencionarse para entender ese cambio en la pauta conductual energética en la búsqueda de alternativas. En primer lugar la conciencia emergente de la finitud de los combustibles fósiles, así como de los efectos adversos que nuestro planeta sufre por la quema de esos combustibles. En segundo lugar el hecho de que existe viento en todas partes de la Tierra, y en algunos lugares con gran densidad de energía. En tercer lugar, la capacidad tecnológica. En particular, no había avances en otros campos, que, cuando se aplican a las turbinas eólicas, podrían revolucionar la forma en la que se podían ser utilizadas. Estos tres primeros factores fueron los puntales para fomentar el resurgimiento de la energía eólica, pero no era suficiente. Tenía que haber dos factores más, el primero de ellos, toda una visión de una nueva manera de utilizar el viento, y el segundo, la voluntad política para hacerlo realidad. La visión comenzó mucho antes de la década de 1960 (la Cour y Betz, 19XX). Esta voluntad política se

presentó por primera vez en los Estados Unidos, Dinamarca y Alemania, y ahora en gran parte del resto del mundo.

La tecnología de la energía eólica está teniendo un vertiginoso desarrollo. Desde la época del auge de los molinos de viento tradicionales no ha habido un crecimiento tan espectacular en el uso de la energía eólica. A partir del año 2000 más de 40 mil turbinas de mediana escala estaban en operación por todo el mundo, fundamentalmente en California, Europa y la India. Estas turbinas comerciales, incluyendo aquellas que se encuentran en las gigantescas plantas de California, producirán anualmente 20, 000 millones de KWh de electricidad generada por energía eólica, suficiente para satisfacer las necesidades de más de 3 millones de californianos (Lantz, 2013).

Aunque sus contribuciones pueden no ser cuantiosas en términos absolutos, las pequeñas turbinas tienen un gran significado en la vida diaria de muchas personas en áreas remotas del mundo entero. Actualmente hay más de cincuenta fabricantes de pequeñas turbinas eólicas en el mundo, con más de cien modelos diferentes. El mayor número de turbinas eólicas instaladas están en la categoría de microturbinas.

Particularmente, en los últimos años el uso de energía eléctrica en la agricultura ha aumentado con las demandas de mayor productividad, la necesidad de producir los alimentos en menos tiempo o producirlos en mayor cantidad es cada vez más alta. Durante este mismo periodo la población se ha enfrentado al incremento de precios en cuanto a energía y combustible, los recursos energéticos no renovables se han vuelto más costosos y menos disponibles, agregando los efectos del calentamiento global que son más evidentes que años atrás.

Siempre que se quiera aprovechar la energía eólica para producir electricidad, se deben llevar a cabo un conjunto de actividades específicas lo que implica una planeación bien definida, iniciando con la detección de posibles sitios con potencial

eólico aprovechable. Esta detección se logra con el análisis de datos de velocidad y dirección de viento, y otras variables como la temperatura del aire y presión atmosférica.

En cualquier caso, sea cual sea la aplicación que se le dé a la energía del viento en un sitio determinado, es necesario conocer su magnitud y distribución temporal a fin de determinar si es factible o no su utilización; si lo es, cual es el grado de beneficio que se espera obtener y qué tipo de sistema es el más indicado para implementarse dadas las características técnicas de éste y las del viento en ese lugar.

Lo anterior implica el análisis de la información sobre el viento, para obtener sus características de comportamiento y la cantidad de energía que de él puede extraerse.

Por lo anterior, en el presente trabajo se realiza un estudio del comportamiento del viento en el Valle de Mexicali, Baja California, México, y se evalúa su potencial energético, con el fin de contar con bases que permitan determinar la factibilidad de aplicarse en la zona agrícola del mencionado Valle.

1.2. Planteamiento del problema

Durante muchos años, se han sobreexplotado los recursos no renovables de nuestro planeta para satisfacer las necesidades humanas en la vida diaria, en especial, las necesidades energéticas. En este momento, las consecuencias de esta actividad son más que evidentes: el calentamiento global, la contaminación, la escasez de alimentos, la falta de recursos, entre otras cosas, hacen que sea alarmante nuestra situación y se busquen alternativas para erradicar o disminuir los efectos negativos de nuestro consumo de energía.

La energía se utiliza en cada aspecto de nuestra vida; en los alimentos, en el transporte, vestido, calzado, construcciones, artículos de limpieza, artículos que se utilizan para los estudios o el trabajo, en la salud y mucho más. En la búsqueda de alternativas para generar energía limpia que favorezca al medioambiente se encuentran las energías renovables.

El Valle de Mexicali, en el estado de Baja California, México, es una zona donde se realizan diversas actividades agrícolas, de las cuales muchas familias obtienen recursos para subsistir. Es sabido que se necesita energía para llevar a cabo actividades económicas productivas, y hacerlas requiere combustible fósil, horas de trabajo, y en cualquiera de estas actividades se produce un efecto negativo al medioambiente y al ser humano, ya que se pierde mucho tiempo cuando no se cuenta con energía en el área.

En particular, en este trabajo se realizó un análisis exhaustivo del recurso eólico del Valle de Mexicali, B.C., México, como una alternativa para llevar a cabo alguna aplicación agrícola y así evitar, o por lo menos disminuir, el uso de combustibles fósiles, con lo que se evitaría el deterioro ambiental, y probablemente mejoraría en el aspecto económico del productor agrícola.

1.3. Objetivo General

Cuantificar y analizar el recurso eólico en el Valle de Mexicali, B.C., México y su potencial aplicación para usos agrícolas.

1.4. Objetivos Particulares

1. Investigar estaciones climatológicas útiles que tengan mediciones históricas de viento en el Valle de Mexicali, B.C., México
2. Elaborar una base de datos de velocidad y dirección de viento de cada estación climatológica conseguida.
3. Analizar el viento a varios niveles temporales: horario, diario, mensual, estacional y anual.
4. Realizar estimación del potencial energético eólico.
5. Analizar las posibles aplicaciones del potencial eólico en el sector agrícola.

Capítulo II. MARCO TEÓRICO

2.1. La atmósfera

La atmósfera es la capa gaseosa que envuelve la Tierra. Es parte importante de lo que hace posible que el planeta sea habitable. Su espesor es pequeño. El 99% de la masa atmosférica está concentrado en los primeros 30 km de altura. El aire es una mezcla de gases que además contiene partículas sólidas y líquidas en suspensión en composición y cantidad variable.

Los gases que forman la atmósfera se clasifican de la siguiente manera:

- Gases permanentes: su proporción se mantiene constante. Estos gases son el nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y gases nobles.
- Gases en proporciones variables: dióxido de carbono, vapor de agua y ozono.

La temperatura del aire varía con la altura. Esto se define como gradiente térmico (dT/dz). Se distinguen tres grandes zonas en la atmósfera: *la homosfera o baja atmósfera* (80-100km) donde la composición del aire es constante, *heterosfera* y *exosfera*.

La homosfera a su vez se divide en 3 capas: la *troposfera*, *estratosfera* y *mesosfera*. La troposfera es la capa donde se desarrollan los fenómenos meteorológicos y contiene aproximadamente el 80% de la masa atmosférica y en energía eólica es la capa de mayor interés.

2.2. El viento

El viento es otra manifestación de la acción del Sol. El calentamiento desigual de la corteza terrestre da lugar a corrientes de aire. El viento es aire en movimiento, las diferencias de densidad y presión que se originan por las variaciones de temperatura causan el movimiento de las masas de aire. Su energía cinética es la que da lugar a la energía eólica.

La circulación de viento a gran escala, viento sinóptico, está causada por gradientes de presión en sistemas de macroescala (anticiclones y borrascas) y su duración puede alcanzar varios días.

La circulación de mesoescala está causada por gradientes de presión en sistemas de escala media (frentes, tormentas, brisas, etc.). Su duración puede alcanzar varias horas. Los estudios de meso y macroescala son los que presentan mayor interés para el aprovechamiento energético del viento. *(Villarrubia, 2013)*

Los vientos no circulan en línea recta desde las zonas de altas presiones a las de baja. Lo hacen en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte y en sentido contrario en el sur. Es una consecuencia del movimiento de rotación de la Tierra que da lugar al efecto Coriolis, que tiende a desviar la trayectoria de los objetos que se desplazan en la superficie terrestre.

El aire se define por dos características básicas que tienen relación directa en cualquier aplicación de energía eólica: su velocidad y dirección. El anemómetro y la veleta, respectivamente, cuantifican sus valores, los cuales pueden tener tres condiciones a efectos de aplicación:

- **Viento instantáneo.** Corresponde a la velocidad en un instante determinado.
- **Viento medio aeronáutico.** Es el valor de la velocidad mantenida durante dos minutos.
- **Viento medio meteorológico.** Como lo anterior, pero mantenido diez minutos.

