Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Física

Ciclo diurno y ciclo anual de los vientos superficiales observados en la zona central oeste del Valle del Mantaro, Perú

TESIS

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Jesús Cristian CCASANI GUILLÉN

ASESORES

Dr. Pablo Cirilo ENRÍQUEZ LAGOS

Mg. Octavio FASHÉ RAYMUNDO (Co-asesor)

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ccasani, J. (2019). *Ciclo diurno y ciclo anual de los vientos superficiales observados en la zona central oeste del Valle del Mantaro, Perú*. Tesis para optar el título profesional de Licenciado en Física. Escuela Profesional de Física, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Hoja de metadatos complementarios

Código ORCID del autor: **Ninguno**

Código ORCID de los asesores:

0000 - 0002 - 6935 - 9009 (Asesor)

0000 - 0002 - 6743 - 7800 (Co-Asesor)

DNI del autor: **48453664**

Grupo de investigación: **Ninguno**

Institución que financia parcial o totalmente la investigación: **Ninguna**

Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación. Debe incluir localidades y coordenadas geográficas:

Facultad de ciencias Físicas, UNMSM, Lima, Perú

Latitud: -12.060016 Longitud: -77.081652

Año o rango de años que la investigación abarcó: **2018 - 2019**

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 16:00 horas del viernes 16 de agosto del 2019, en el Salón de Grados de la Unidad de Posgrado (304), bajo la Presidencia del Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe (Presidente), Lic. José Carlos Eche Llenque (Miembro), Dr. Pablo Cirilo Enríquez Lagos (Asesor), Mg. Octavio Fashé Raymundo (Co-Asesor) y, el Lic. Arnulfo Guillen Guevara (Suplente), se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para la Licenciatura en Física, mediante la Modalidad M1, del Bachiller:

CCASANI GUILLÉN, JESÚS CRISTIAN

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invitó al Bachiller Ccasani Guillén, Jesús Cristian a realizar una exposición de Trabajo de Tesis titulada: "Ciclo diurno y ciclo anual de los vientos superficiales observados en la zona central oeste del valle del Mantaro, Perú".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado el Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe, invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión, para dar lectura al resultado de la deliberación. Ha obtenido la calificación de:

Muy bueno	18	dieciocho
(MENCIÓN)	(NÚMERO)	(LETRAS)

Finalmente, el Presidente del Jurado, propone al consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al Bachiller Ccasani Guillén, Jesús Cristian. Siendo las 17:45 Horas, se levanta la Sesión.

Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe
PRESIDENTE

Lic. José Carlos Eche Llenque
MIEMBRO

Dr. Pablo Cirilo Enríquez Lagos
ASESOR

Mg. Octavio Fashé Raymundo
CO-ASESOR

Lic. Arnulfo Guillen Guevara
SUPLENTE

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico:

Al Dios Altísimo, Creador del cielo, de la tierra y de todas las leyes físicas que gobiernan el universo; porque al Dios Altísimo, que es mi Dios personal, le debo mi vida, lo que tengo lo que soy y esta profesión que ¡estoy adquiriendo!

A mi madre, porque ella no ha medido esfuerzos para encaminarme, apoyarme e impulsarme a que yo culmine mi carrera con gran éxito y logre ser un gran profesional.

Agradecimientos

Por eso, agradezco primeramente a Dios, que hasta aquí él me ha ayudado; y que con su ayuda he podido culminar este estudio, con el que presento mi tesis de licenciatura.

Agradezco a mi asesor de tesis, Dr. Pablo Lagos Enríquez (UNMSM), por su paciencia, dedicación y apoyo incondicional para la realización de esta tesis de licenciatura; y por haberme enriquecido con sus conocimientos y con las experiencias que ha obtenido a lo largo de su trayectoria en el campo de la investigación, a fin de convertirme en un profesional competente.

Agradezco de todo corazón a mi madre "Julia Martha Guillén Segovia", por su entrega, motivación, amor fuerza y empuje que ella me ha dado para lograr la meta de culminar esta tesis, y así poder hacerme un profesional de éxito.

¡"Querida madre" muchas gracias por todo lo que has hecho y sigues haciendo por mí!

Y un agradecimiento especial a mi hermana Pilar, quien sin ser familia de sangre, estuvo siempre presente, motivándome y acompañándome en oración en tiempos malos y buenos.

¡Gracias hermana Pilar!

Ciclo diurno y ciclo anual de los vientos superficiales observados en la zona central oeste del Valle del Mantaro, Perú

Diurnal and anual cycle of surface wind observed in the central west of Mantaro Valley, Peru

RESUMEN

En el presente estudio se analiza los datos de vientos superficiales registrados cada 10 minutos en una estación automática con una torre de 10 metros de altura en el Observatorio de Huancayo, del Instituto Geofísico del Perú, con el propósito de documentar y entender el mecanismo de forzamiento y las características de la variación diurna y anual de los vientos en la región central occidental del valle del rio Mantaro. El análisis se realiza separadamente del vector viento, de la intensidad y de las componentes zonal y meridional del vector viento. Se calcula y se caracteriza el ciclo diurno, la variabilidad interdiaria, el ciclo anual y la variabilidad interanual de los vientos.

Se generan gráficos de la rosa de vientos utilizando datos horarios, diarios y mensuales para conocer la variabilidad y frecuencia de ocurrencia de la dirección de los vientos en escalas de tiempo horario, diario y mensual, así como identificar la dirección predominante de los vientos de mesoescala y de escala sinóptica. Los resultados indican la existencia y bien definida del ciclo diurno y anual de los vientos que son forzados principalmente por la variación diurna y anual de la radiación solar y la presencia de efectos topográficos como las brisas de montaña y valle.

Las variaciones temporales del viento incluyen escalas de tiempo de horas procedentes del NE en la noche y procedente del SO en el día forzados por factores topográficos locales, y variaciones temporales de escalas de tiempo de días a meses que están relacionados con los vientos de escala espacial regional procedentes preferentemente del SE.

La máxima velocidad del viento ocurre a las 2 pm, con dirección de S a N y la mínima-calma ocurre a las 7 am. La dirección del viento de NE a SO cambia a la dirección de SO a NE entre las 6 am y 8 am. En el ciclo anual los vientos más intensos ocurre en los meses de julio a septiembre con dirección SE a NO.

Adicionalmente, se realizó una evaluación del potencial eólico utilizando los datos horarios del viento superficial extrapolados a 98 m de altura, para el año 2009, para su uso en la generación de energía eléctrica en la localidad del Observatorio de Huancayo.

ABSTRACT

In the present study, the surface winds data registered every 10 minutes in an automatic station with a tower of 10 meters high in the Observatory of Huancayo, of the Geophysical Institute of Peru, is analyzed in order to document and understand the mechanism of forcing and the characteristics of the diurnal and annual variation of the winds in the west central region of the Mantaro river valley. The analysis is carried out separately, the wind vector, the intensity and the zonal and meridional components of the wind vector. The diurnal cycle, the inter-daily variability, the annual cycle and the interannual variability of the winds are calculated and characterized.

Graphs of the wind rose are generated using hourly, daily and monthly data to know the variability and frequency of occurrence of the direction of the winds, in hourly, daily and monthly time scales, as well as to identify the predominant direction of the mesoscale and synoptic scale winds. The results indicate the existence and well defined diurnal and annual cycle of winds that are forced mainly by the diurnal and annual variation of solar radiation and the presence of topographic effects such as mountain and valley breezes.

Temporal variations of the wind include time scales of hours that flow from the NE at night and from the SO in the day, forced by local topographic factors, and temporal variation of time scales from days to months that are related to regional space scale winds, flowing preferably from the SE.

The maximum wind speed occurs at 2 pm, with direction from S to N and minimum-calm wind speed occurs at 7 am. The wind direction NE to SO change to wind direction SO to NE between 6 am and 8 am. In the annual cycle the most intense winds occur in the months of July to September with SE to NO direction.

Additionally, an evaluation of the wind potential was carried out using hourly surface wind data extrapolated to 98 m height, for the year 2009, for its use in the generation of electric power in the Huancayo Observatory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación del observatorio de Huancayo.
Fuente: Google Earth. 30

Figura 2.1 Representación esquemática de las brisas de valle y de montaña. Fuente: (https://www.tiempo.com/noticias/divulgacion/brisas-los-vientos-que-te-refrescan.html) 32

Figura 2.2. Circulación global de la atmosfera.

Fuente: http://meteo.maicas.net/articulos/circula.html 34

Figura 2.3. Componente zonal y meridional del viento en el plano horizontal.
Fuente: http://www.silviaalonsoperez.com/2014/06/direccion-y-velocidad-del-viento-con-componentes-meridional-y-zonal/ 35

Figura 2.4. Efectos de la intensidad de los vientos en el oleaje del mar según la escala de Beafurt.

Fuente: https://www.meteorologiaenred.com/escala-beaufort.html. 39

Figura 2.5. Rosa de los vientos.
Fuente: https://diccionario-nautico.com.ar/rosa-de-los-vientos/ 41

Figura 2.6. Esquema simplificado de la interpretación de la rosa de vientos. 41

Figura 4.1a.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 1-15 del mes de febrero del año 2005. 51

Figura 4.1b.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 16-28 del mes de Febrero del año 2005. 52

Figura 4.1c.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 1-15 del mes de Abril del año 2005. 52

Figura 4.1d.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 16-30 del mes de Abril del año 2005. 52

Figura 4.1e.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 1-15 del mes de Agosto del año 2005. 53

Figura 4.1f.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 16-31 del mes de Agosto del año 2005. 53

Figura 4.1g.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 1-15 del mes de Noviembre del año 2005. 53

Figura 4.1h.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 16-30 del mes de Noviembre del año 2005. 54

Figura 4.2a.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de febrero del año 2005. 54

Figura 4.2b.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de abril del año 2005. 55

Figura 4.2c.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de agosto del año 2005. 55

Figura 4.2d.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de noviembre del año 2005. 55

Figura 4.3a.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) del vector viento para el mes de febrero del año 2005. 56

Figura 4.3b.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) del vector viento para el mes de abril del año 2005. 56

Figura 4.3c.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) del vector viento para el mes de agosto del año 2005. 57

Figura 4.3d.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) del vector viento para el mes de noviembre del año 2005. 57

Figura 4.4a.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente meridional (V) del vector viento para el mes de febrero de año 2005. 58

Figura 4.4b.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente meridional (V) del vector viento para el mes de abril de año 2005. 58

Figura 4.4c.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente meridional (V) del vector viento para el mes de agosto de año 2005. 58

Figura 4.4d.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente meridional (V) del vector viento para el mes de noviembre del año 2005. 59

Figura 4.5.- Gráfica del resultado del cálculo del ciclo diurno - promedio multidiario y multianual de datos horarios del vector viento. 59

Figura 4.6.- Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo diurno - promedio multidiario y multianual de datos horarios de la magnitud del vector viento. 60

Figura 4.7.- Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo diurno - promedio multidiario y multianual de datos horarios de la componente zonal (U). 60

Figura 4.8.- Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo diurno - promedio multidiario y multianual de datos horarios de la componente meridional. 61

Figura 4.9.- Sectorización de la distribución horaria del ciclo diurno. 62

Figura 4.10a.- Suavizado de la figura 4.2a de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud del vector viento para el mes de febrero del año 2005. 64

Figura 4.10b.- Suavizado de la figura 4.3a de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente zonal del vector viento para el mes de febrero del año 2005. 64

Figura 4.10c.- Suavizado de la figura 4.4a de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente meridional del vector viento para el mes de febrero del año 2005. 65

Figura 4.11a.- Suavizado de la figura 4.2b de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud del vector viento para el mes de abril del año 2005. 65

Figura 4.11b.- Suavizado de la figura 4.3b de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente zonal del vector viento para el mes de abril del año 2005. 66

Figura 4.11c.- Suavizado de la figura 4.4b de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente meridional del vector viento para el mes de abril del año 2005. 66

Figura 4.12a.- Suavizado de la figura 4.2c de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud del vector viento para el mes de agosto del año 2005. 66

Figura 4.12b.- Suavizado de la figura 4.3c de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente zonal del vector viento para el mes de agosto del año 2005. 67

Figura 4.12c.- Suavizado de la figura 4.4c de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente meridional del vector viento durante el mes de agosto de 2005. 67

Figura 4.13a.- Suavizado de la figura 4.2d de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud del vector viento para el mes de noviembre del año 2005. 67

Figura 4.13b.- Suavizado de la figura 4.3d de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente zonal del vector viento para el mes de noviembre del año 2005. 68

Figura 4.13c.- Suavizado de la figura 4.4d de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente meridional del vector viento durante el mes de noviembre de 2005. 68

Figura 4.14 - Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo anual del vector viento, iniciando con el mes de enero. 70

Figura 4.15.- Grafica que muestra el resultado del cálculo del ciclo anual de la magnitud del vector viento. 70

Figura 4.16.- Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo anual de la componente zonal (U) del vector viento. 71

Figura 4.17.- Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo anual de la componente meridional (V) del vector viento. 71

Figura 4.18a.- Gráfica que muestra la serie temporal de los datos promedios diarios de la magnitud del vector viento para el periodo 2000 – 2010. 72

Figura 4.18b- Grafica del suavizado de la figura 4.18a 73

Figura 4.19a.- Gráfica que muestra la serie temporal de los datos promedios diarios de la componente zonal (U) del vector viento para el periodo 2000 – 2010. 73

Figura 4.19b.- Grafica del suavizado de la figura 4.19a 74

Figura 4.20a.- Gráfica que muestra la serie temporal de los datos promedios diarios de la componente meridional (V) del vector viento para el periodo 2000 – 2010. 74

Figura 4.20b Grafica del suavizado de la figura 4.20a 75

Figura 4.21a.- Gráfica que muestra la variabilidad interanual de la variación anual de la intensidad y dirección del viento para los años 2000-2005. 75

Figura 4.21b.- Gráfica que muestra la variabilidad interanual de la variación anual de la intensidad y dirección del viento para los años 2006-2010. 76

Figura 4.22.- Grafica que muestra las anomalías de la magnitud del vector viento. 77

Figura 4.23.- Gráfica que muestra las anomalías de la componente zonal del vector viento. 77

Figura 4.24.- Gráfica que muestra las anomalías de la componente meridional del vector viento. 78

Figura 4.25a.- Gráfico que muestra el resultado de la rosa de vientos utilizando los datos horarios de todo el periodo de registro de la madrugada en el rango de 00:00 – 07:00. 79

Figura 4.25b.- Gráfico que muestra el resultado de la rosa de vientos utilizando los datos horarios de todo el periodo de registro de la madrugada en el rango de 08:00 – 11:00. 79

Figura 4.25c.- Gráfico que muestra el resultado de la rosa de vientos utilizando los datos horarios de todo el periodo de registro de la madrugada en el rango de 12:00 – 17:00. 80

Figura 4.25d.- Gráfico que muestra el resultado de la rosa de vientos utilizando los datos horarios de todo el periodo de registro de la madrugada en el rango de 18:00 – 23:00. 80

Figura 4.25e.- Gráfico que muestra el resultado de la rosa de vientos utilizando los datos horarios de todo el periodo de registro para las 24 horas. 81

Figura 4.26a.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios horarios de los meses de verano. 82

Figura 4.26b.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios horarios de los meses de otoño. 82

Figura 4.26c.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios horarios de los meses de invierno. 83