La velocidad del viento cambia con la altura. El efecto de rozamiento en la superficie de la Tierra, el denominado cizallamiento, y la fuerza de Coriolis provocan el cambio, que puede ser sustancial y de gran importancia en las instalaciones eólicas. *(Perales, 2010)*

2.3. Energía Eólica

La energía eólica se genera por las diferencias de temperaturas en la superficie creando los movimientos de aire, y con esto generando fuerza para producir energía.

La implementación e instalación de sistemas que funcionen con fuentes de energías renovables, requieren de una evaluación previa para sustentar la instalación futura de cualquier sistema de generación de energía.

2.3.1. Potencia de viento

La potencia (P) del viento es una función de la densidad del aire (ρ), del área que intercepta el viento (A) y de la velocidad instantánea del mismo (v). El aumento de estos factores aumenta la potencia disponible en el viento:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

La densidad del aire varía con la temperatura y la elevación. El aire caliente es menos denso que el frío. Cualquier turbina eólica producirá menos en el verano que el invierno, aún con la misma velocidad de viento.

Los cambios en la densidad del aire con relación a las condiciones estándar a nivel del mar pueden cambiar la producción de potencia de un 10% a un 20% y algunas veces más.

No obstante, el efecto de los cambios en temperatura o elevación sobre la potencia del viento, especialmente en las pequeñas turbinas eólicas, es despreciable con respecto a los cambios en la velocidad del mismo.

La potencia del viento varía con el cubo de su velocidad. Si se duplica la velocidad de viento, se incrementaría 8 veces la potencia disponible. Inclusive un pequeño incremento de la velocidad cambiará substancialmente la potencia de éste. Esa es la razón de poner énfasis en la importancia de instalar la turbina donde los vientos sean mejores. (Gipe, 1999)

2.3.2. Área de barrido

La potencia del viento está directamente relacionada con el área que intercepta el viento, que es el área barrida por el rotor de la turbina. Duplicando ésta se duplicará la potencia disponible.

Una turbina eólica convencional donde el rotor gira alrededor de un eje horizontal. El rotor barre un disco de área circular

$$A = \pi R^2$$

Por lo tanto, el área A es igual al producto de π por el cuadrado del radio del rotor R , o aproximadamente la longitud de un aspa. Con esta fórmula se obtiene el área A barrida en la corriente de viento interceptada por el rotor.

La relación entre el radio del rotor y la energía capturada es un punto fundamental para comprender el diseño de una turbina. Conociendo esto se puede determinar el tamaño de cualquier máquina eólica por las dimensiones de su rotor.

Esta relación entre el área de barrido y la potencia disponible explica un axioma crucial de la energía eólica: el potencial de una turbina eólica depende del diámetro del rotor. Una turbina eólica con un rotor más grande casi invariablemente generará más electricidad que otra con un rotor más pequeño, sin tener en cuenta la potencia del generador.

2.4. Tratamiento de los datos eólicos

El análisis de la viabilidad del viento como fuente de energía, requiere conocer sus características. Debido a la variabilidad y aleatoriedad del viento es necesaria la aplicación de técnicas estadísticas para su análisis y cuantificación. En el proceso de caracterización de viento intervienen los siguientes aspectos:

- Toma de datos: velocidad y dirección.
- Técnica de medición: aparatos de medida (anemómetro, veleta, etc.).
- Métodos de tratamiento de datos: técnicas estadísticas (valores medios horarios, diarios, anuales, rosa de vientos, etc.).

En la caracterización del viento se debe atender los siguientes aspectos:

- Análisis estadístico de viento, tanto de velocidad como de dirección.
- Distribución temporal de la velocidad y dirección.
- Condiciones meteorológicas.
- Perfil vertical de viento.
- Condiciones de turbulencia.
- Factores de ráfaga.

Los datos de viento se tratan de forma estadística, para determinar la distribución por frecuencias de las velocidades y por rumbos de las direcciones.

La evaluación de los recursos eólicos de un área determinada, presenta los siguientes problemas:

- La necesidad de disponer de datos como la velocidad y dirección durante un periodo de tiempo suficiente para su análisis, por ejemplo de varios años.
- La variabilidad y aleatoriedad del viento.
- Los efectos locales como la orografía, la rugosidad del terreno y los obstáculos.
- La extrapolación de las mediciones a una altura determinada, en general 10 m, para diferentes alturas respecto al nivel del suelo.

2.4.1. Velocidad de viento

La velocidad de viento \mathbf{v} es una magnitud vectorial. Aunque el vector velocidad \mathbf{v} tiene tres componentes, en aplicaciones de energía eólica sólo se consideran las componentes en el plano horizontal.

La velocidad del viento se caracteriza por dos valores: el módulo de la componente de la velocidad en el plano horizontal (denominada velocidad o intensidad del viento) y la dirección de donde sopla. (*Villarrubia, 2013.*)

2.5. Tecnología de las turbinas eólicas

2.5.1. Configuraciones

Las turbinas eólicas se han construido de diversas formas. Actualmente casi todas las pequeñas turbinas son de tipo barlovento y de eje horizontal, donde el rotor gira delante de la torre.

2.5.2. Dos o tres aspas

Ha habido investigaciones acerca de la pertinencia de usar rotores de dos o tres aspas. La única ventaja de disponer de dos aspas en lugar de tres está en el precio. Las turbinas de tres aspas trabajan más uniformemente que con sólo dos, lo que significa que durarán más tiempo.

Actualmente se discute por la conveniencia del uso de los rotores de dos o tres aspas.

2.5.3. Materiales de las aspas

La mayoría de las pequeñas turbinas eólicas usan materiales compuestos, tal como fibra de vidrio (vidrio reforzado con poliéster), para las aspas de sus rotores y sólo unas pocas usan todavía madera. En algunos casos se ha optado por materiales compuestos más exóticos, empleando fibra de carbón en vez de vidrio. Ninguno usa aluminio porque este es un material propenso a la fatiga. (*Gipe, 1999*)

2.5.4. Orientación

Debido a sus dimensiones, las pequeñas turbinas eólicas no pueden acomodar los mecanismos de transmisión y los motores de orientación que emplean las turbinas de cara al viento más grandes. La mayoría de las pequeñas turbinas utilizan veletas que ponen al rotor de frente al viento.

2.5.5. Robustez

En general, las pequeñas turbinas más pesadas han mostrado ser más robustas y seguras que las turbinas ligeras. Mick Sagrillo es un defensor de lo que él llama “la escuela del metal pesado” del diseño de pequeñas turbinas eólicas. “Las turbinas más pesadas y más macizas sobreviven corrientemente más tiempo”, dice él. Bajo este criterio una turbina que tiene una masa relativa de 10 kg/m^2 es más robusta que otra con una masa relativa de 5 kg/m^2 . (Gipe, 1999)

2.5.6. Control de exceso de velocidad

Generalmente todas las turbinas eólicas tienen un medio para controlar el rotor bajo vientos fuertes. El mecanismo regulador de velocidad es una de las partes que caracterizan las diferentes marcas de turbinas. La mayoría de las micro turbinas y mini turbinas eólicas se pliegan alrededor de un pivote que hace que el rotor gire hacia la cola. Algunas pliegan o mueven el rotor verticalmente. Otras se pliegan horizontalmente hacia la veleta. Varios diseños de turbinas de tamaño doméstico cambian el ángulo de las aspas y pliega el rotor. (Give, 1999)

2.5.7. Generadores

Un gran número de las pequeñas turbinas eólicas emplean alternadores de imanes permanentes. Este es el generador más simple y más robusto, y muy cercano al modelo ideal para las micro turbinas y mini turbinas eólicas. En las turbinas de tamaño domestico existe más diversidad.

Capítulo III. METODOLOGÍA

En este capítulo se exponen los métodos y herramientas que se utilizaron para el desarrollo del presente estudio. Es importante mencionar que para elegir una aplicación de energía eólica es necesario asegurarse de la disponibilidad del recurso eólico que hay en toda la zona que se va a estudiar y analizar detalladamente el área óptima que pueda beneficiarse de ella, para poder obtener la mayor energía posible.

3.1. Base de Datos

Ya que el propósito del estudio consiste en evaluar el potencial eólico en el Valle de Mexicali, B.C., se hizo una búsqueda de sitios que contaran con datos de viento de largo período y que al mismo tiempo fueran útiles para el objetivo descrito. Entre las varias fuentes disponibles están la Comisión Nacional del Agua, Universidad Autónoma de Baja California y Secretaría de Fomento Agropecuario del estado de Baja California. Se eligió la última fuente debido a que cuenta con estaciones ubicadas en la zona agrícola del valle de Mexicali, así que se adapta muy bien a la meta de esta tesis. La base de datos climática se denomina *Sistema de Información para el Manejo de Agua de Riego en Baja California (SIMARBC)*; este sitio ofrece una gran cantidad de variables climatológicas de 17 estaciones meteorológicas en todo el Estado de Baja California, figura 1.

La información contenida puede solicitarse desde el año 2005 hasta el 2014 con datos diarios y/o horarios directamente de la siguiente página de enlace: www.simarbc.gob.mx.

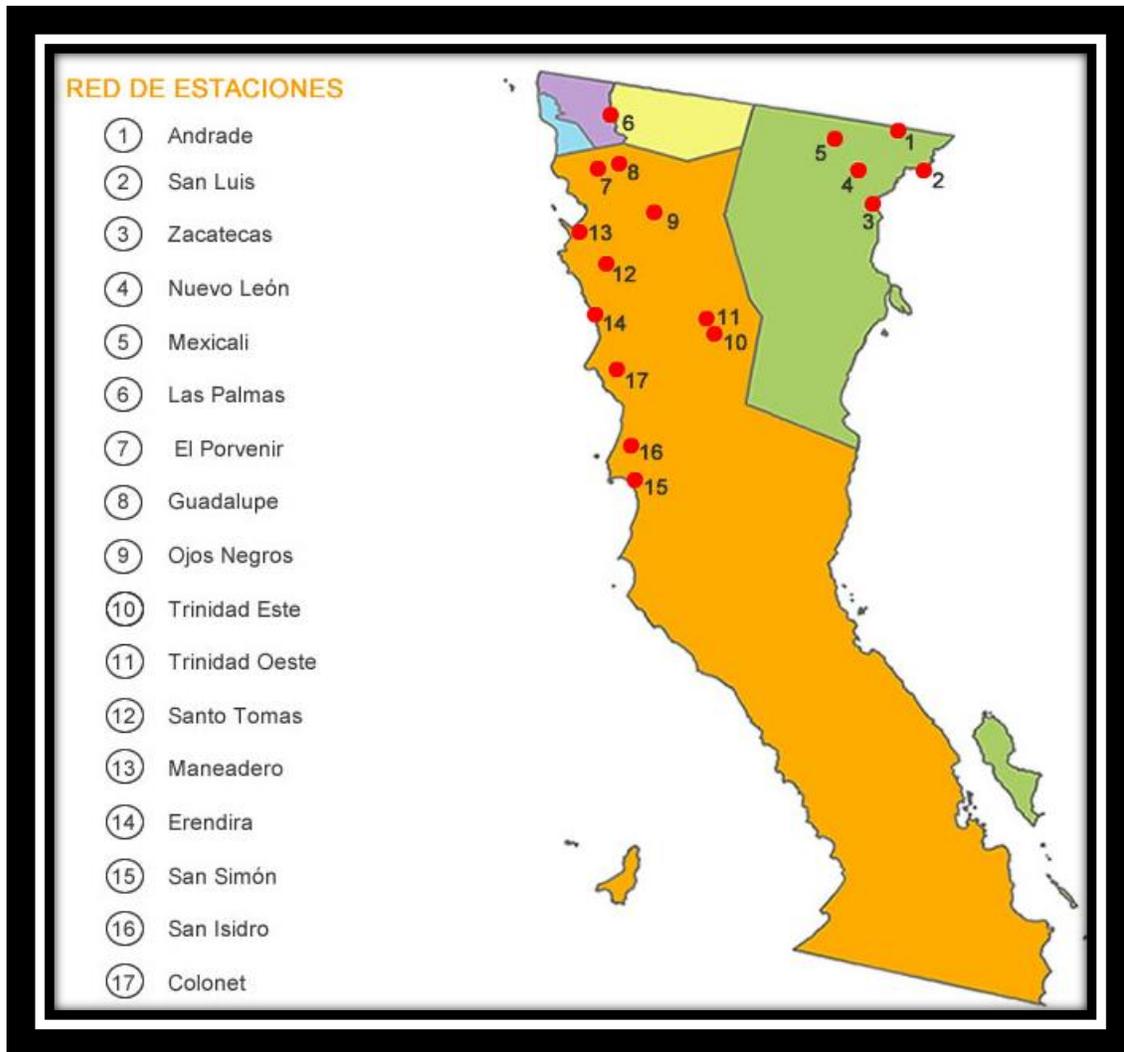
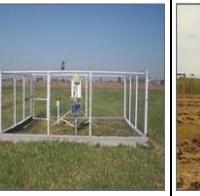


Figura 1: Red estaciones meteorológicas de SIMARBC (Fuente: www.simarbc.gob.mx)

3.2. Selección de Estaciones Meteorológicas

De las estaciones meteorológicas disponibles se consultaron las 5 estaciones del Valle de Mexicali, B.C., mostradas en la figura 1 en la parte noreste del estado de Baja California, y que se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Descripción de estaciones meteorológicas del Valle de Mexicali (Fuente: www.simarbc.gob.mx)

Estación	Andrade	San Luis	Zacatecas	Nuevo León	Mexicali
No. De Estación	1	2	3	4	5
Municipio	Mexicali	Mexicali	Mexicali	Mexicali	Mexicali
Fecha de inicio de operación	01/01/2006	17/04/2002	10/02/2005	10/01/2005	10/01/2005
Ubicación	Mesa Testamentaria de Andrade	Col. Miguel Alemán	Col. Zacatecas	ICA-UABC Ej. Nuevo León	Col. Colorado III
Altura *msnm	39.969	27.442	9.702	8.685	7.611
Status	Activa	Activa	Activa	Activa	Activa
Cultivo establecido	Alfalfa	Pasto Bermuda Común	Pasto Bermuda Común	Pasto Bermuda Común	Pasto Bermuda Común
Superficie Has	0.49	0.42	1	1	1
Coordenadas Geográficas	32° 40' 28" N 3646882 N	32° 29' 33" N 3597131 N	32° 11' 01" N 3562447 N	32° 24' 40" N 3587236 N	32° 32' 42" N 3602008 N
Coordenadas Long. (W y E)	115° 02' 37" W	114° 49' 31" W (Z11) 704253 E	115° 03' 42" W (Z11) 682652 E	115° 11' 46" W (Z11) 669643 E	115° 23' 24" W (Z11) 652674 E
Imagen					

3.3. Selección de variables y período útil de datos

La base de datos proporciona diversas variables climatológicas de las cuales fueron extraídas únicamente dos; la dirección y la velocidad del viento. Con éstas se pueden determinar las velocidades más altas y más frecuentes de una zona del Valle de Mexicali y es más sencillo identificar dónde existe más potencial eólico para elegir una aplicación apropiada.

Para calcular la disponibilidad del recurso eólico de una zona es necesario al menos el análisis de un año de datos, por lo que se revisó la cantidad de datos disponibles encontrándose que el período más completo fue el del año 2012.

Dado que la información disponible en la página web referida no se ajustó al formato para ser procesada en la hoja electrónica de Excel se tuvo que realizar el siguiente proceso.

3.4. Elaboración de Rosas de Viento

Dada la variabilidad y aleatoriedad del viento se utilizan ciertas técnicas estadísticas y gráficas para comprender su comportamiento. La velocidad de viento tiene una variación diurna, mensual, estacional y anual. Por lo que su visualización con, por ejemplo, un histograma de frecuencias, sirve para obtener una "primera vista" general, o un panorama, de la distribución en la magnitud del viento.

Así que con el propósito de conocer y describir el comportamiento del viento, magnitud y dirección, a través de las estaciones del año se elaboraron las Rosas de Viento, utilizando un software llamado WRPLOT, en el que se ingresaron los datos de viento importándolos de Excel.

Capítulo IV. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada estación meteorológica analizada.

4.1. Estación de Andrade, Valle de Mexicali, B.C.

Ubicada a una la latitud 32° 40' 28" norte, longitud 115° 02' 37" oeste y una altitud de 39.969 msnm, la estación meteorológica Andrade cuenta con una base de aproximadamente un millón de datos variables meteorológicas.

Con lo anterior, se obtuvo el histograma de frecuencias (figura 2) y rosa de vientos (figura 3) para cada mes del año 2012. A continuación se muestra únicamente un mes para representar cada estación del año en el siguiente orden; invierno, primavera, verano y otoño.