Figura 4.26d.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios horarios de los meses de primavera. 83

Figura 4.27a.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios diarios de los meses de verano. 84

Figura 4.27b.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios diarios de los meses de otoño. 85

Figura 4.27c.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios diarios de los meses de invierno. 85

Figura 4.27d.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios diarios de los meses de primavera. 86

Figura 4.28a.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios mensuales de los meses de verano. 87

Figura 4.28b.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios mensuales de los meses de otoño. 87

Figura 4.28c.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios mensuales de los meses de invierno. 88

Figura 4.28d.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios mensuales de los meses de primavera. 88

Figura 4.29a.- Histograma de frecuencias, función de y sus respectivos parámetros de Weibull para la estación de verano del año 2009. 90

Figura 4.29b.- Histograma de frecuencias, función de Weibull y sus respectivos parámetros de Weibull para la estación de otoño del año 2009. 90

Figura 4.29c.- Histograma de frecuencias, función de Weibull y sus respectivos parámetros de Weibull para la estación de invierno del año 2009. 90

Figura 4.29d.- Histograma de frecuencias, función de Weibull y sus respectivos parámetros de Weibull para la estación de primavera del año 2009. 91

Figura 4.29e.- Histograma de frecuencias, función de Weibull y sus respectivos parámetros de Weibull para el año 2009. 91

Figura 4.30- Curva de potencia del aerogenerador E–82 / 2000 que permite calcular la energía (kw – h) que es capaz de producir la velocidad del viento (m/seg). 92

Figura 4.31a.- Distribución de la energía eléctrica generada por la velocidad del viento (m/seg), para la estación de verano del año 2009. 93

Figura 4.31b.- Distribución de la energía eléctrica generada por la velocidad del viento (m/seg), para la estación de otoño del año 2009. 93

Figura 4.31c.- Distribución de la energía eléctrica generada por la velocidad del viento (m/seg), para la estación de invierno del año 2009. 93

Figura 4.31d. Distribución de la energía eléctrica generada por la velocidad del viento (m/seg), para la estación de primavera del año 2009. 94

Figura 4.31e. Distribución de la energía eléctrica generada por la velocidad del viento (m/seg), para el año 2009. 94

Figura 4.32. Evaluación de la mediana del consumo eléctrico (KWh – mes). Fuente: ERCUE 2018. Elaboración: GPAE – Osinerming. 95

Figura 5.1. Comparación del ciclo diurno de los vientos zonales con el ciclo diurno de la radiación solar. 98

Figura 5.2. Comparación del ciclo diurno de los vientos meridionales con el ciclo diurno de la temperatura. 99

Figura 5.3 Banda de Convergencia Intertropical durante el verano boreal (rojo) y el verano austral (azul).

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Zona_de_convergencia_intertropical 100

Figura A.1 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Enero del año 2005. 103

Figura A.2 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Febrero del año 2005. 104

Figura A.3 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Marzo del año 2005. 104

Figura A.4 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Abril del año 2005. 105

Figura A.5 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Mayo del año 2005. 105

Figura A.6 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Junio del año 2005. 106

Figura A.7 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Julio del año 2005. 106

Figura A.8 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Agosto del año 2005. 107

Figura A.9. **S**erie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Setiembre del año 2005. 107

Figura A.10 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Octubre del año 2005. 108

Figura A.11 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Noviembre del año 2005. 108

Figura A.12 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Enero del año 2005. 109

Figura A.13 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Febrero del año 2005. 109

Figura A.14 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Marzo del año 2005. 109

Figura A.15 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Abril del año 2005. 110

Figura A.16 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Mayo del año 2005. 110

Figura A.17 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Junio del año 2005. 110

Figura A.18 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Julio del año 2005. 111

Figura A.20 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Agosto del año 2005. 111

Figura A.21 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Setiembre del año 2005. 111

Figura A.22 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Octubre del año 2005. 112

Figura A.23 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Noviembre del año 2005. 112

Figura A.24 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Enero del año 2005. 113

Figura A.25 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Febrero del año 2005. 114

Figura A.26 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Marzo del año 2005. 114

Figura A.27 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Abril del año 2005. 116

Figura A.28 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Mayo del año 2005. 115

Figura A.29 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Junio del año 2005. 116

Figura A.30 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Julio del año 2005. 116

Figura A.31 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Agosto del año 2005. 117

Figura A.32 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Setiembre del año 2005. 117

Figura A.33 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Octubre del año 2005. 118

Figura A.34 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Noviembre del año 2005. 118

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación geográfica de la estación meteorológica de Huancayo. 30

Tabla 2. Escala de Beafurt. Fuente: https://sites.google.com/site/lanavegacionyelmar/home/navegacion/meteorologia. 38

Tabla 3. Muestra las 16 direcciones cardinales que parten desde el Norte con 0º y continua en sentido horario. 40

Tabla 4. Distribución horaria de la madrugada, mañana, tarde y noche. 62

Tabla 5. Resumen de la dirección de los vientos predominantes observados en las Rosas de Vientos para el periodo de las 24 horas del ciclo diurno. 81

Tabla 6. Resumen de la dirección de los vientos predominantes observados en las Rosas de Vientos utilizando promedios horarios para las 4 estaciones del año. 84

Tabla 7. Resumen de la dirección de los vientos predominantes observados en las Rosas de Vientos utilizando promedios diarios para las 4 estaciones del año. 86

Tabla 8. Resumen de la dirección de los vientos predominantes observados en las Rosas de Vientos utilizando promedios mensuales para las 4 estaciones del año. 89

Tabla 9. Parámetros de la distribución Weibull para cada estación del año 2009. 91

Tabla 10. Energía eléctrica generada (kw-h) para cada estación del año y para el total del año 2009. 96

ÍNDICE GENERAL

Resumen……..... 4

Lista de Figuras……..…….. 7

Lista de Tablas…….…..…. 19

Capítulo 1 Introducción.……..... 25

1.1 Antecedentes……... 27

1.2 Objetivo...…….……...…..... 29

1.2.1 Objetivo general……..... 29

1.2.2 Objetivos específicos…….……..…. 29

1.3 Zona de estudio…….....… 30

1.3.1 Observatorio de Huancayo.…….…..... 30

Capítulo 2 Marco Teórico…..…….…..... 31

2.1 Los Vientos……..... 31

2.2 Brisa de montaña y de valle……...… 32

2.3 Circulación global de la atmosfera……. 33

2.4 El vector viento y sus componentes escalares……...……. 34

2.5 Componente zonal (U) y meridional (V)……...……. 35

2.5.1 Componente zonal (U)……..……. 35

2.5.2 Componente meridional (V)…….....… 35

2.6 Viento promedio – cálculo vectorial……..... 36

2.7 Escala de Beafurt……..…… 37

2.8 Rosa de vientos…….….. 39

2.9 Evaluación del potencial eólico……...……..……. 42

Capítulo 3 Metodología……..…….. 45

3.1 Data…….....…. 45

3.2 Procesamiento de los datos……....…….… 45

3.2.1 Control de calidad…...……..…. 46

3.2.2 Descomposición de los datos vectoriales de velocidad y dirección en sus componentes escalares…….……..……... 46

3.3 Cálculo de las medias horarias……..… 46

3.4 Cálculo de las medias diarias...……...……. 47

3.5 Cálculo de las medias mensuales……...…..……. 47

3.6 Ciclo diurno del vector viento, de la magnitud, de la componente zonal y meridional.....…….…….. 47

3.7 Variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud, componente zonal meridional del vector viento……...…... 48

3.8 Ciclo anual del vector viento, de la magnitud, de la componente zonal y meridional……..……..…..…..... 48

3.9 Variabilidad interanual de la magnitud, de la componente zonal y meridional del vector viento……..…….…..... 49

3.10 Anomalías de la magnitud, componente zonal y meridional del vector viento..... 49

3.11 Rosa de vientos……..……..…….. 49

Capítulo 4 Resultados y discusión……..……..... 51

4.1 Presentación grafica de los cálculos de los datos horarios……..……....….…..... 51

4.2 Ciclo diurno del vector viento, de la magnitud, de la componente zonal y meridional.....……..…….…..... 59

4.3 Variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud, componente zonal meridional del vector viento……..... 63

4.4 Ciclo anual del vector viento, de la magnitud, de la componente zonal y meridional……...…..... 69

4.5 Variabilidad interanual de la magnitud, de la componente zonal y meridional del vector viento……..…...…. 72

4.6 Anomalías de la magnitud, componente zonal y meridional del vector viento..... 77

4.7 Rosa de vientos……...……..…..….. 78

4.7.1 Rosa de vientos del ciclo diurno……..……..... 78

4.7.2 Rosa de vientos del ciclo estacional utilizando promedios horarios…….....… 82

4.7.3 Rosa de vientos del ciclo estacional utilizando promedios diarios…….. 84

4.7.4 Rosa de vientos del ciclo estacional utilizando los promedios mensuales…..... 87

4.8 Evaluación del potencial eólico……...…….……...…...…… 89

4.8.1 Histogramas de frecuencia y función de Weibull…….....…..…. 91

4.8.2 Curva de potencia del aerogenerador…….....…… 92

4.8.3 Distribución de energía eléctrica generada……...……....… 93

4.8.4 Potencial uso de la energía eléctrica generada en viviendas…… 94

Capítulo 5 Conclusiones……..……...… 97

5.1 Ciclo diurno……...……..……....…..… 97

5.2 Ciclo anual..……...…….....……..99

5.3 Rosa de vientos……...…….....….101

5.4 Generación de energía eólica…….....…… 102

Anexos……..……...…..…… 103

A.1 Velocidad y dirección del vector viento – año 2005……..…..… 103

A.2 Magnitud del vector viento – año 2005…….....…...…. 109

A.3 Componente zonal y meridional del vector viento – año 2005……...…..... 113

Referencias……..... 119

Capítulo 1

Introducción

El Perú, situado en la región tropical del planeta tierra, tiene una topografía compleja por la presencia de la cordillera de los Andes, una cadena de montañas que se ubica paralelo al litoral del país, de sur a norte, que tiene a su izquierda (oeste) la costa y a su derecha (este) la selva Amazónica. El clima de la costa es húmeda y sin lluvias, el de la selva es húmedo y lluvioso y el de la cordillera de los Andes y en los valles interandinos es seco y con lluvia estacional.

El estudio del clima en la cordillera de los Andes y en los valles interandinos que se describe caracterizando la temperatura, las lluvias, presión, humedad relativa y los vientos, es prioritario por los impactos negativos en los ecosistemas naturales que son vulnerables a los efectos del clima y recientemente ya se conoce que las montañas son aún más vulnerables al cambio climático (IPCC, 2014). Sin embargo los estudios climáticos en la región andina continua siendo muy limitados (escasos). Los pocos estudios climáticos que se han realizado en la región andina se limitan al análisis de la temperatura del aire y de las precipitaciones por su utilidad en los principales sectores socioeconómicos, mientras que el análisis de los datos de vientos es casi inexistente, debido a las limitaciones en la disponibilidad de instrumentales para las mediciones con precisión de la velocidad y dirección de los vientos en las estaciones meteorológicas. Además, en las estaciones meteorológicas se registran los datos climáticos solo tres veces al día, a las 07:00, 13:00 y 19:00 horas. Con estos datos no se pueden realizar estudios del ciclo diurno. Recién en los últimos veinte años, aproximadamente, se están utilizando estaciones automáticas con nuevos instrumentos para la medición de las variables meteorológicas con mayor precisión y resolución temporal.

La física y dinámica de la atmosfera trata de conocer los procesos físicos y dinámicos que ocurren en la atmosferas. Estos procesos están relacionados con las variaciones de la temperatura, la precipitación, la presión, la humedad relativa, la evaporación, los vientos y la radiación solar. Estas variaciones en escala de tiempo de horas y días son manifestaciones del estado del tiempo y variaciones en escala de tiempo de meses son manifestaciones del clima.

En los estudios de la meteorología y climatología, las variables que más se estudian son la temperatura y la precipitación, porque son las variables que más influyen en las actividades humanas como ya se indicó. Sin embargo, los vientos que se encargan de desplazar las masas de aire de un lugar a otro, también son importantes. El movimiento del aire son manifestaciones del viento que se encargan del intercambio del calor, de la cantidad de movimiento y de la masa, horizontalmente y verticalmente en la atmosfera. Los vientos también se encargan de la dispersión y transporte de masas de aire con determinadas características de polución y determinando la calidad del ambiente.

El viento esta forzado principalmente por el gradiente de la presión atmosférica, por la fuerza de Coriólis, la gravedad y la fricción, según la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento. El gradiente de presión está relacionado con el gradiente térmico que se generan por la diferencia de la radiación solar que recibe la atmosfera durante el día y nada durante la noche. También el gradiente térmico se origina por la variación anual de la radiación solar más se observa vientos verticales que están asociados con los procesos de convección, debido al acercamiento y alejamiento de la tierra con respecto al sol y debido al desigual calentamiento de la tierra y la atmósfera por la radiación solar, más caliente en las regiones ecuatoriales y más frio en las regiones polares, a nivel global.

El viento es un vector y está definido por su magnitud o intensidad y su dirección. La dirección del viento depende de la distribución y evolución de los centros Isobáricos, se desplaza de los centros de alta presión (anticiclones) hacia los de baja presión (depresiones) y su velocidad depende de las diferentes fuerzas que actúan sobre la masa de aire en escala local. En escala regional y global, el viento es alterado por la fuerza de Coriólis debido a la rotación de la Tierra.

En este trabajo se analiza los datos de vientos superficiales registrados cada 10 minutos en una estación automática de marca Campbell instalado a una altura de 10 m sobre el suelo en el Observatorio de Huancayo del Instituto Geofísico del Perú, ubicado en la región central occidental del valle del rio Mantaro, desde enero de 2000 hasta diciembre de 2010.

Los datos de las mediciones de los vientos como vector incluyen la velocidad o amplitud y la dirección. En primer lugar el análisis de los datos de vientos se realiza considerando como una variable vectorial, preparándose gráficos de la variación temporal. Los gráficos incluyen

una secuencia de vectores, un vector para cada promedio horario, para cada promedio diario y para cada promedio mensual para todo el periodo de registro. En segundo lugar se estratifica los vectores cada 24 horas y se calcula el promedio vectorial multianual para cada hora, 24 valores (vectores). El resultado representa el ciclo diurno como un promedio vectorial multianual. Similarmente se calcula los promedios diarios de cada 24 vectores horarios y luego se calcula los promedios mensuales de cada 30 vectores diarios. Seguidamente se estratifica los vectores mensuales para cada año y se calcula el promedio vectorial para cada mes de todos los años. El resultado representa el ciclo estacional o anual vectorial.

El estudio consiste en determinar la variación temporal de la velocidad y dirección del viento con periodos de 24 horas y periodos de 12 meses y entender los mecanismos de forzamiento para caracterizar el ciclo diurno y el ciclo anual de los vientos superficiales. El análisis de los vientos vectoriales también se realizaron convirtiendo el vector en sus componentes escalares, componente zonal (este-oeste) y componente meridional (norte-sur). Para determinar el ciclo diurno y el ciclo anual de cada componente, se utilizó el mismo procedimiento que para los vientos vectoriales. El ciclo diurno se define como el promedio de todas las variaciones diurnas en el periodo de 2000-2010. Similarmente se define el ciclo anual como el promedio de todas las variaciones anuales.