4.1.1. Histograma de frecuencias de viento para Andrade para Enero.

De la figura 2 se puede observar que las velocidades de viento son en su mayoría bajas (un 62.8% del tiempo), en un rango de 0.5-2.1 m/s, un 22.4% en el rango de 2.1 a 3.6 m/s, y un 14.8% con velocidades superiores a 3.6 m/s, con un límite superior de 8.8 m/s.

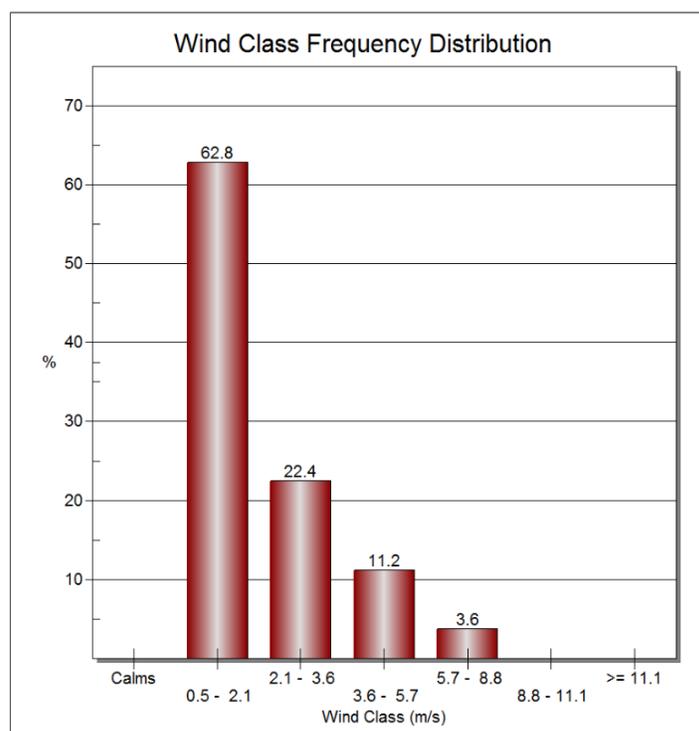


Figura 2. Histograma de frecuencias del mes de enero del año 2012 para Andrade, B.C.

4.1.2. Histograma de frecuencias de viento para Andrade para Abril.

De la figura 3 se observa que un 55.3% del tiempo están en el rango de velocidades más bajo, de 0.5 a 2.1 m/s; un 27.1% de 2.1. a 3.6 m/s, un 16.3% del tiempo entre 3.6 y 8.8 m/s, y solamente un 1.3% del tiempo están en el rango de velocidades de 8.8 a 11.1 m/s. Por lo anterior, se puede observar que sólo el 44.7% de las velocidades que se presentan en este mes pueden generar potencia y el resto de las velocidades son velocidades relativamente débiles las cuales generarían una potencia muy baja.

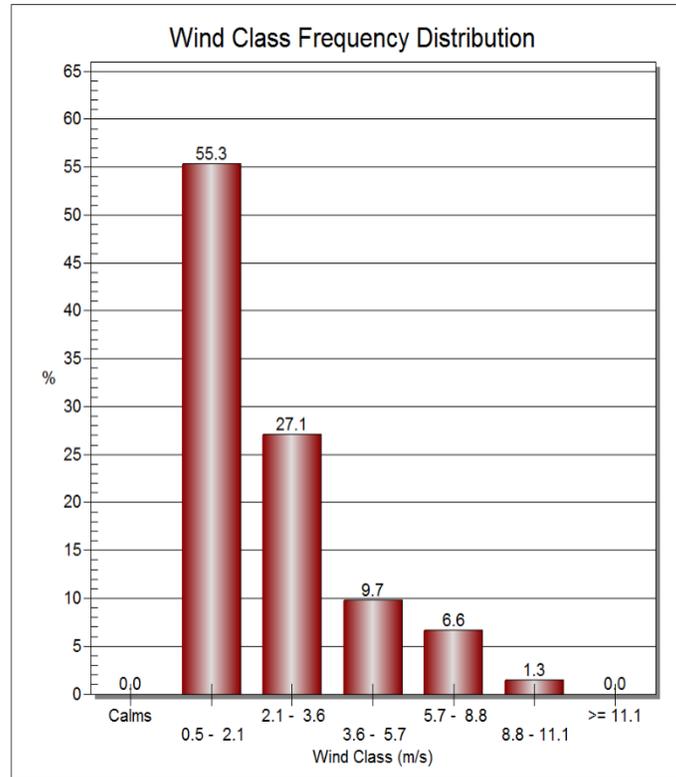


Figura 3. Histograma de frecuencias del mes de abril del año 2012 para Andrade, B.C..

4.1.3. Histograma de frecuencias de viento para Andrade para Julio.

En el histograma de frecuencias (figura 4) del mes de julio es posible apreciar el incremento de velocidades que van desde 2.1 hasta 8.8 m/s. Hay un mayor número de días durante este mes con velocidades ligeramente más altas que en los demás meses.

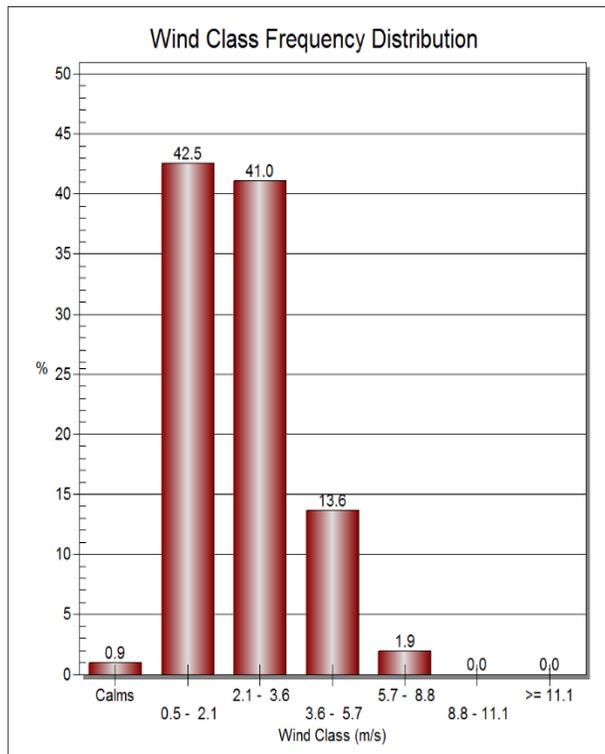


Figura 4. Histograma de frecuencias del mes de julio del año 2012 para Andrade, B.C..

4.1.4. Histograma de frecuencias de viento para Andrade para Octubre.

En el histograma de frecuencias (figura 5) del mes de octubre se observa que las velocidades del viento vuelven a distribuirse en un 73.1% velocidades de 0.5 a 2.1 m/s, sólo el 26.1% son velocidades altas.

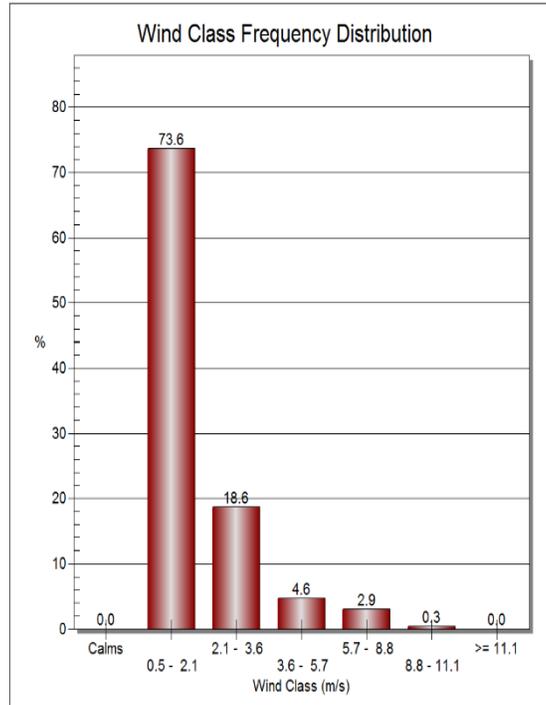


Figura 5. Histograma de frecuencias del mes de octubre del año 2012 para Andrade, B.C..

4.1.5. Rosas de vientos

Para mostrar la información acerca de las distribuciones de velocidades de viento y la frecuencia de variación de las direcciones, se elabora la rosa de los vientos, para Andrade se presenta la figura 6, para los cuatro meses representativos de las estaciones del año.