Se incluye también los gráficos de la rosa de vientos utilizando los datos horarios para cuatro sectores del día, madrugada, mañana, tarde y noche, para visualizar los cambios de la dirección del viento durante el día. También se utilizaron los datos horarios, diarios y mensuales para generar gráficos que permitan visualizar los cambios de dirección del viento durante las cuatro estaciones del año.

Finalmente se incluye una evaluación del potencial de generación de energía eólico utilizando los datos horarios de vientos registrados en el Observatorio de Huancayo, para cada estación del año y para el total del año 2009.

1.1 Antecedentes

Muy pocos estudios se han realizado sobre la variación temporal de los vientos superficiales en la región de los Andes Peruanos. Esto se debe principalmente a la falta de estaciones meteorológicas y a la calidad de datos con resolución temporal que se requiere para el estudio de la variación diurna de los vientos. En las estaciones meteorológicas convencionales las

observaciones rutinarias se realizan tres veces a día, a las 7 am, 1pm y 7 pm. Con estos datos, el análisis del ciclo diurno es muy limitado, pero para el análisis estacional o ciclo anual si es muy útil.

Los datos de viento registrados 3 veces al día en 5 estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del rio Mantaro en el periodo de 2002 - 2008 fueron analizados por (Mamani, 2013). Se calcularon el ciclo diurno estacional multianual y el ciclo anual de la magnitud y la dirección del viento. Los principales resultados de este estudio para la estación meteorológica del Observatorio de Huancayo son:

Ciclo diurno. Para las 3 horas sinópticas del día. A las 07 horas la dirección predominante es del oeste (O). A las 13 horas la dirección predominante es del SE-E-NE. A 19 horas la dirección predominante es variable, pero con mayor predominancia es de SE. Los valores máximos de la intensidad del viento se observó en la estación de primavera.

Ciclo anual. Los datos máximos de la intensidad se observó en el mes de octubre.

Mamani y Silva (2010) realizaron un primer estudio del ciclo diurno del viento superficial utilizando los datos horarios registrados en la estación meteorológica automática del Observatorio de Huancayo en el periodo 2002 – 2008. Estos datos se agruparon en cuatro sectores del día, madrugada, mañana, tarde y noche y generaron gráficos de la rosa de vientos para los cuatro sectores del día y para las cuatro estaciones del año, verano, otoño, invierno y primavera. Sus resultados indican que entre las 0 y 7 horas los vientos son de dirección Noreste (NE), entre las 8 y 12 horas son predominante del Suroeste (SW), entre las 13-18 horas son de dirección Sureste (SE) y entre las 19 y 23 horas son predominantemente del Este (E). Sus resultados también indican que comportamiento diurno de la dirección de los vientos prácticamente no cambia de una estación del año a otra.

Los estudios previos sobre la variación diurna de las variables atmosféricas, como la temperatura, precipitación, presión atmosférica, vientos, nubosidad y flujos de radiación, han demostrado que el principal forzamiento es el ciclo diurno de la radiación solar (Dai and Deser 1999; Dai and Wang 1999; Dai 2001; Krishnamurti and Kishtawal 2000; Wang et al. 2004; Lin et al.2000). También han demostrado que la presencia de montañas, que generalmente tienen una distribución irregular, actúan como forzante local y regional de los vientos (Nesbitt and Zipser 2003; Yang and Slingo 2001).

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general del presente estudio es la caracterización temporal del ciclo diurno y ciclo anual del viento en la zona central oeste del valle del rio Mantaro para su potencial uso en la validación de modelos numéricos de la dinámica de la atmosfera, en la generación de la energía eólica y uso agrícola.

1.2.2 Objetivos específicos

- Documentar el mecanismo de forzamiento y las características de la variación diurna, variación interdiaria, variación anual y variación interanual de los vientos.

- Desarrollar subrutinas en ambiente de Matlab para generar y procesar series de tiempo con los datos horarios, diarios y mensuales de los vientos, considerando los vientos como vector y como componentes escalares de la intensidad y componentes zonal y meridional del viento.

- Generar los gráficos de rosa de vientos que permitan conocer los cambios de dirección y frecuencia de los vientos de mesoescala y de los vientos sinópticos durante las 24 horas del día y durante las cuatro estaciones del año.

- Explicar las características del comportamiento del viento en las dos escalas de tiempo, diurno y anual, y el papel que desempeña el forzamiento solar y los efectos de la topografía local en la generación de las brisas de montaña y de valle.

- Evaluar el potencial uso de la energía eólica en el Observatorio de Huancayo, considerando que el recurso eólico es una fuente de energía renovable y limpia que actualmente se encuentra en desarrollo debido a los incentivos gubernamentales para su aplicación.

1.3. Zona de estudio

1.3.1 Observatorio de Huancayo

La ubicación geográfica del Observatorio de Huancayo, véase figura 1.1, se encuentra en la parte central y oeste del valle del rio Mantaro y entre la cordillera central y occidente. Las coordenadas y periodo de registros se muestran en la Tabla 1

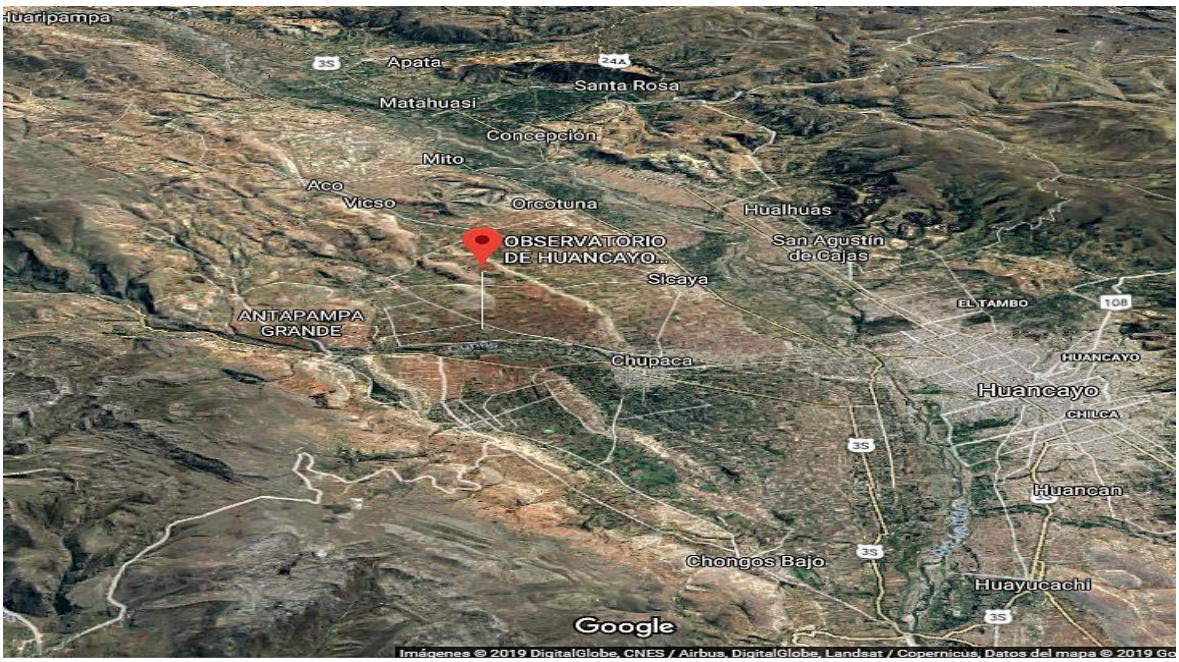

Figura 1.1. Ubicación del observatorio de Huancayo.

Fuente: Google Earth.

Tabla 1. Ubicación geográfica de la estación meteorológica de Huancayo.

Estación	**Departamento**	**Provincia**	**Distrito**	**Latitud (°S)**	**Longitud (°W)**	**Altitud (m.s.n.m)**
Huancayo	Junín	Chupaca	Huachac	12°02’18”	75°19’22”	3350

Capítulo 2

Marco teórico

El estudio del viento está asociado con el estudio del estado del tiempo y del clima en escala espacial local, regional y global. El viento es una de las variables más importante después de la temperatura y la precipitación, sobre todo cuando se trata del estudio de la atmosfera en movimiento. La variable viento está relacionado directamente con el campo del gradiente de presión e indirectamente con la variable de temperatura cuando se trata de analizar el comportamiento de la atmosfera en escala local y regional. En escala global el comportamiento del viento depende principalmente del campo de presión y de la fuerza de Coriólis. Estas relaciones están incluidas en el estudio de la dinámica de la atmosfera, que es el campo de la dinámica de fluidos geofísicos. El estudio de la dinámica de fluidos se basa en el principio de la conservación de la cantidad de movimiento o momento, la conservación de la masa y la conservación de la energía. En nuestro caso consideraremos únicamente el principio de la conservación de la cantidad de movimiento.

2.1 Los Vientos

Los vientos son masas de aire en desplazamiento horizontal y vertical causado por el gradiente de presión y temperatura. Los vientos fluyen de zonas de alta presión a zonas de baja presión, dando lugar al intercambio de masas de aire calientes y frías, mediante los procesos termodinámicos.

El viento se comporta como un vector, su magnitud es la velocidad del viento, que nos indica la intensidad con que desplaza el aire, y el ángulo que es la dirección en que se desplaza el viento. Los vientos en el transcurso de su movimiento son afectados por diferentes fuerzas, como la fuerza de fricción, la advección y la fuerza de Coriólis que es causado por la rotación de la tierra. También es afectado por factores topográficos del terreno que dan origen a las brisas de montaña y de valle.

En el presente estudio se describe brevemente las características de los vientos en escala local, regional y planetaria. Considerando que la ubicación del Observatorio de Huayao se

encuentra en la zona central oeste del valle del rio Mantaro y rodeado de montañas, describiremos las características de los vientos locales delimitada en un valle y rodeado de montañas que se denominan brisas de montaña y de valle.

2.2 Brisas de valle y montaña

Las brisas de montaña se originan en las laderas de las montañas. Durante el día, la radiación solar calienta las paredes del valle y las masas de aire en contacto con ellas adquiere menor densidad y ascienden con facilidad por la ladera de la montaña como un viento suave, a este viento local que sopla cuesta arriba se le denomina brisa de valle o viento anabático. Durante la noche, las masas de aire en contacto con la pendiente montañosa se enfrían rápidamente, adquiriendo mayor densidad. El aire más frío y pesado desciende hacia el valle por acción de la gravedad y continúa moviéndose hasta los llanos, a este viento local se le denomina brisa de montaña o viento catabático.

En muchas áreas, los vientos ascendentes (brisa de valle) comienzan temprano en la mañana, alcanzan una velocidad máxima al mediodía y la dirección inversa al final de la tarde. La brisa de montaña alcanza su máximo en las primeras horas de la mañana, generalmente justo antes del amanecer (Martín V., Ungerovich M., 2017).

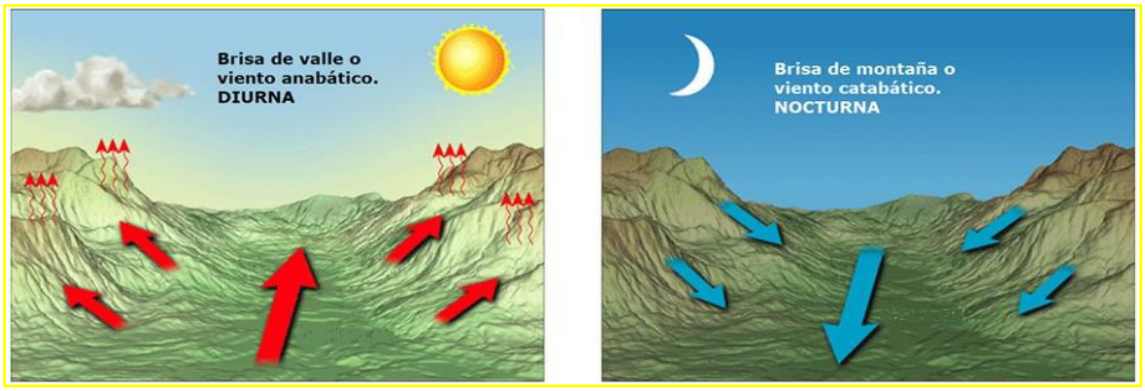

Figura 2.1 Representación esquemática de las brisas de valle y de montaña[1].

Fuente: (https://www.tiempo.com/noticias/divulgacion/brisas-los-vientos-que-te-refrescan.html).

2.3 Circulación Global de la Atmosfera

La circulación global de la atmósfera es causada por el calentamiento desigual de la superficie terrestre, donde las regiones ubicadas alrededor del ecuador reciben mayor radiación solar que en cualquier otra parte del planeta, siendo la menor radiación recibida en los polos, la variación de radiación recibida produce una variación de temperatura entre las latitudes más altas y bajas. Las masas de aire calientes del ecuador se elevan y se dirigen por los altos niveles hacia los polos, debido a que no se pueden acumular indefinidamente arriba creando una zona de baja presión, una vez enfriado estas masas de aire descienden a la superficie y retornan al ecuador. En los polos las masas acumuladas de aire frío y más denso van en dirección al ecuador por las capas bajas de la atmosfera, al alejarse de los polos a ras de la superficie comienzan a calentarse para luego poder ascender y regresar a los polos por los altos niveles estas masas de aire se enfrían y descienden a los polos nuevamente cerrando el ciclo, manteniendo el equilibrio atmosférico, en todo este proceso se producen transferencias de energía calorífica entre las masas de aire. Este proceso dinámico e interacción que hay entre las masas de aire caliente y frío que ascienden y descienden respectivamente realizando trasvase de energía se le conoce como convección. Por tanto la circulación global de la atmósfera, es producida por convección.

A causa de la rotación de la tierra sobre su eje, es provocado el efecto de la aceleración de Coriólis haciendo que la circulación de los vientos no sea la misma en todos los sitios. En el hemisferio Norte, dicha aceleración desvía los vientos de manera que se mueven en el sentido de las agujas del reloj alrededor de un área de alta presión (anticiclón), y en el sentido antihorario en un área de bajas presiones (depresión o ciclón). De la misma manera la aceleración de Coriólis hace que los vientos se mueven en sentido contrario en el hemisferio sur. Debido a esto, se establecen en la tierra varias circulaciones parciales, con zonas de altas presiones permanentes y zonas de bajas presiones permanentes.

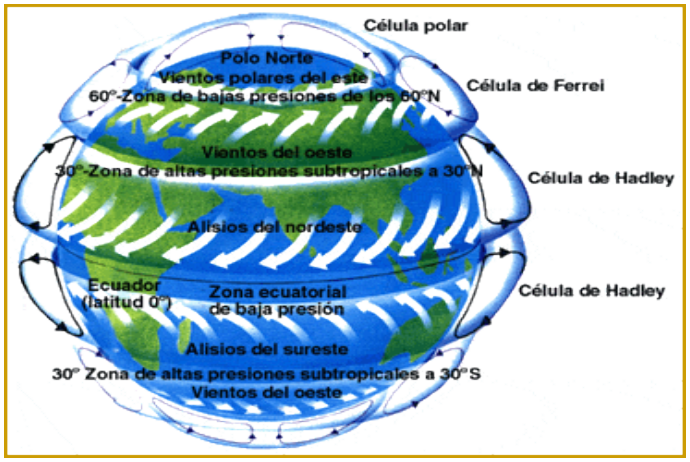

Figura 2.2. Circulación global de la atmosfera.