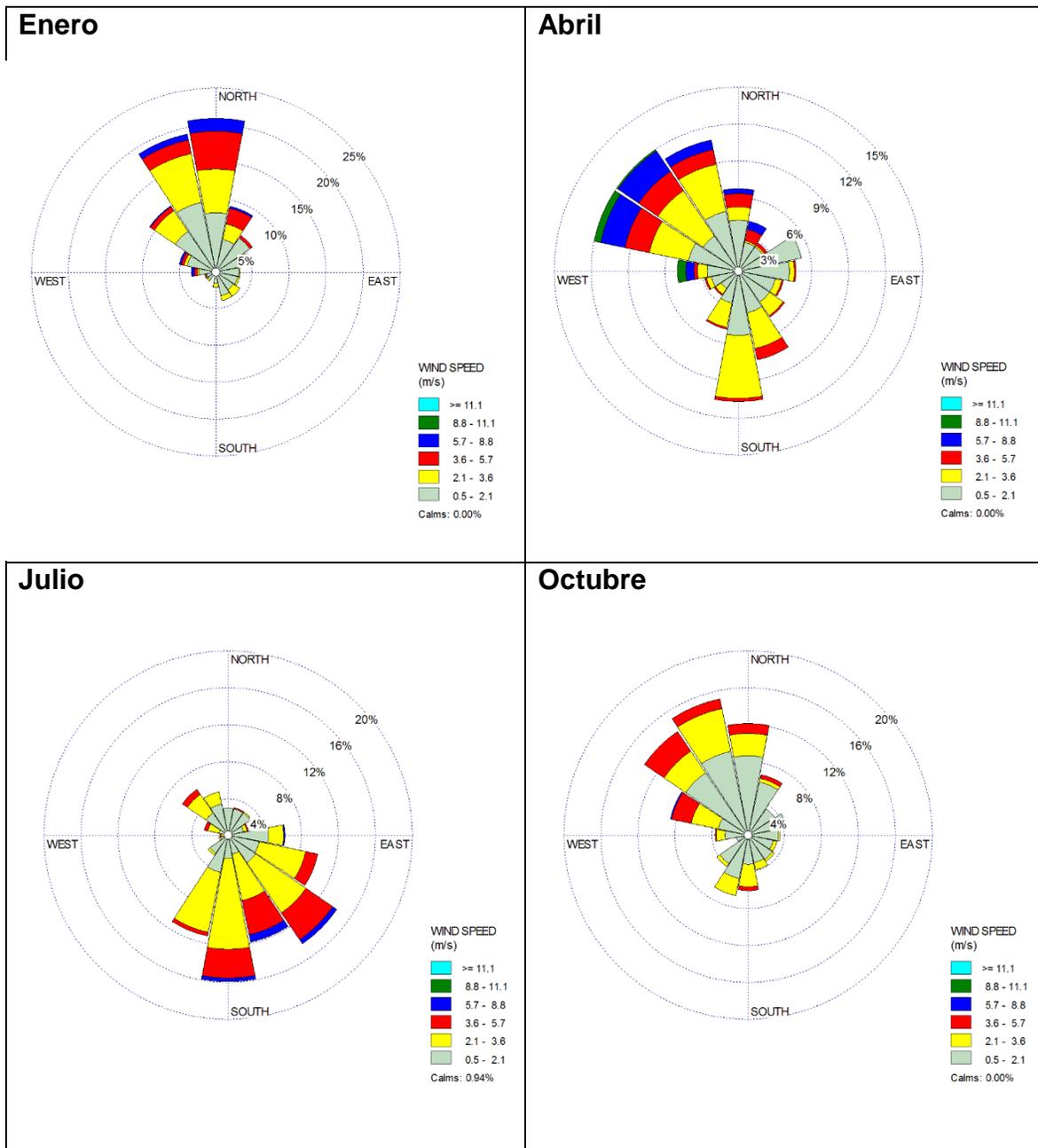


Figura 6. Rosas de viento para Andrade, B.C., en el año 2012

Se observa que en los meses de enero, representativo de invierno, abril, representativo de la primavera, y octubre, representativo del otoño, la dirección preferente de viento es del cuadrante oeste-norte. Es en la estación del verano cuando hay un cambio importante en la dirección del viento, ya que, a diferencia de los meses anteriores procede del cuadrante este al sur.

4.1.6. Densidad de potencia

La densidad de potencia por una unidad de área unitaria se define como la potencia por unidad de área, la cual se calculó con la siguiente fórmula.

$$P = \frac{1}{2} * A * v^3 * \rho_{aire}$$

CARACTERÍSTICAS ANUALES DEL RECURSO EÓLICO						
Altura (m)	Velocidad media (m/s)	Desviación estándar (m/s)	k	c (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Densidad de potencia (W/m ²)
2	2.30416667	1.35968333	1.79595833	1.59566667	8.79166667	224.8945
*10	2.93115833	1.73098333	1.79604167	1.97525833	11.1899583	463.9752
*15	3.11278333	1.83878333	1.79466667	2.15775	11.8907333	556.8807

Capítulo V. CONCLUSIONES

Mediante el análisis de los datos de viento que se registraron en el 2012. Es posible determinar qué área del Valle de Mexicali presenta mayor potencial eólico. Para este trabajo, los resultados arrojan que la zona de la Estación Meteorológica Andrade tiene las velocidades más altas de viento, con lo cual sería posible implementar una aplicación de baja potencia como el bombeo de agua.

También se puede concluir que la altura óptima para hacer una instalación y donde podemos obtener la mayor densidad de potencia es a 15m del suelo, en realidad si el molino está en un lugar más alto, la densidad de potencia se incrementa, sin embargo, se utilizó esta altura considerando que un molino de viento a mayor altura aumentaría el costo de inversión.

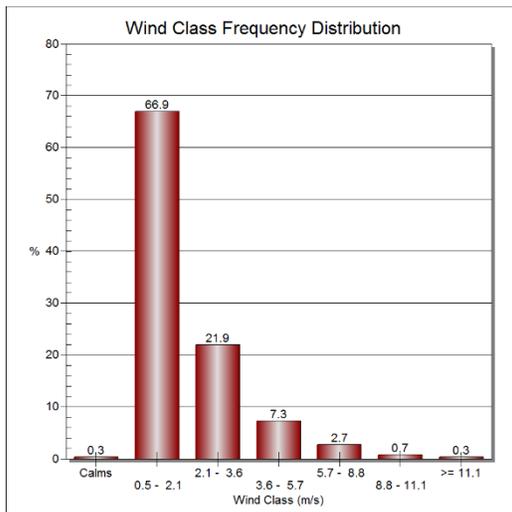
Probablemente sea mínimo el porcentaje de dióxido de carbono que no va a emitirse a la atmósfera por medio de aplicaciones como estas, pero es importante tomarlas en cuenta y si es posible llevarlas a cabo, ya que por más pequeña que sea la disminución del consumo combustibles fósiles, es muy significativo en cuanto al cuidado del medioambiente.