Fuente: http://meteo.maicas.net/articulos/circula.html

2.4 El Vector Viento y sus Componentes Escalares

Partiendo de que el viento es una masa de aire en movimiento, tiene como característica principal un comportamiento vectorial es decir velocidad (módulo) y dirección, pues nos da información de la intensidad o fuerza del viento como también de donde proviene.

Los instrumentos utilizados para medir ambos parámetros son el anemómetro para medir la velocidad en m/seg o en km/h, generalmente está conformado por un molinete de tres brazos, que se encuentran separados por 120º y en cada uno de sus extremos llevan unas semiesferas huecas o cazoletas y giran alrededor de un eje vertical, al girar con el viento los brazos activan un contador que indica el número de revoluciones y de esta manera se calcula la velocidad del viento incidente; el segundo instrumento es la veleta que señala la dirección del viento en grados sexagesimales, la veleta consta de un eje vertical con una pieza perpendicular, que puede girar libremente alrededor del eje. La pieza perpendicular suele acabar, por un extremo, en una punta de flecha o en una forma aguda y, por la otra, en una o dos piezas planas o aletas (el peso de ambos brazos debe ser el mismo, manteniendo el equilibrio). Al soplar el viento, la pieza perpendicular gira hasta colocarse en la posición en la que presenta menos resistencia al aire, es decir, ofreciéndole el extremo agudo, indicando la dirección de donde procede el viento y no hacia donde va.

2.5 Componente Zonal (U) y Meridional (V)

Al ser el viento de carácter vectorial y considerando un desplazamiento horizontal del mismo, el vector velocidad del viento se puede descomponer en dos componentes dentro del plano horizontal, estas son:

2.5.1 Componente Zonal (U)

Es la componente de la velocidad horizontal del viento a lo largo de un circulo de latitud cuya dirección va de Oeste – Este. Si la componente tiene magnitud positiva significa que apunta hacia el Este y si negativa el viento apunta hacia el Oeste.

2.5.2 Componente Meridional (V)

Es la componente de la velocidad horizontal del viento a lo largo de un meridiano cuya dirección va de Norte – Sur. Si la componente tiene magnitud positiva significa que apunta hacia el Norte y si negativa el viento apunta hacia el Sur. En la siguiente figura 2.3 se muestra el esquema del plano en el que se desarrollan ambas componentes.

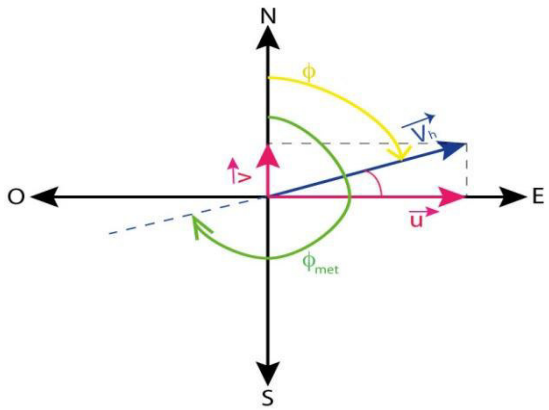

Figura 2.3. Componente zonal y meridional del viento en el plano horizontal.
Fuente: http://www.silviaalonsoperez.com/2014/06/direccion-y-velocidad-del-viento-con-componentes-meridional-y-zonal/

El vector velocidad horizontal es $\overrightarrow{Vh}$**,** ha sido descompuesto en sus componentes meridional y zonal **v** y **u** respectivamente. Este es solo un ejemplo eligiendo un módulo, dirección y sentido cualquiera para el vector $\overrightarrow{Vh}$**.** La dirección del viento es $\boldsymbol{\Phi_{met}}$, pues la definición de la dirección del viento en meteorología es aquella que me da información de donde viene o de donde sopla el viento y de esta manera son registrados en la Data. Y por último el ángulo $\boldsymbol{\Phi}$ me indica hacia dónde va el viento, que nos servirá calcular al momento de determinar la climatología del ciclo diurno del vector viento y el comportamiento vectorial diurno de cada mes para todo el periodo de estudio (diagrama de flechas).

En el sistema de referencia mostrado la dirección Norte corresponde a los 0º, la dirección Este a los 90º, la dirección Sur a los 180º y la dirección Oeste a los 270º, es decir en sentido horario. Por trigonometría calculamos ambas componentes **u** y **v** para cada dato de velocidad y dirección.

$$u = -\mathrm{V}_h \,.\, \mathrm{sen}\,\Phi_{met} \qquad (1)$$

$$v = -\mathrm{V}_h \,.\, \cos\,\Phi_{met} \qquad (2)$$

2.6 Viento promedio – cálculo vectorial

El promedio de los vientos no pueden ser calculados con simples medias aritméticas, ya que la velocidad y dirección no son datos escalares sino vectoriales. Por tanto es necesario hacer una suma vectorial, es decir trabajar con sus componentes zonales y meridionales. Para ello primeramente se calcula el promedio aritmético de todas las componentes zonales y de la misma manera la componente meridional. De la secuencia de N observaciones de $\boldsymbol{\Phi_{met\,i}}$ y $\boldsymbol{V_{h\,i}}$, la media de Este a Oeste seria $\boldsymbol{u_m}$ y de Norte a Sur $\boldsymbol{v_m}$, las componentes promedio del viento son:

$$u_m = -\frac{1}{N} \,.\sum \mathrm{V}_{h\,i} \,.\, \mathrm{sen}\,\Phi_{met\,i} \qquad (3)$$

$$v_m = -\frac{1}{N} \,.\sum \mathrm{V}_{h\,i} \,.\, \cos\,\Phi_{met\,i} \qquad (4)$$

La velocidad y dirección media del viento resultante son:

$$V_{h\,m} = (u_m{}^2 + v_m{}^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$\Phi_m = -arc\,tan \left(\frac{u_m}{v_m} \right) \quad (6)$$

$$\Phi_{met\ m} = \Phi_m + 180^\circ \quad , \text{ si } \Phi_m < 180^\circ \quad (7)$$

$$\Phi_{met\ m} = \Phi_m - 180^\circ \quad , \text{ si } \Phi_m > 180^\circ \quad (8)$$

Donde Φ_m indica el ángulo promedio **hacia dónde va el viento** el cual es necesario calcular para graficar el comportamiento vectorial del viento (diagrama de flechas). Por esta razón se le suma o resta 180 º para así determinar la dirección promedio del viento $\Phi_{met\ m}$, es decir **de dónde viene**, y así graficar la Rosa de vientos.

2.7 Escala de Beafurt

Con el propósito de poder precisar y estandarizar la intensidad de los vientos basada en los efectos que tienen sobre el mar (el estado del mar, sus olas, etc.) y sobre la tierra (agitación de las hojas de los árboles, las ramas del árbol, el polvo, etc.), se ha establecido una escala, conocida como la Escala de Beafurt, que asocia la intensidad de los vientos con las características de los efectos en el mar y en la tierra. La escala de medida es de 0 a 12 y se establece sus respectivos efectos para cada intervalo de velocidad. La velocidad está en m/seg, y km/h. La Tabla 2 establece la relación de la escala de medida de la intensidad de los vientos con las características del viento y con las características de los efectos en tierra.

Fuerza Beaufort	Nombre	Equivalencia de la velocidad a una altura tipo de 10 metros sobre terreno llano		Características para la estimación de la velocidad en tierra
		m/s	*Km/h*	
0	*Calma*	0 - 0.2	1	El humo se eleva verticalmente
1	*Ventolina*	0.3 – 1.5	1 - 5	La dirección del viento se revela por el movimiento del humo, pero no por las veletas
2	*Brisa muy débil*	1.6 – 3.3	6 - 11	El viento se percibe en el rostro; las hojas se agitan; la veleta se mueve
3	*Brisa débil*	3.4 – 5.4	12 – 19	Hojas y ramitas agitadas constantemente; el viento despliega las banderolas
4	*Brisa moderada*	5.5 – 7.9	20 - 28	El viento levanta polvo y hojitas de papel; ramitas agitadas
5	*Brisa fresca*	8.0 – 10.7	29 - 38	Los arbustos con hoja se balancean; se forman olitas con cresta en las aguas interiores (estanques)
6	*Viento fresco*	10.8 – 13.8	39 - 49	Las grandes ramas de agitan; el uso del paraguas se dificulta
7	*Viento fuerte*	13.9 – 17.1	50 - 61	Los árboles enteros se agitan; la marcha en contra del viento es penosa
8	*Viento duro*	17.2 – 20.7	62 - 74	El viento rompe las ramas; es imposible la marcha contra el viento
9	*Viento muy duro*	20.8 – 24.4	75 - 88	El viento ocasiona ligeros daños en las viviendas
10	*Temporal*	24.5 – 28.4	89 - 102	Raro en los continentes; árboles arrancados; importantes daños en las viviendas
11	*Borrasca*	28.5 – 32.6	103 - 117	Observado muy raramente; acompañado de extensos destrozos
12	*Huracán*	32.7 ó más	118 ó más	Estragos graves y extensos

Tabla 2. Escala de Beafurt.

Fuente: https://sites.google.com/site/lanavegacionyelmar/home/navegacion/meteorologia.

La figura 2.4 muestra la relación de la intensidad de los vientos con las características del oleaje en el mar, de acuerdo a la escala de Beafurt.

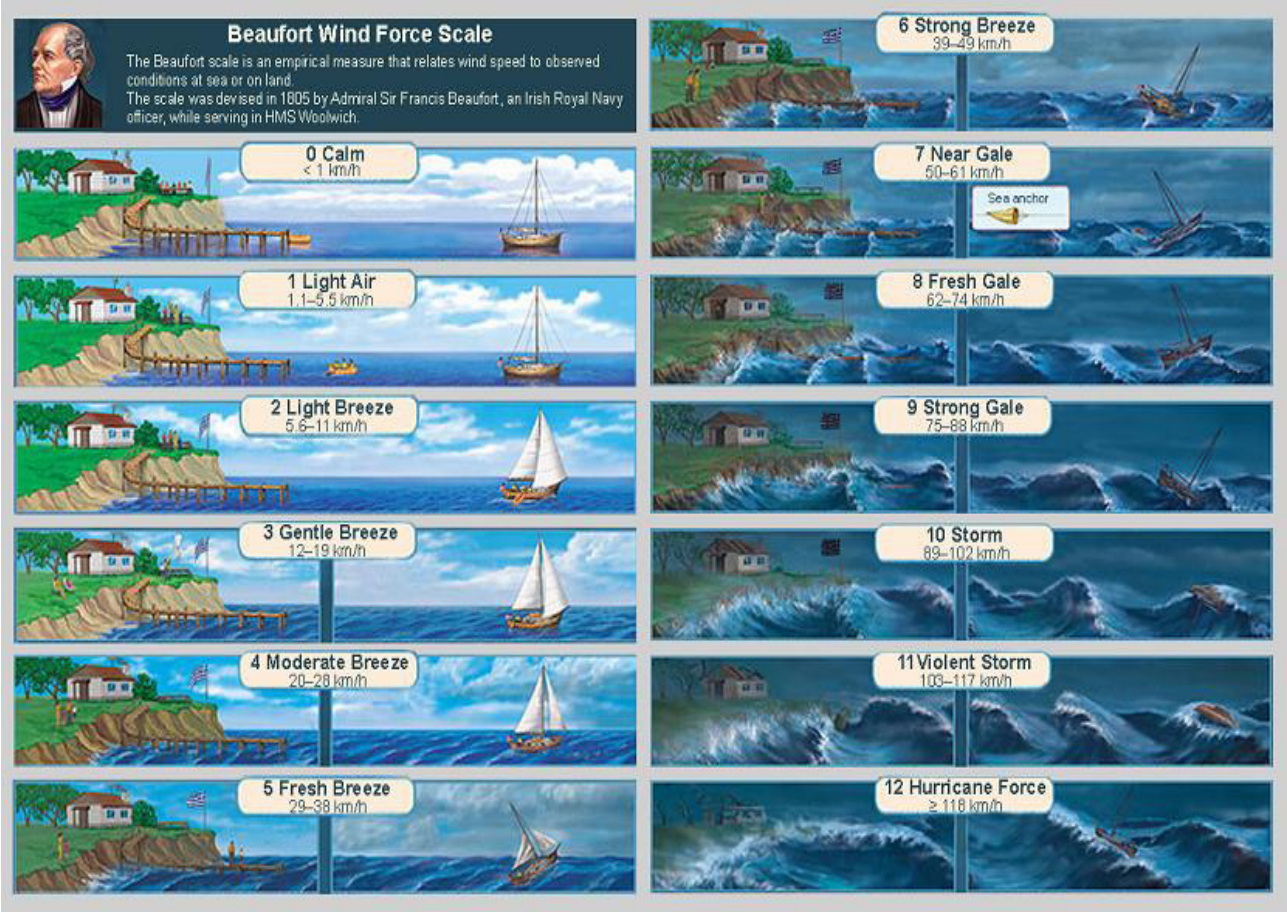

Figura 2.4. Efectos de la intensidad de los vientos en el oleaje del mar según la escala de Beafurt.

Fuente: https://www.meteorologiaenred.com/escala-beaufort.html.

2.8 Rosa de vientos

La rosa de vientos o rosa náutica es una herramienta visual que nos ayuda a comprender fenómenos meteorológicos de forma práctica y sencilla pues nos da información de la frecuencia de la velocidad del viento procedente cada una de las direcciones, permitiendo identificar en las dos escalas de tiempo de corto periodo (minutos a horas) y de largo periodos (días a meses) vientos predominantes o prevalentes así como también la frecuencia y procedencia de los vientos más intensos.

Las rosa de vientos está representada por un círculo que tiene marcados alrededor las direcciones en las que se divide la circunferencia del horizonte, el cual parte desde el Norte

en sentido horario. En el presente estudio la Rosa de Vientos está dividido en 16 partes es decir cuenta con 16 direcciones cardinales cada una de ellas se diferencia en 22.5º, se muestran en la Tabla 3, figura 2.5. La rosa de vientos está conformada por un conjunto de circunferencias concéntricas en cuyo eje radial se encuentra la escala de porcentaje de datos, véase figura 2.6.

Tabla 3. Muestra las 16 direcciones cardinales que parten desde el Norte con 0º y continua en sentido horario.

1	N	Norte	0º
2	NNE	Norte Noreste	22.50 º
3	NE	Noreste	45.00 º
4	ENE	Este Noreste	67.50 º
5	E	Este	90.00º
6	ESE	Este Sudeste	112.50 º
7	SE	Sudeste	135.00 º
8	SSE	Sur Sudeste	157.00 º
9	S	Sur	180.00 º
10	SSO	Sur Sudoeste	202.50 º
11	SO	Sur Oeste	225.00 º
12	OSO	Oeste Sudoeste	247.50 º
13	O	Oeste	270.00 º
14	ONO	Oeste Noroeste	292.50 º
15	NO	Noreste	315.00 º
16	NNO	Norte Noroeste	337.50 º

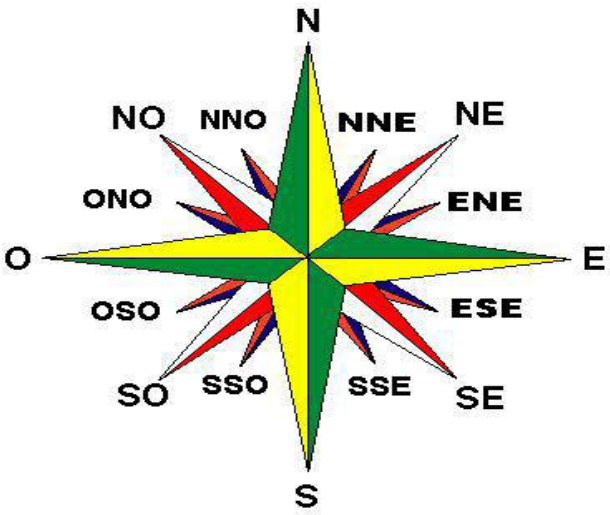

Figura 2.5. Rosa de los vientos.

Fuente: https://diccionario-nautico.com.ar/rosa-de-los-vientos/

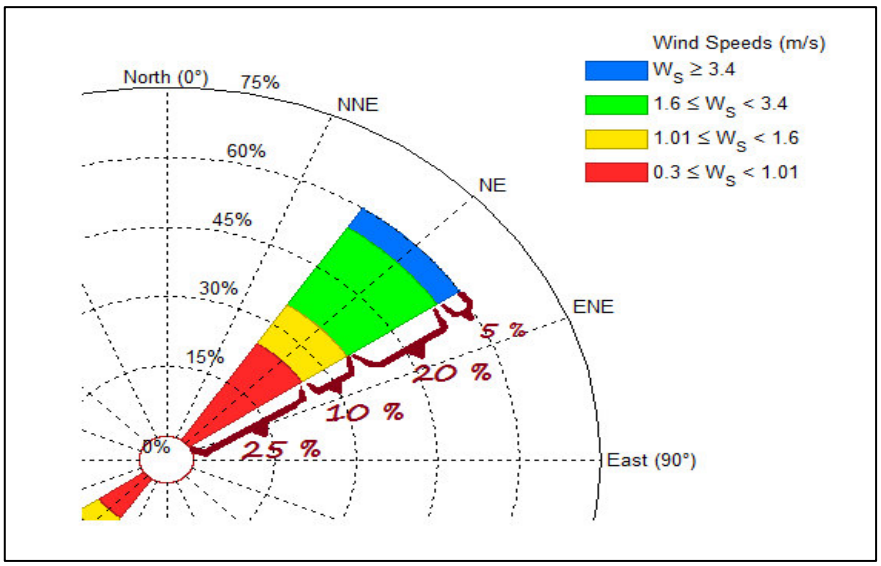

Figura 2.6. Esquema simplificado de la interpretación de la rosa de vientos.

Una rosa de vientos nos da información del porcentaje de ocurrencia de los vientos con determinada velocidad y dirección. La figura 2.6 es un ejemplo de grafica de rosa de vientos que permite interpretar en forma simple. La rosa de vientos tiene las siguientes características: en el eje radial se encuentra la escala de porcentajes, el espesor del trapecio circular en el eje radial nos indica el porcentaje de datos, los colores indican el rango de las

velocidades, el cual está basado en la escala de Beafurt, y la orientación del trapecio circular indica la dirección de donde vienen los vientos.

En el ejemplo la rosa de vientos nos indica que el 25% de los vientos viajan con un rango de velocidad (0.3 – 1.01 m/seg) y vienen del NE, el 10 % de los vientos viajan con un rango de velocidad (1.01 – 1.6 m/seg) y que vienen del NE, el 20 % de los vientos viajan con un rango de velocidad (1.6 – 3.4 m/seg) y vienen del NE y por último el 5 % de los vientos viajan con un rango de velocidad mayor o igual a 3.4 m/seg y vienen del NE.

2.9 Evaluación del potencial eólico

En esta sección se describe brevemente el procedimiento para la evaluación del recurso eólico para su potencial uso en la generación de energía eléctrica en la localidad del Observatorio de Huancayo, valle del rio Mantaro, utilizando las mediciones de viento registradas cada 10 minutos a 10m de altura durante los años 2000 a 2010.

La energía eólica y la energía solar son consideradas como alternativas para la generación de energía eléctrica limpia desde el punto de vista económico y medio ambiental (Xie K. et.al, 2011) y de desarrollo sostenible (Rodriguez VA., 2008), principalmente en las localidades donde la red de energía hidroeléctrica no está disponible y se continúa utilizando el petróleo para la generación de energía eléctrica. La mayoría de los países en el planeta tierra están promoviendo el uso del recurso eólico, solar e hidroeléctrico como fuentes de energía renovable limpia.

La evaluación del potencial eólico se inicia analizando las características de la velocidad del viento. Como los datos que se disponen se registraron a 10 m de altura, la técnica comúnmente usada para estimar velocidades a mayores alturas es extrapolar los valores obtenidos y de esta manera construir el perfil de velocidad del viento del sitio (Bañuelos et al., 2008, pp. 2). La extrapolación se realiza haciendo uso de la ley del perfil logarítmico del viento Ec. (9).

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{z_0}\right)} \qquad (9)$$

Donde v es la velocidad extrapolada, v_0 es la velocidad a 10 m, H es la altura del aerogenerador, H_0 es 10 m y Z_0 es llamado coeficiente de longitud de rugosidad y se da en metros, el cual depende básicamente del tipo de terreno, espaciamiento y altura de rugosidades (agua, pasto, etc.) y tiene valores desde 0.0002 hasta 1.6 o más" (Bañuelos et al., 2008). Para la zona de la estación de Huayao consideraremos Z_0 = 0.03 m (Barbero A. J., 2012, pp. 55), como valor que se aproxima a la zona de estudio. Extrapolados los datos de velocidad se procede con el cálculo de la distribución de frecuencias de la velocidad. El rango de la frecuencia relativa, en el eje Y, es de 0 a 1 y el rango de la velocidad, en el eje X, es en intervalos de 1 m/s. Luego se calcula los parámetros de forma (k) y de escala (c) de la función de distribución de Weibull, utilizando el método de mínimos cuadrado (Serrano J., 2013). La función de Weibull, Ec. (10), es una función de probabilidad de la velocidad, que describe las características de la velocidad.

$$\mathrm{p}\,(v) \;=\; \left(\frac{k}{c}\right).\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} .\; e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}} \qquad (10)$$

Donde P es la función de Weibull y v es la velocidad en m/s.

Conociendo los parámetros k, c y la densidad del aire ρ, se calcula la velocidad media (m/seg), Ec. (11), la desviación estándar (m/seg), Ec. (12) y la densidad de potencia (w/m2), Ec. (13). La densidad del aire ρ (Kg/m3) se calcula utilizando la versión exponencial, versión simplificada, de la fórmula propuesta por el Comité Internacional De Pesas y Medidas (CIPM – 2007).

$$\bar{v} \;=\; c\,.\,\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right) \qquad (11)$$

$$S^{2} \;=\; c^{2}.\,\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right) \;-\; c^{2}.\,\Gamma^{2}\left(1+\frac{1}{k}\right) \qquad (12)$$

$$D_p \;=\; \frac{1}{2} \;.\; \rho\,.\,c^{3}\,.\,\Gamma^{3}\left(1+\frac{1}{k}\right) \qquad (13)$$

El cálculo de la energía eléctrica generada (Kw-h), figuras 4.31 a-e, se obtiene mediante el uso de la curva de potencia del aerogenerador E-82/2000, figura 4.30 y los datos de la distribución de frecuencias de la velocidad, figuras 4.29 a-e. Cada una de las barras de la distribución de la energía eléctrica generada, figura 4.31 a-e, se obtiene utilizando la ecuación 14 y el total de la energía generada se obtiene utilizando la ecuación 15. Las figuras 4.29, 4.30 y 4.31 se encuentran en el capítulo 4, sección 4.8.

$$E_{gi} = P_{vi} \cdot f_{vi} \cdot N \qquad (14)$$

$$E_T = \sum_i E_{gi} \qquad (15)$$

P_{vi} : Potencia generada por un viento con velocidad V_i (m/seg), un punto de la curva de potencia del aerogenerador, figura 15.2

f_{vi} : Frecuencia relativa de la velocidad del viento V_i (m/seg), cada barra del histograma de frecuencias, figuras 15.1

N : Número total de datos horarios.

E_{gi} : Energía total generada por todos los vientos con velocidad V_i (m/seg), cada barra de la distribución de la energía eléctrica, figuras 15.3

E_T : Energía eléctrica total generada por todo el periodo de datos utilizados, para cada estación del año o para todo el año.

Capítulo 3

Metodología

La metodología en este trabajo está basada en el desarrollo de subrutinas en un ambiente de programación en Matlab, para los cálculos y gráficos de los datos, y para el análisis del ciclo diurno, del ciclo estacional o anual y rosa de vientos, que se describen a continuación.

3.1. Data

Los datos utilizados en este estudio fue proporcionado por el IGP, datos registrados cada 10 minutos en la estación automática de marca Campbell instalado en la estación meteorológica del Observatorio de Huancayo disponible para el periodo de 2000 hasta 2010. La metodología en este trabajo está basada en desarrollar subrutinas para procesar los datos y graficarlos utilizando el programa de Matlab.

En la estación meteorológica del Observatorio de Huancayo, al igual que en otras estaciones meteorológicas convencionales, los datos meteorológicos se registran solo tres veces al día, a las 07:00, 13:00 y 19:00 horas. Con estos datos no se pueden realizar estudios del ciclo diurno. Además, los datos de dirección del viento son cualitativos y la magnitud son aproximaciones. Recién en los últimos veinte años, aproximadamente, se están utilizando estaciones automáticas con nuevos instrumentos para la medición de las variables meteorológicas con mayor precisión y resolución temporal.

En la cuenca del rio Mantaro existen muy pocas estaciones automáticas que registran datos con una resolución temporal de 10 minutos, pero los datos de viento tienen muchos errores y hay muchos vacíos.

3.2 Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos incluye el control de calidad y graficar los datos considerando como una serie de tiempo. Los datos que fueron registrados en la estación automática con una

resolución temporal de 1hora desde el 1 de marzo de 2000 hasta 31 de marzo de 2001 que contiene 19008 datos horarios dados de las dos variables, magnitud y dirección. Los datos también fueron registrados con una resolución temporal de 10 minutos durante el periodo desde el 21 de agosto de 2001 hasta el 31 de agosto de 2010 que contiene un total de 780695 datos de las dos variables, magnitud y dirección del viento. >> Estos datos registrados cada 10 minutos se promediaron para obtener datos horarios.

3.2.1 Control de calidad

El control de calidad de los datos se inicia graficando los datos de velocidad, como una serie de tiempo, para todo el periodo disponible para identificar visualmente si existen datos con valores fuera del rango aceptable o inusual. Luego se analizó la consistencia entre dato y dato, de manera que si se observaba algún valor inusual, muy alto o muy bajo se compara con los valores anteriores y posteriores se procede a eliminarlos y remplazarlos con el promedio del valor anterior y el posterior (interpolación lineal). Igualmente se procedió con los datos de dirección del viento. El resultado fue que se encontraron muy pocos valores inconsistentes en las dos series de tiempo, magnitud y dirección.

3.2.2 Descomposición de los datos vectoriales de velocidad y dirección en sus componentes escalares

Se toma todos los datos de velocidad y dirección de 10 min del periodo 2000 – 2010 y los descomponemos en la componente zonal y meridional, utilizando las ecuaciones 1 y 2.

3.3 Calculo de las medias horarias

Se procedió a descomponer los datos vectoriales de cada 10 min de velocidad y dirección, en sus componentes zonal (U) y meridional (V) del campo de velocidad superficial del viento. Estos valores escalares se utilizaron para los cálculos de las media horarias, diarias y mensuales

Este procedimiento se realiza a los datos de cada 10 min. Para cada componente escalar U y V, se calculó el promedio aritmético de los datos de cada 10 min, obteniéndose los valores horarios. Los datos de cada componente fueron archivados por año y sus respectivos datos son

ordenados en una matriz de 24 columnas (24 horas) y de 365 o 366 filas (según el año no bisiesto o bisiesto) y así para todo el periodo 2000 - 2010.

3.4 Calculo de las medias diarias

Para cada componente escalar U y V, se calculó el promedio aritmético de los datos horarios, obteniéndose los valores diarios (promedio de 24 horas). Los datos de cada componente son archivados por año y sus respectivos datos son ordenados en una matriz de 1 columna (media diaria) y de 365 o 366 filas (según el año no bisiesto o bisiesto) y así para todo el periodo 2000 – 2010.

3.5 Calculo de las medias mensuales

Para cada componente escalar U y V, se calculó el promedio aritmético de los respectivos valores diarios de cada mes obteniéndose los valores mensuales. Los datos de cada componente son ordenados en una matriz de 12 columnas (medias mensuales) y de 11 filas (11 años del periodo 2000 - 2010) y se archiva.

3.6 Ciclo diurno del vector viento, de la magnitud, de la componente zonal y meridional.

En esta sección se describe el procedimiento para el cálculo del ciclo diurno de los vientos superficiales. El ciclo diurno se refiere a las variaciones del viento que se repite cada 24 horas. A las variaciones del viento en un día calendario le denotaremos como variación diurna de ese día. Como las características del viento que se observa en un día son ligeramente diferentes a las características de otros días, denotaremos el Ciclo Diurno como el promedio de todas las variaciones diurnas registradas en el periodo 2000-2010. En el presente estudio el número de días es el que corresponde a los 11 años de registro. La causa de la variación diurna del viento, como también de otras variables meteorológicas, es el forzamiento térmico asociado con la radiación solar que se repite cada 24 horas.

En consecuencia, el ciclo diurno de los vientos superficiales se obtiene promediando los valores horarios registrados a la 00:00 am de todos los días durante el periodo de registro, desde el 1 de enero del año 2000 hasta el 31 de diciembre del año 2010. De la misma manera se obtiene el promedio de los valores horarios registrados a las 01:00 am desde el 1 de enero del año 2000 hasta el 31 de diciembre del año 2010. Y así sucesivamente para el resto de los valores horarios hasta las 23:00 horas. El resultado del ordenamiento de los datos es una matriz de 1 fila y 24 columnas (24 horas) para cada variable.

3.7 Variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud, componente zonal y meridional del vector viento.

Se toma la serie de tiempo horaria de cada variable, magnitud, componente zonal y meridional, del año 2005 y para cada una se ordena en una matriz de 1 fila y 8760 columnas (8760 horas). De cada una de las series se seleccionan los datos correspondientes a 4 meses (febrero, abril, agosto, noviembre), que representan a las 4 estaciones del año. Para visualizar mejor y graficar la variación diurna se aplica una media móvil de 4 horas.

3.8 Ciclo anual del vector viento, de la magnitud, de la componente zonal y meridional.

En esta sección se describe el procedimiento para el cálculo del ciclo anual de los vientos superficiales. Al igual que el ciclo diurno el ciclo anual se refiere a las variaciones del viento que se repite cada 12 meses. A las variaciones del viento en un año calendario le denotaremos como variación anual de ese año. Como las características del viento que se observa en un año son ligeramente diferentes a las características de otros años, denotaremos el Ciclo Anual como el promedio multianual-promedio de muchos años. En el presente estudio el número de años es el que corresponde a los 11 años de registro.

La causa de la variación diurna del viento, como también de otras variables meteorológicas, es el forzamiento térmico asociado con la radiación solar que se repite cada 24 horas.