VI. ANEXOS

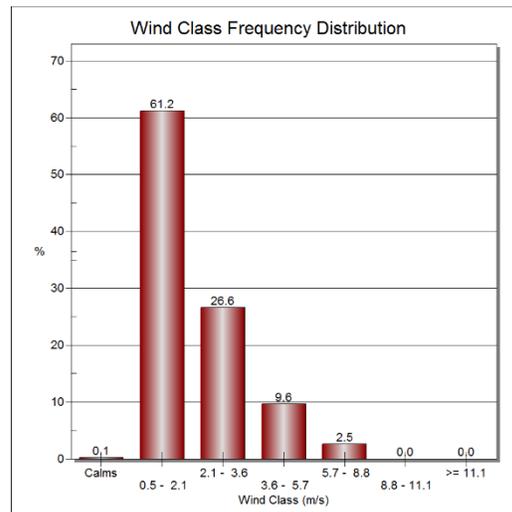
Estación San Luis

Histogramas de frecuencia

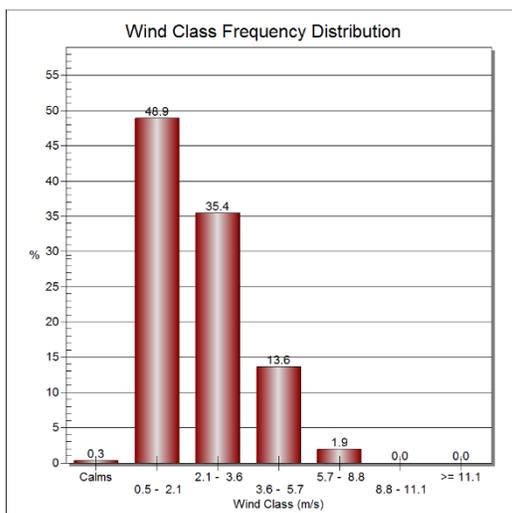
Enero



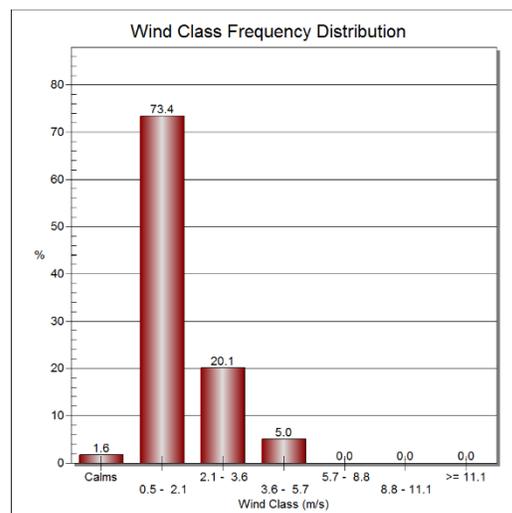
Abril



Julio

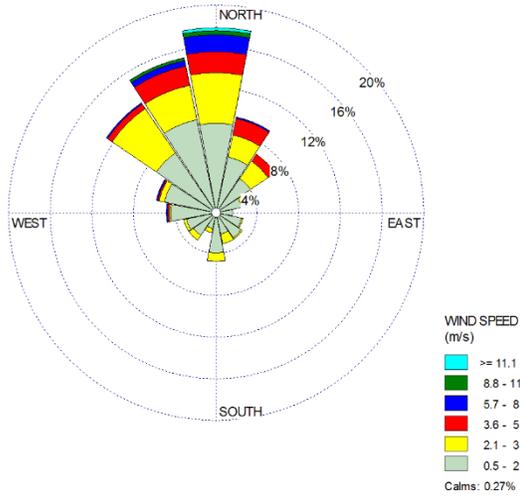


Octubre

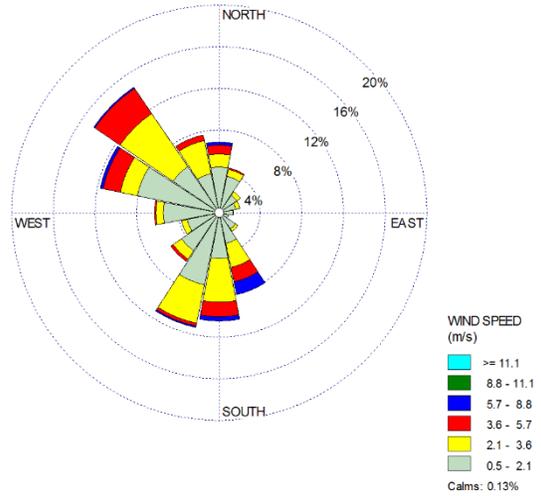


Rosas de Vientos

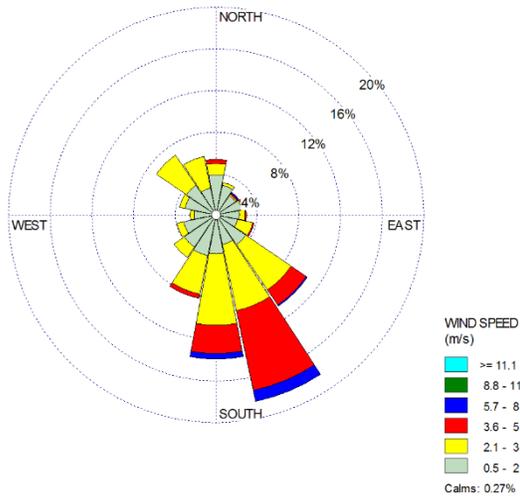
Enero



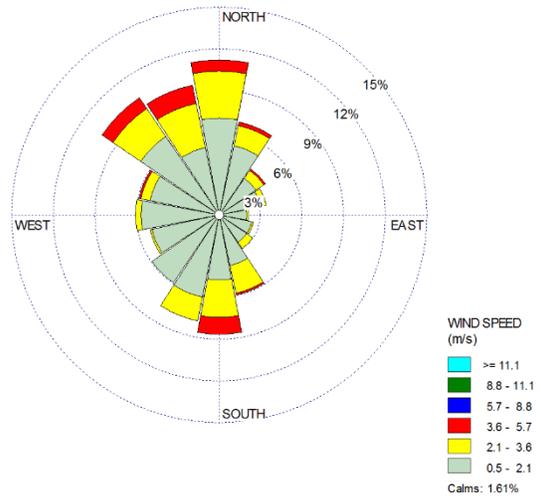
Abril



Julio

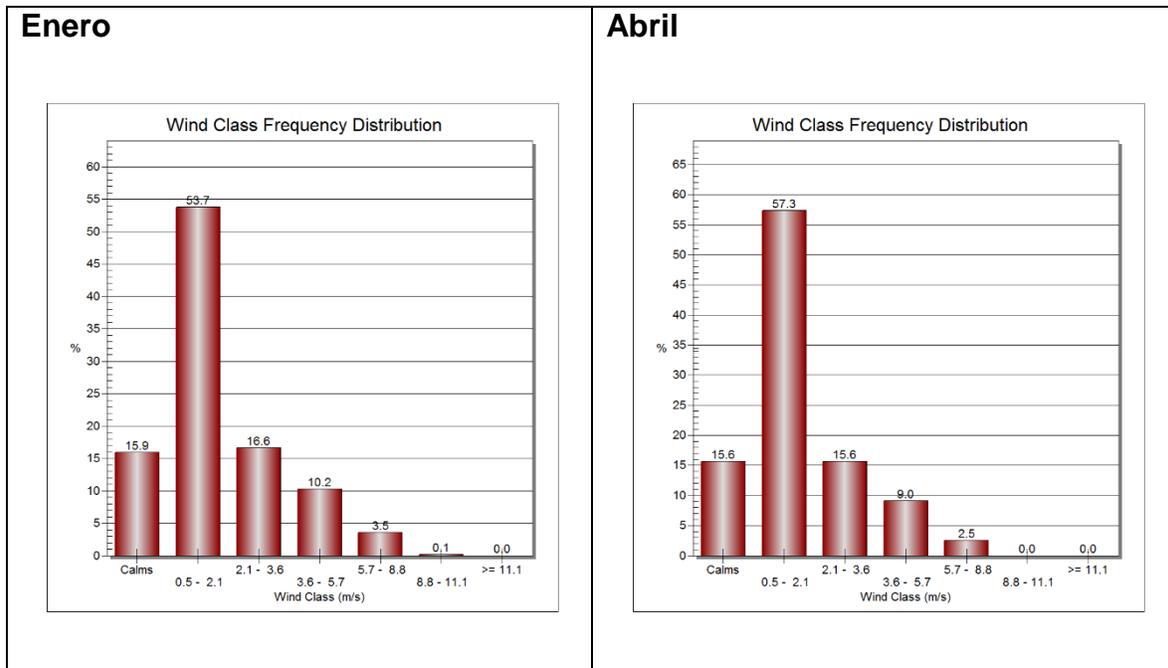


Octubre



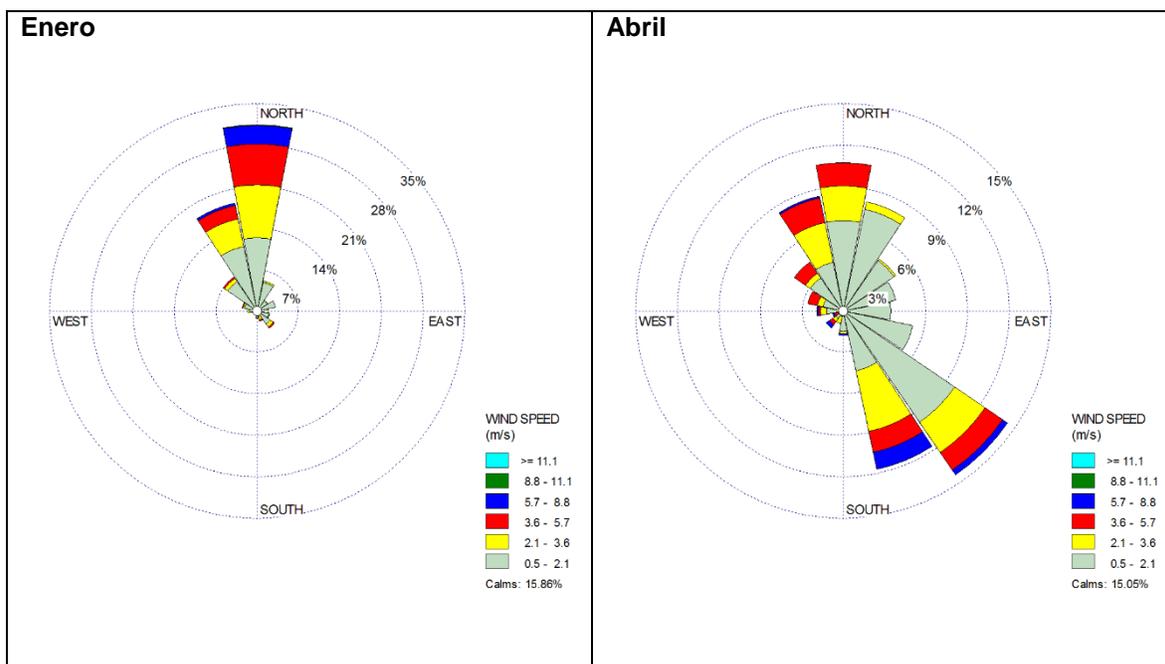
Estación Zacatecas

Histograma de frecuencias



**Datos del mes de junio al mes de diciembre no disponibles.*

Rosas de vientos

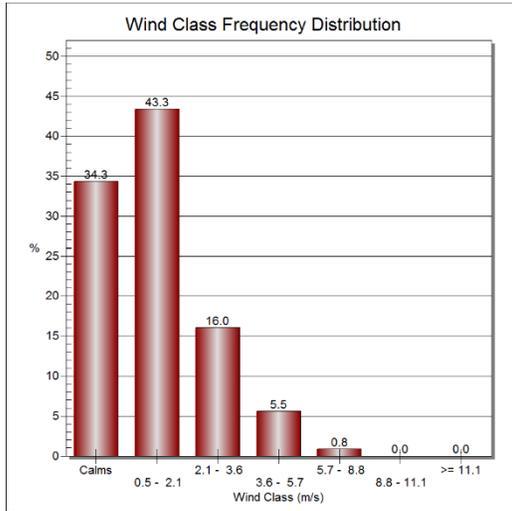