En consecuencia, el ciclo anual de los vientos superficiales se obtiene construyendo para cada variable una matriz de 12 columnas (12 meses del año) y número de filas igual al número de años, y promediando los valores de cada columna. El resultado es 12 valores, uno para cada mes.

3.9 Variabilidad interanual de la magnitud, de la componente zonal y meridional del vector viento.

El procedimiento para el cálculo de la variabilidad interanual consiste en utilizar la serie de tiempo diaria de la magnitud del vector viento y de las componentes U y V del vector viento durante el periodo 2000 - 2010. Cada serie de tiempo es una matriz de 1 fila y 4018 columnas (4018 días del periodo). Para visualizar mejor y graficar la variabilidad interanual se aplica una media móvil de 30 días.

3.10 Anomalías de la magnitud, componente zonal y meridional del vector viento

Para el cálculo de las anomalías de cada una de las variables se procede a restar a la serie de tiempo mensual el ciclo anual del periodo 2000 - 2010.

3.11 Rosa de vientos

En esta sección se describe el procedimiento para obtener la representación gráfica de la variación en la dirección y la intensidad del viento utilizando los datos registrados en el Observatorio de Huancayo y el comando WindRose en Matlab adaptado y mejorado para el presente trabajo. Se utilizaron los datos promedios horarios, promedios diarios y promedios mensuales de la magnitud y dirección del vector viento para todo el periodo de 2000-2010. Para obtener los gráficos de la rosa de viento del ciclo diurno se utilizó los datos horarios, dividido en 4 periodos del día, madrugada, mañana, tarde y noche (ver Tabla 4).

Para obtener los gráficos de la rosa de viento del ciclo estacional, verano, otoño, invierno y primavera, se utilizó los datos horarios, los datos diarios y los datos mensuales, con la

finalidad de tener una visión del comportamiento del viento a escala local, mesoescala y escala sinóptica.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1 Presentación grafica de los cálculos de los datos horarios

En las figuras 4.1 a, b, c, d, e, f, g, h se muestran las gráficas de las series temporales de los datos horarios del vector viento para los meses de febrero, abril, agosto y noviembre del año 2005, como ejemplo del conjunto de gráficos que se preparó para todo el periodo 2000 – 2010, gráficos que se incluyen el **Anexo A.1**. Asimismo los meses de febrero, abril, agosto y noviembre se han seleccionado como representativos de cada una de las estaciones del año, verano, otoño, invierno y primavera respectivamente.

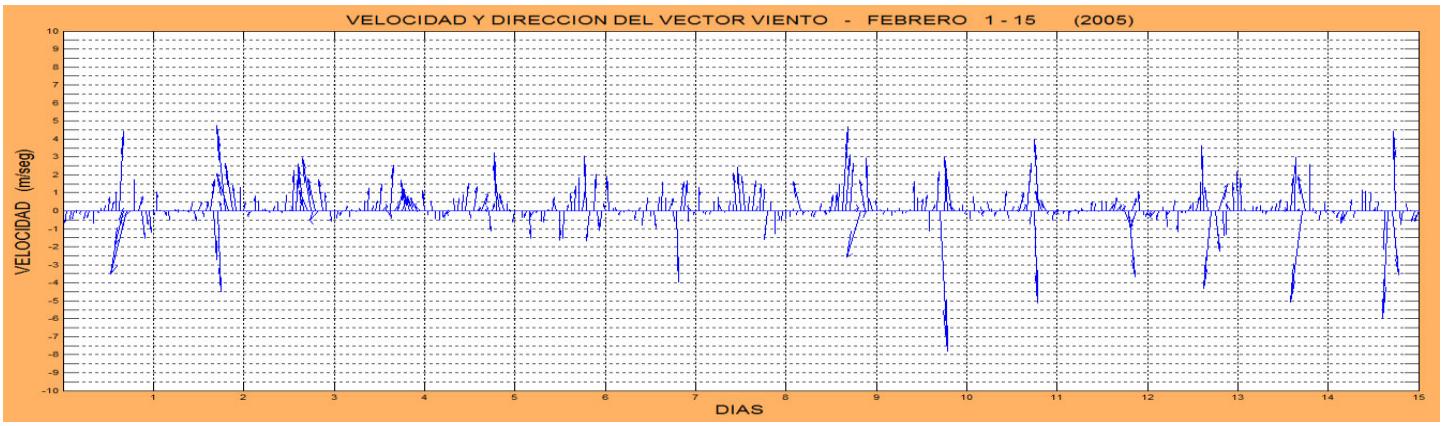

Figura 4.1a.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 1-15 del mes de febrero del año 2005.

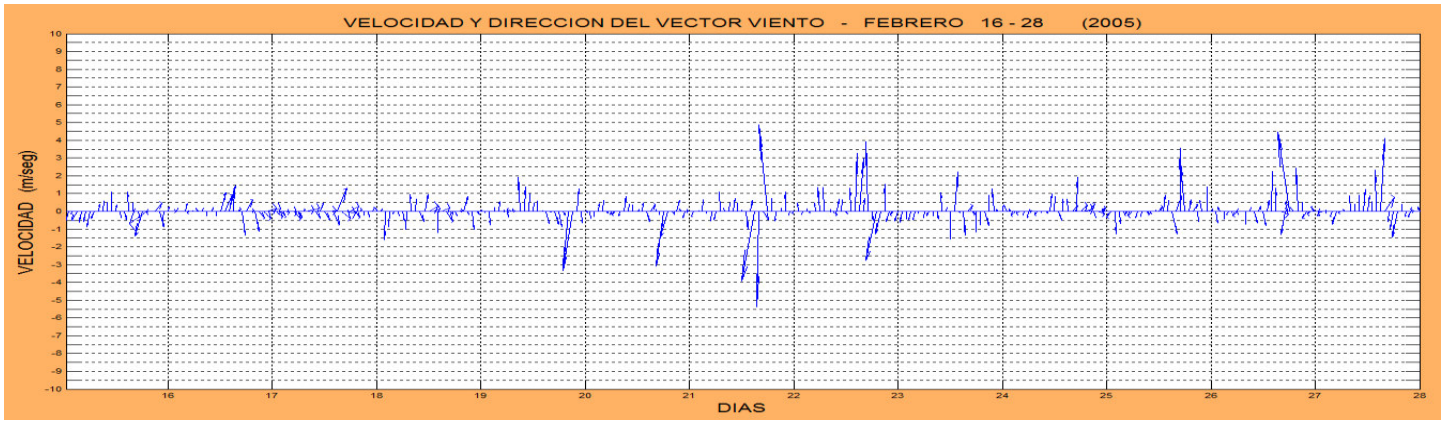

Figura 4.1b.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 16-28 del mes de Febrero del año 2005.

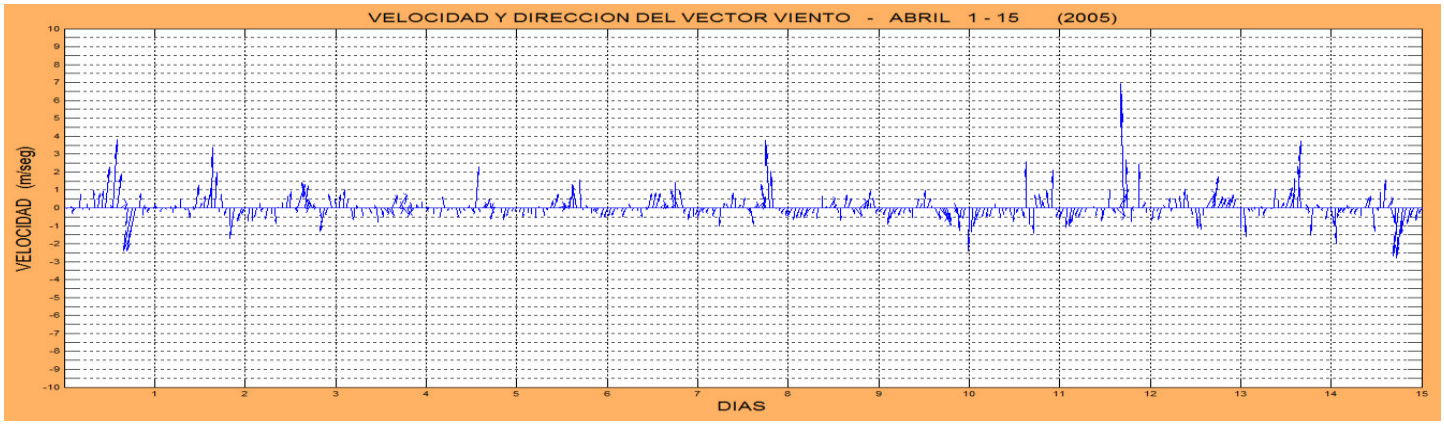

Figura 4.1c.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 1-15 del mes de Abril del año 2005.

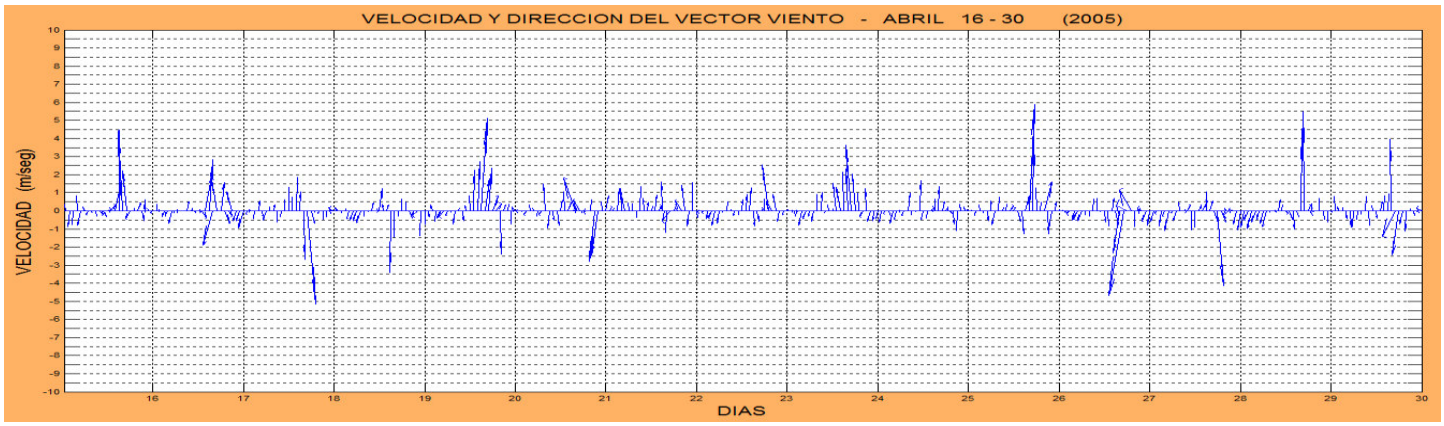

Figura 4.1d.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 16-30 del mes de Abril del año 2005.

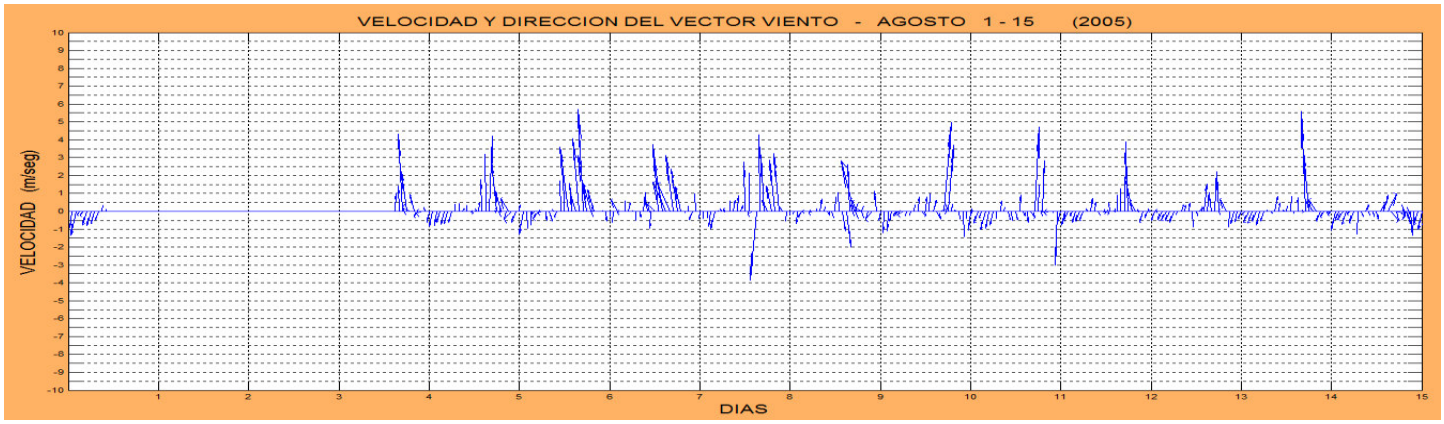

Figura 4.1e.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 1-15 del mes de Agosto del año 2005.

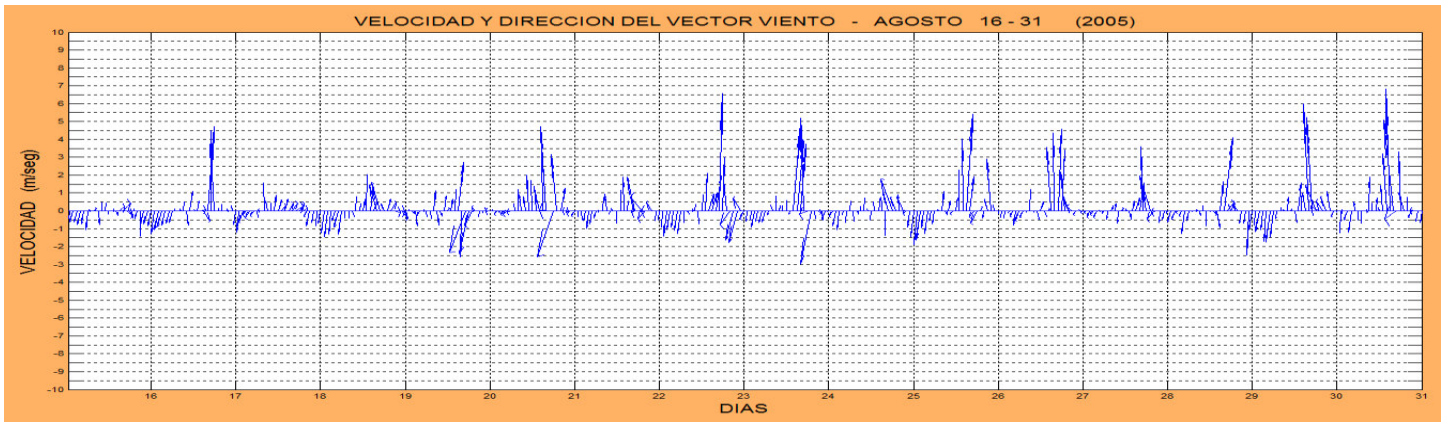

Figura 4.1f.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 16-31 del mes de Agosto del año 2005.

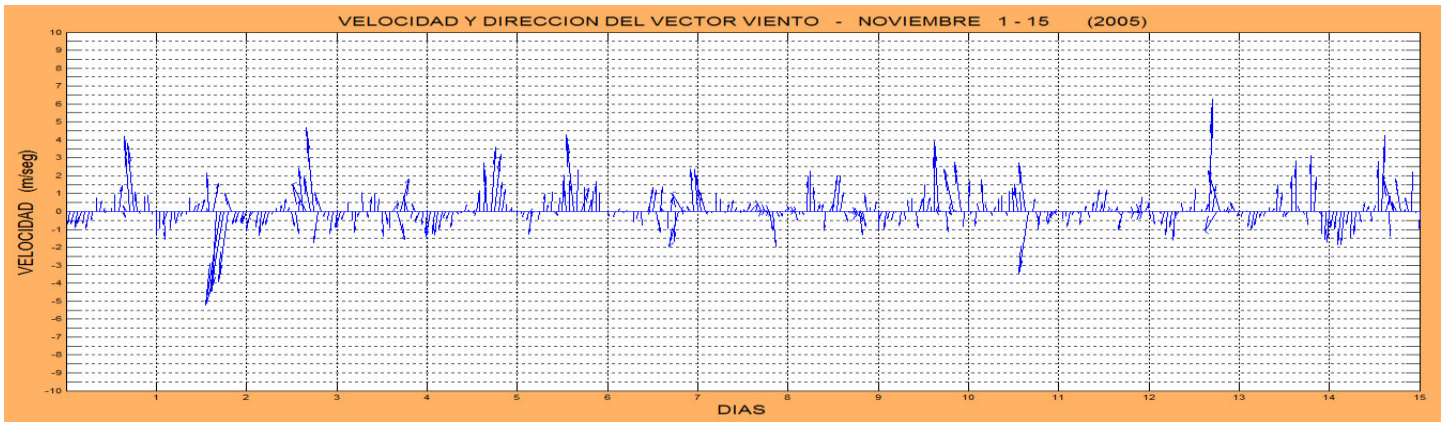

Figura 4.1g.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 1-15 del mes de Noviembre del año 2005.

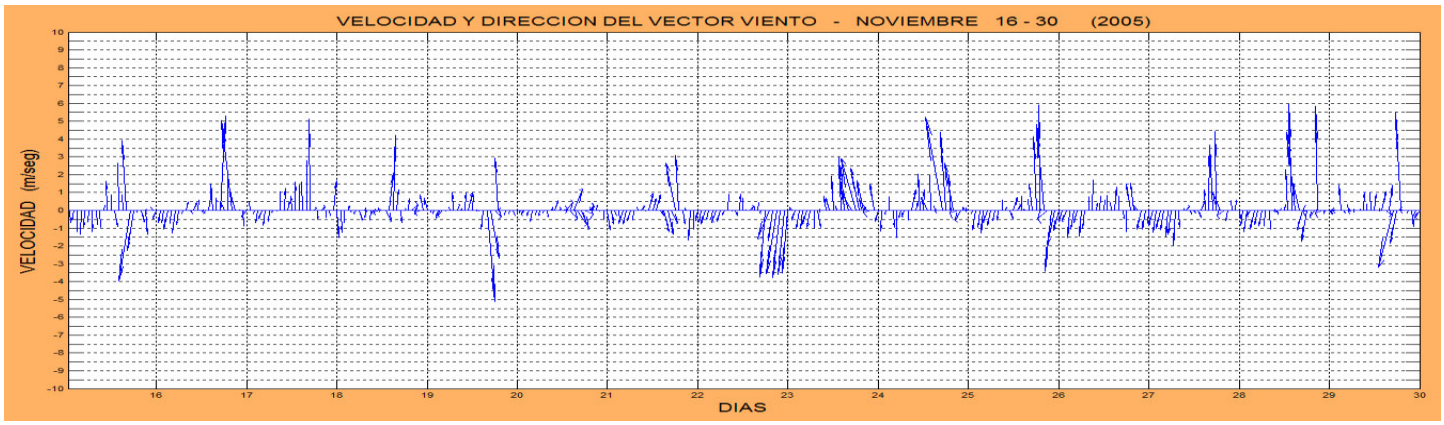

Figura 4.1h.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios del vector viento para los días 16-30 del mes de Noviembre del año 2005.

En la figuras 4.2 a, b, c, d se muestran las gráficas de las series temporales de los datos horarios de la magnitud o velocidad del vector viento para los meses de febrero, abril, agosto y noviembre del año 2005, como ejemplo del conjunto de gráficos que se preparó para todo el periodo 2000 – 2010, gráficos que se incluyen el **Anexo A.2**.

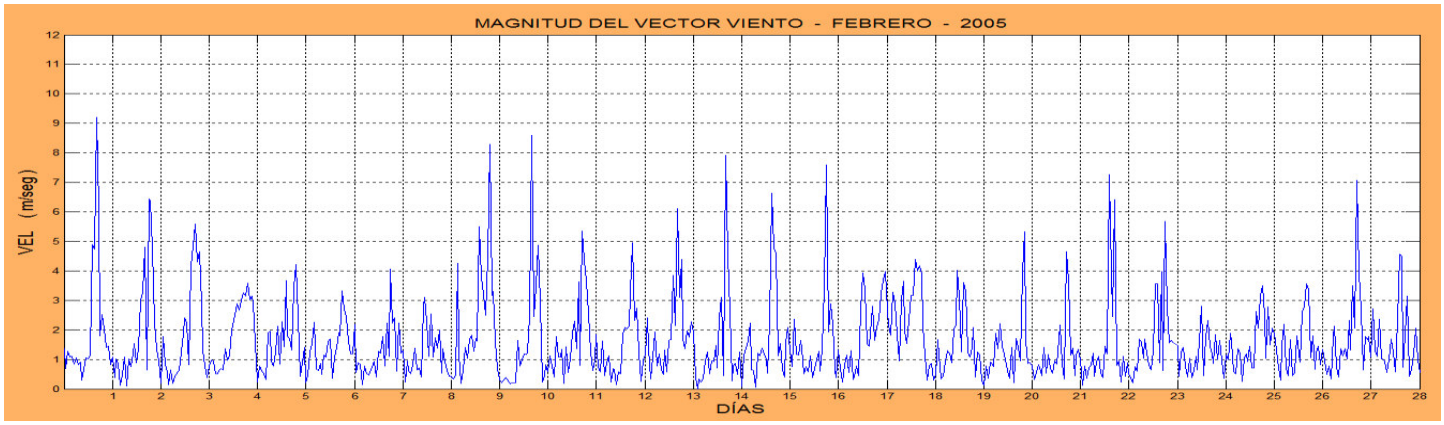

Figura 4.2a.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de febrero del año 2005.

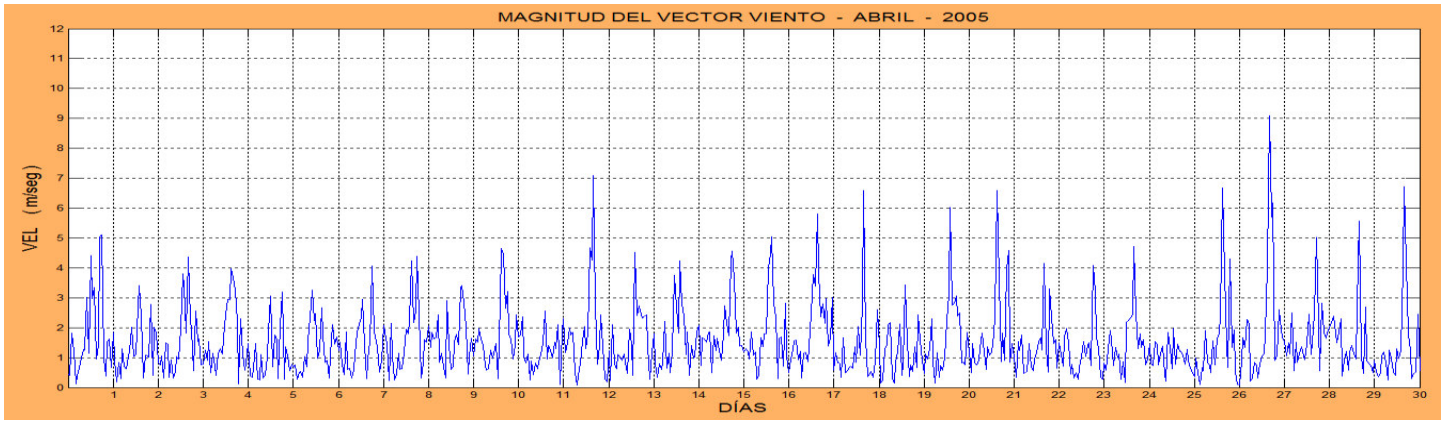

Figura 4.2b.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de abril del año 2005.

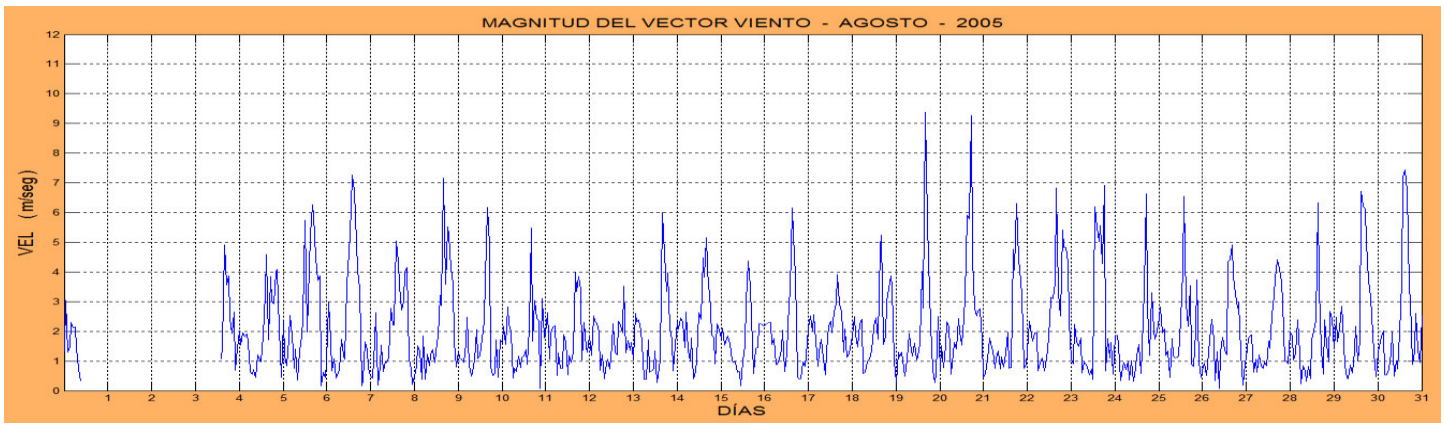

Figura 4.2c.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de agosto del año 2005.

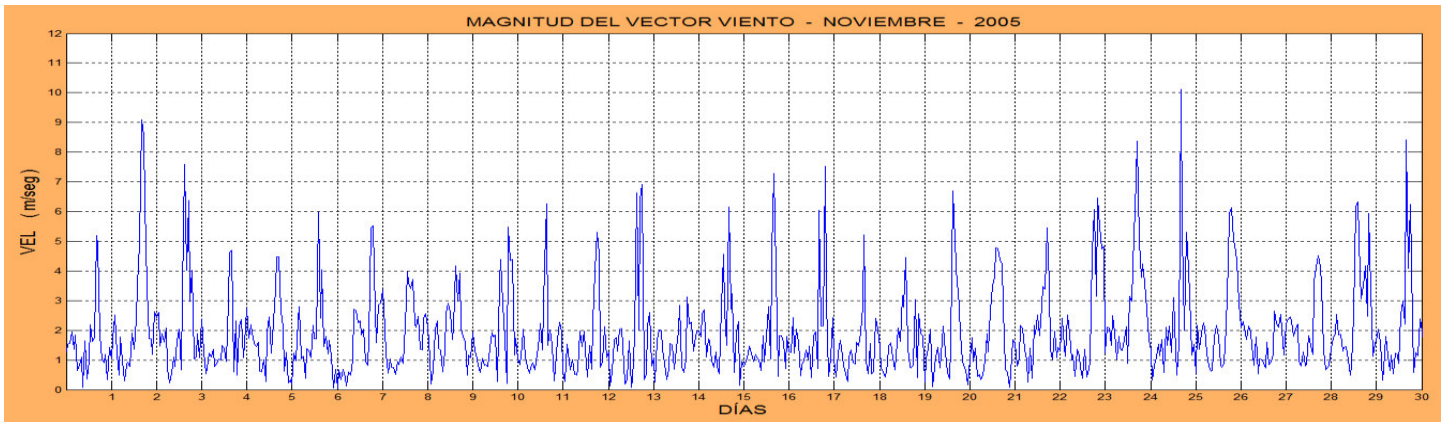

Figura 4.2d.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de noviembre del año 2005.

En las figuras 4.3 a, b, c, d se muestran las gráficas de las series temporales de los datos horarios de la componente zonal (U) del vector viento para los meses de febrero, abril, agosto, noviembre del año 2005, como ejemplo del conjunto de gráficos que se preparó para todo el periodo 2000 – 2010, grafios que se incluyen el **Anexo A.3**.

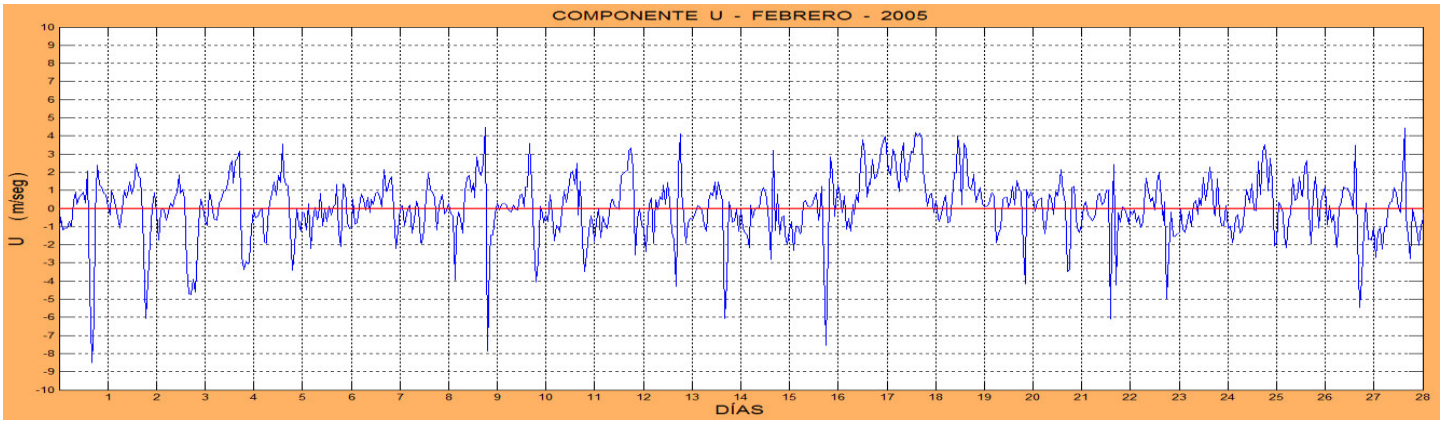

Figura 4.3a.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) del vector viento para el mes de febrero del año 2005.