**Datos del mes de junio al mes de diciembre no disponibles.*

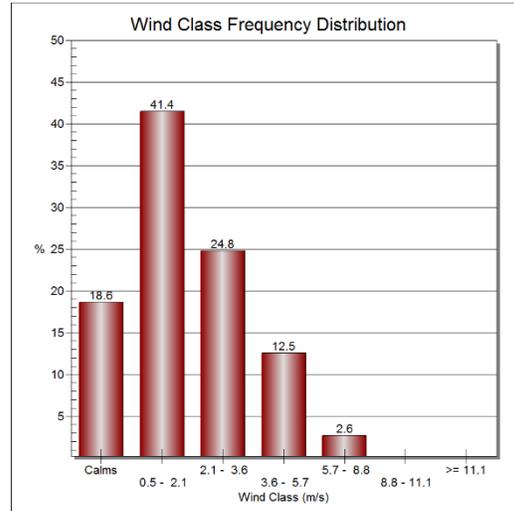
Estación Nuevo León

Histogramas de frecuencia

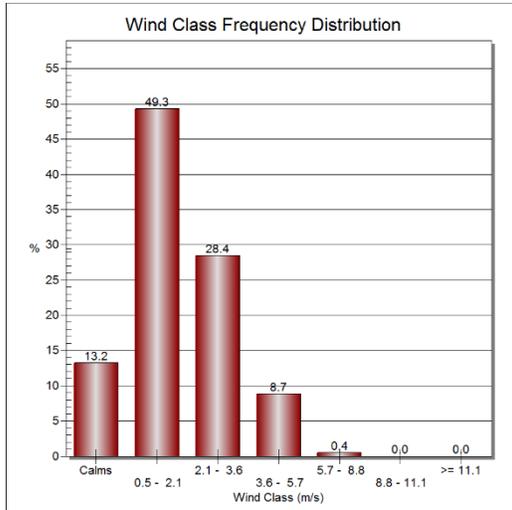
Enero



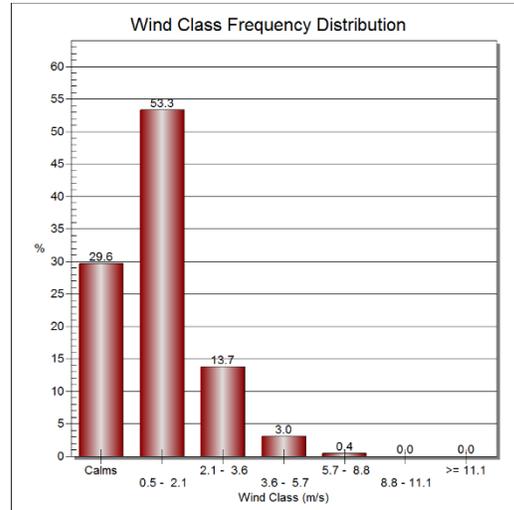
Abril



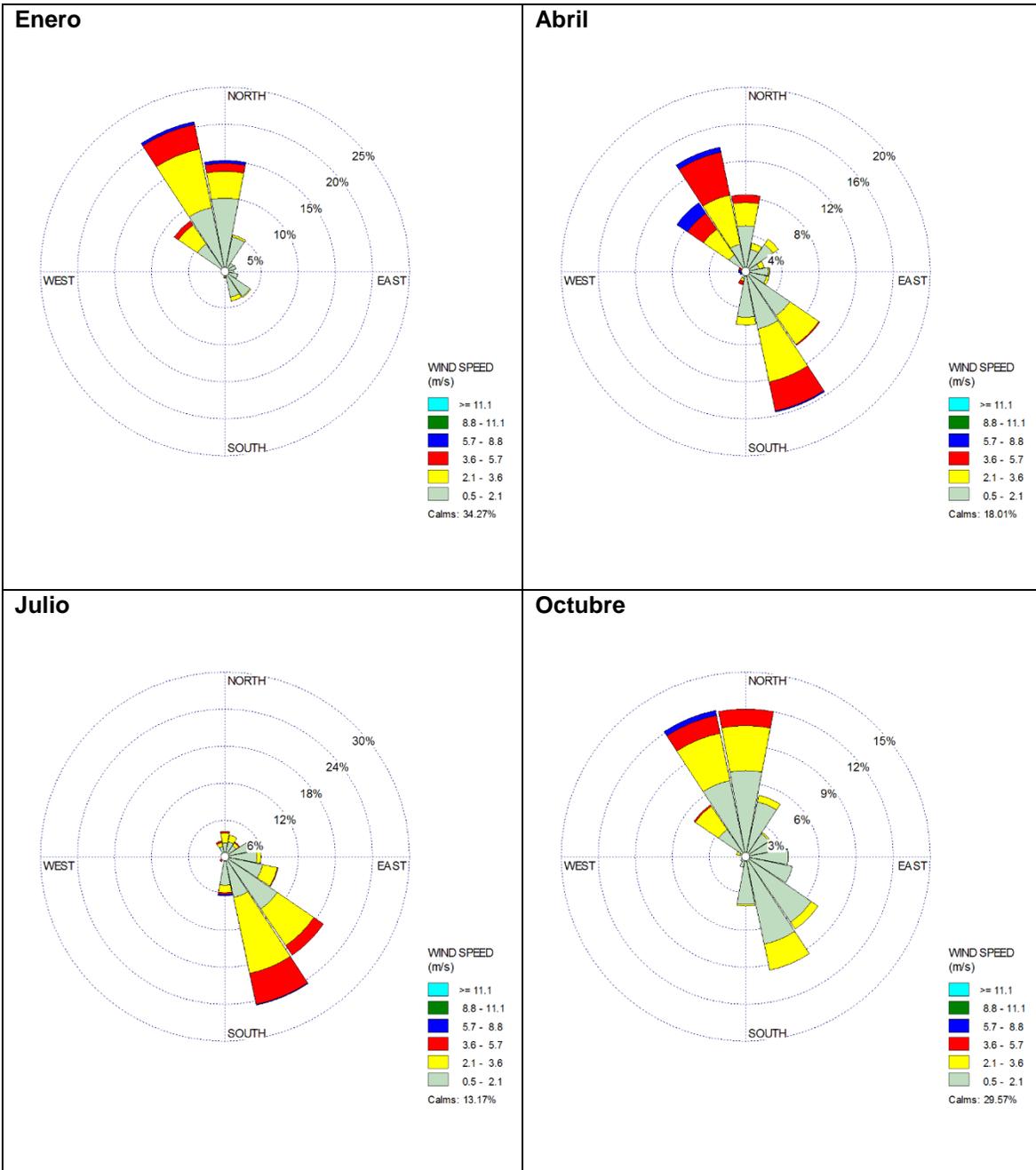
Julio



Octubre



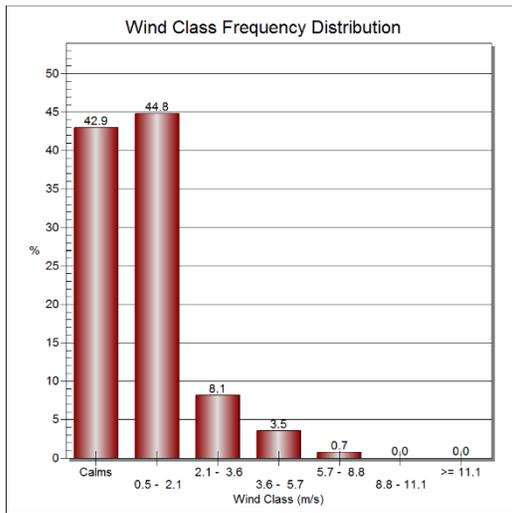
Rosas de vientos



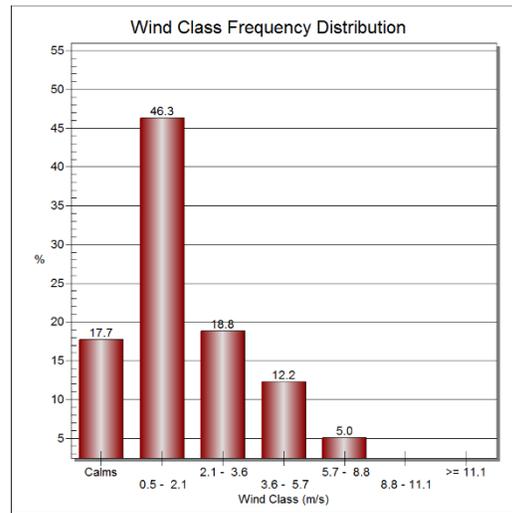
Estación Mexicali

Histogramas de frecuencia

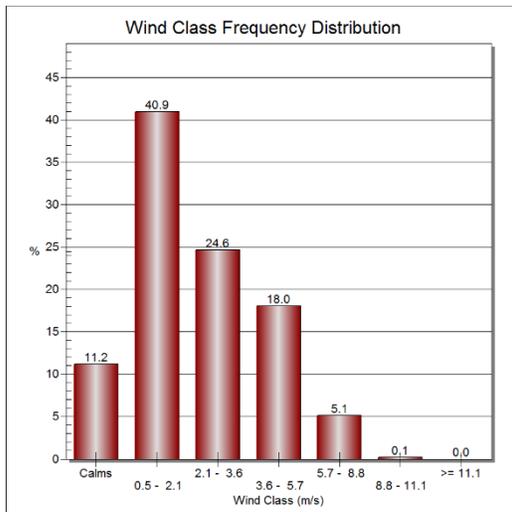
Enero



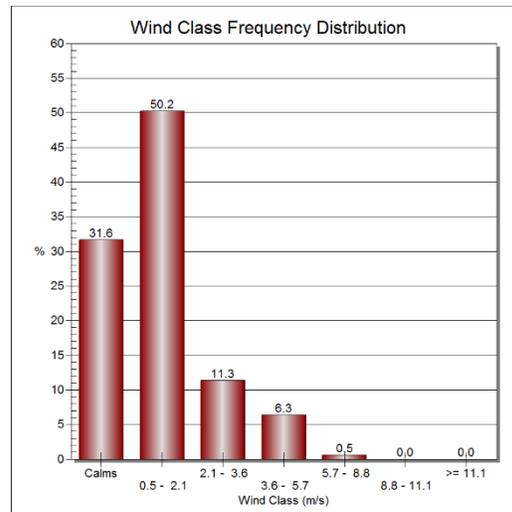
Abril



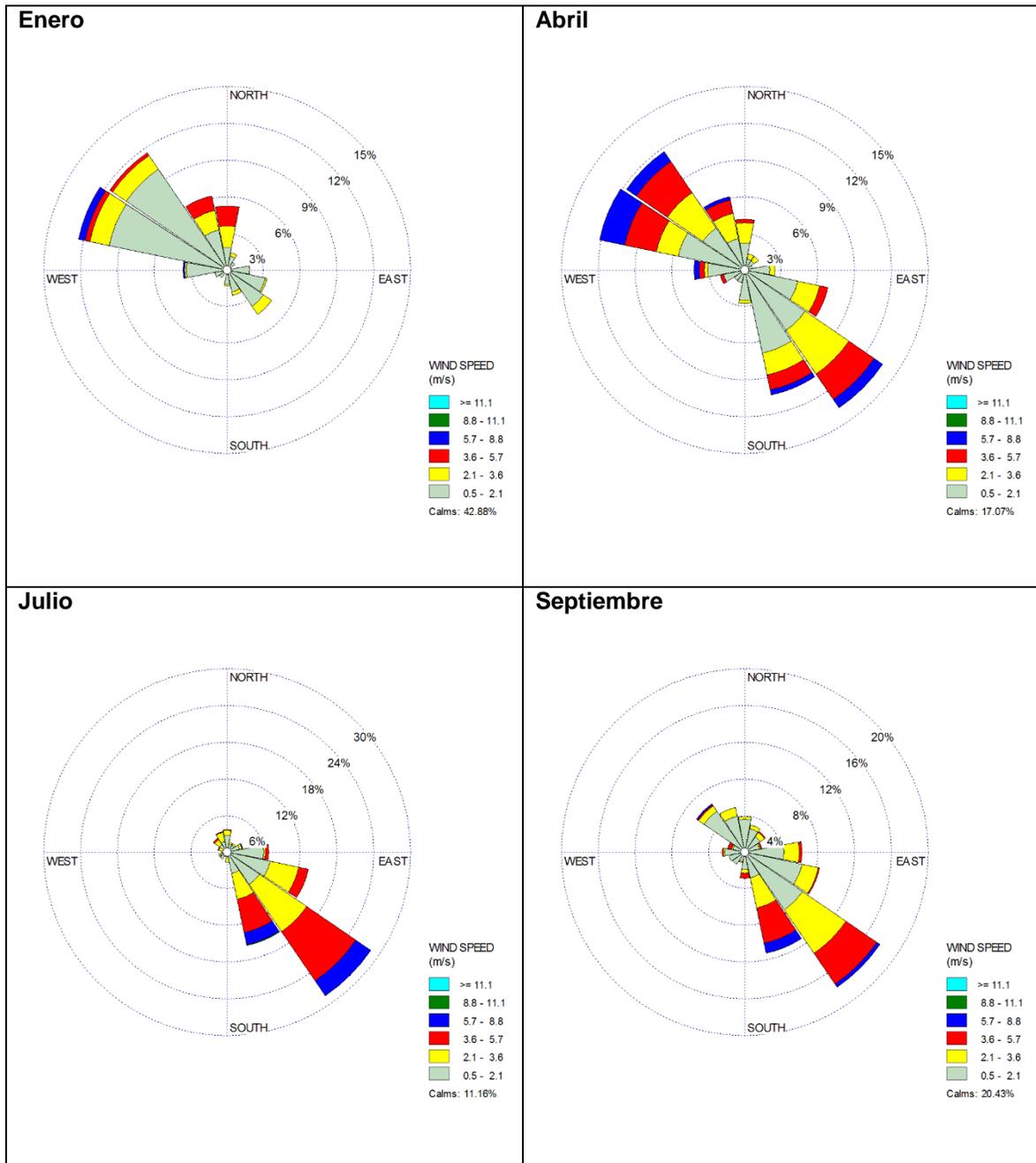
Julio



Octubre



Rosas de vientos



*Datos disponibles hasta el mes de septiembre.

VII. REFERENCIAS

Wind Energy Explained

J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers.

Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería. UNAM.

“Eólica de Baja Potencia”

Abraham Zepeda González.

Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista. UNAM.

“Generación de Energía Eléctrica a través de la fuerza del viento”

César Gutiérrez.

Energía Eólica Práctica.

Wind Energy Basics, Chelsea Green Publishing Company, USA 1999.

Paul Gipe.

Ingeniería de la Energía Eólica. NUEVAS ENERGÍAS.

Alfaomega Grupo Editor, México, mayo 2013.

Miguel Villarrubia López.

Guía del Instalador de Energía Eólica

Creaciones Copyright, S. L. 2010.

Tomás Perales Benito.

www.simarbc.gob.mx