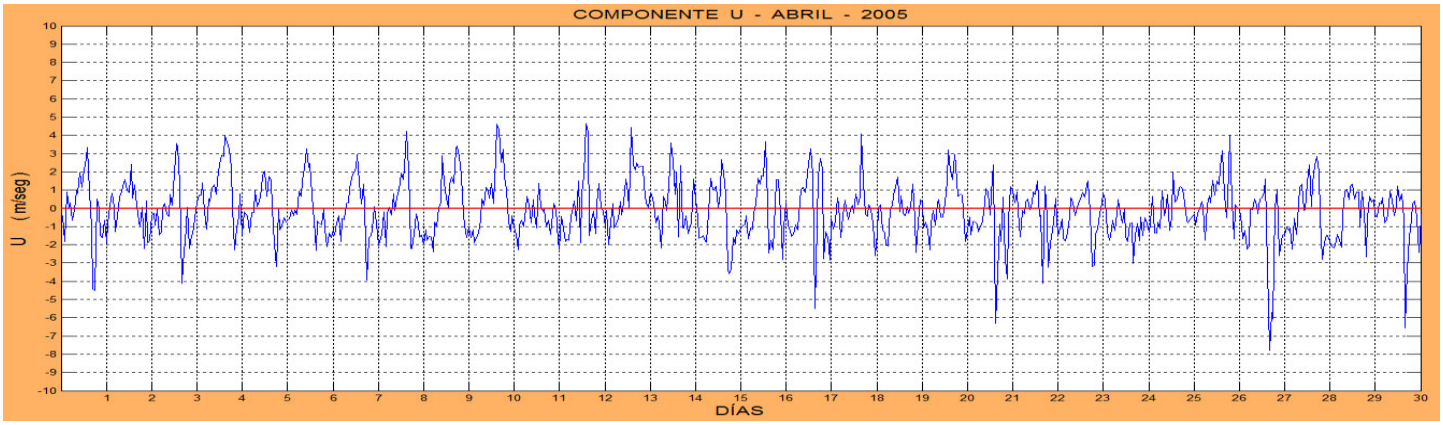

Figura 4.3b.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) del vector viento para el mes de abril del año 2005.

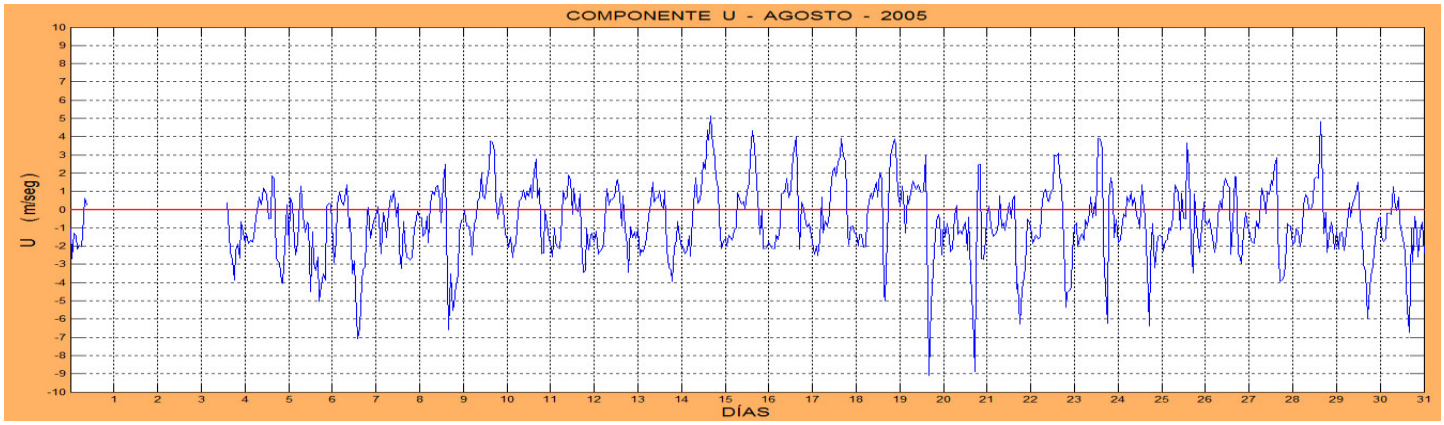

Figura 4.3c.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) del vector viento para el mes de agosto del año 2005.

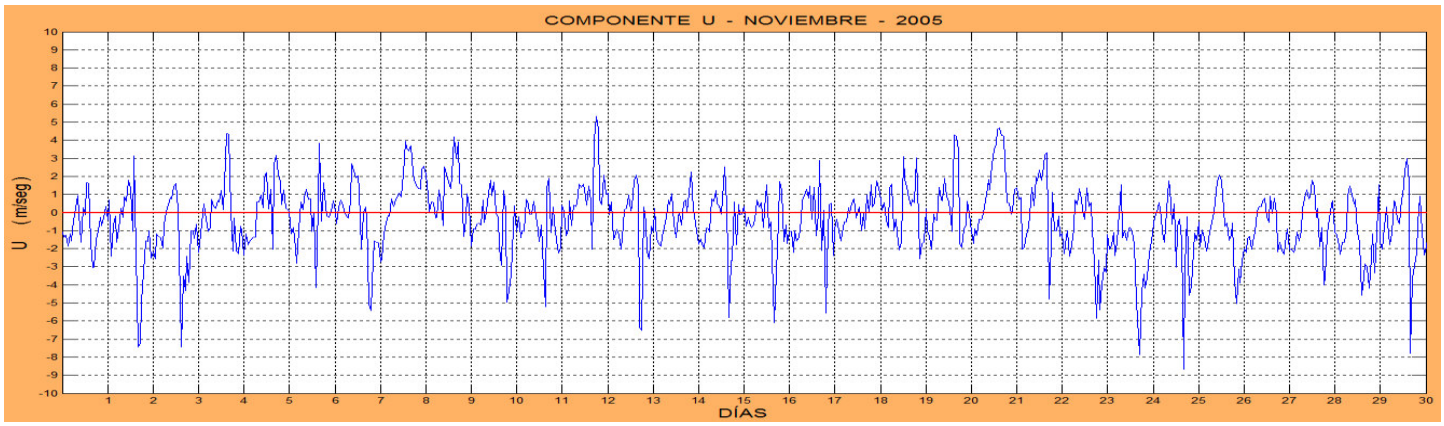

Figura 4.3d.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) del vector viento para el mes de noviembre del año 2005.

En las figuras 4.4 a, b, c, d se muestran las gráficas de las series temporales de los datos horarios de la componente meridional (V) del vector viento para los meses de febrero, abril, agosto, noviembre del año 2005, como ejemplo del conjunto de gráficos que se preparó para todos los meses del periodo 2000 – 2010, grafios que se incluyen en el **Anexo A.3.**

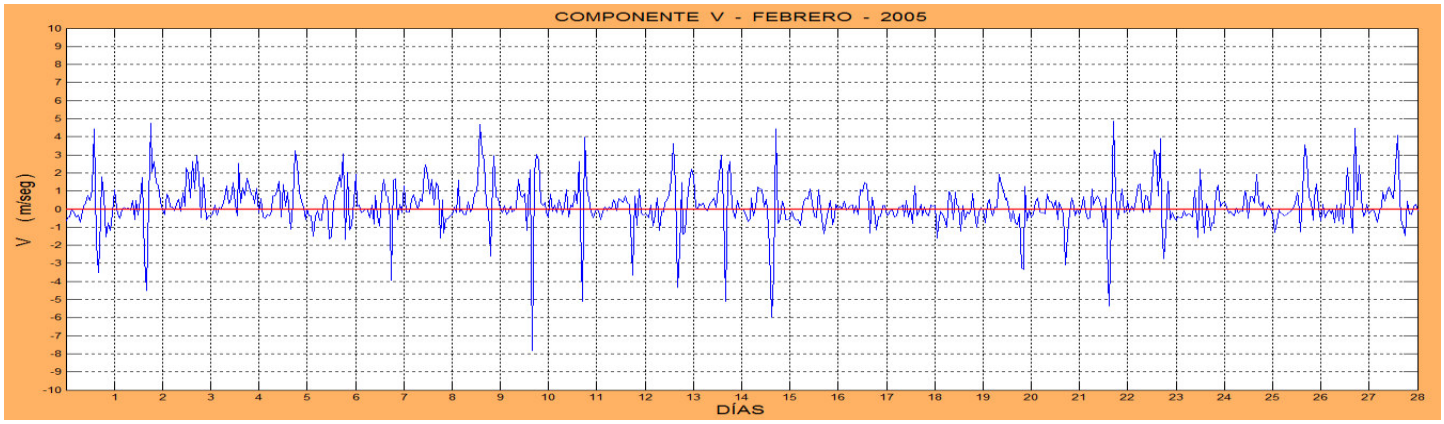

Figura 4.4a.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente meridional (V) del vector viento para el mes de febrero de año 2005.

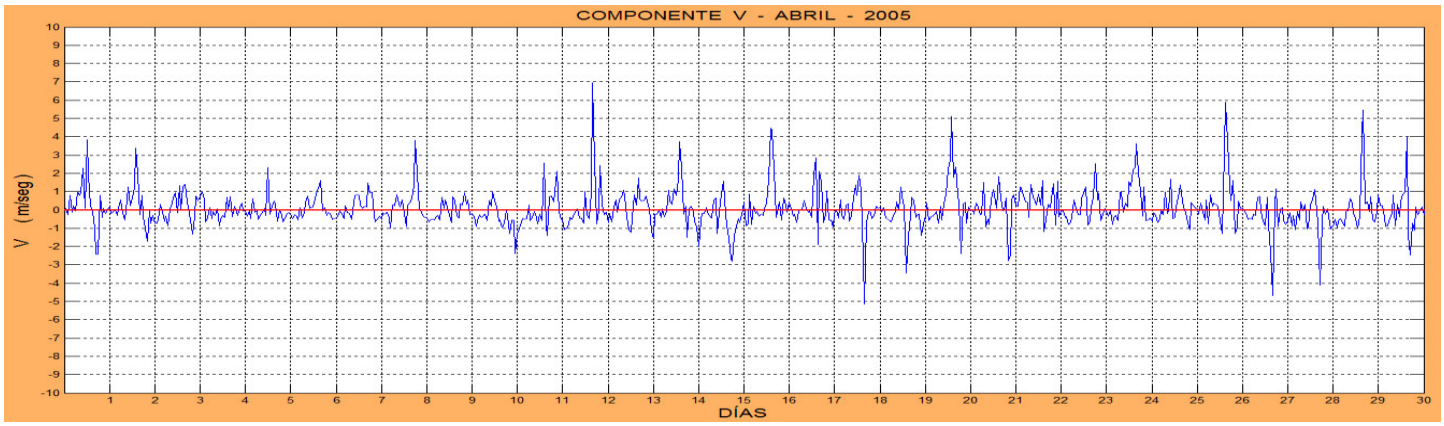

Figura 4.4b.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente meridional (V) del vector viento para el mes de abril de año 2005.

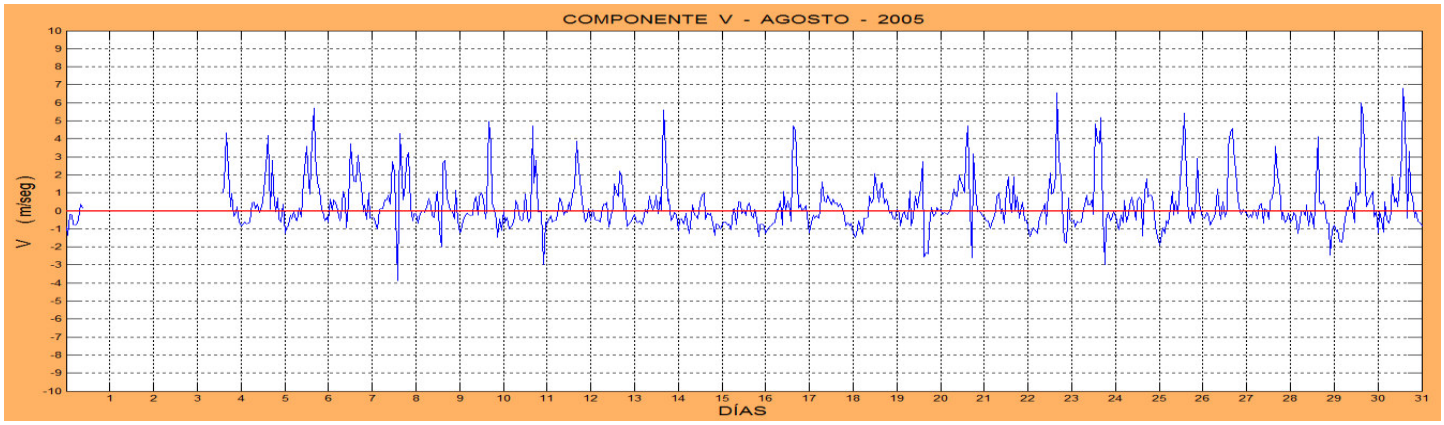

Figura 4.4c.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente meridional (V) del vector viento para el mes de agosto de año 2005.

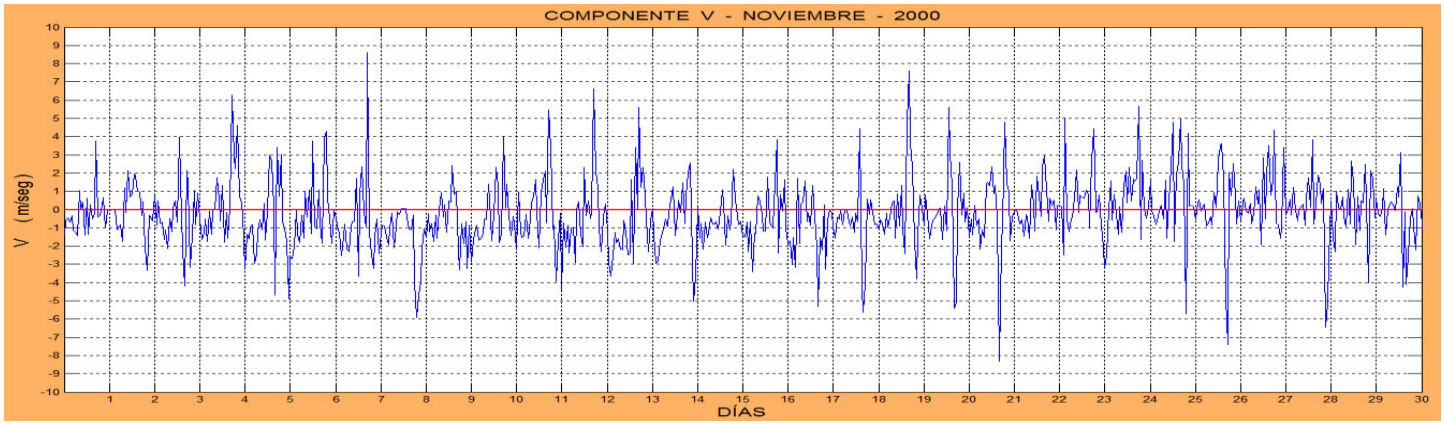

Figura 4.4d.- Gráfica de la serie temporal de los datos horarios de la componente meridional (V) del vector viento para el mes de noviembre del año 2005.

4.2 Ciclo diurno del vector viento, de la magnitud, de la componente zonal y meridional.

En la figura 4.5 se muestra el resultado del cálculo del ciclo diurno, promedio multidiario y multianual de los datos horarios del vector viento. Se muestra dos ciclos, el segundo repetido del primero, para una mejor interpretación de los cambios de la magnitud y dirección del viento durante las 24 horas.

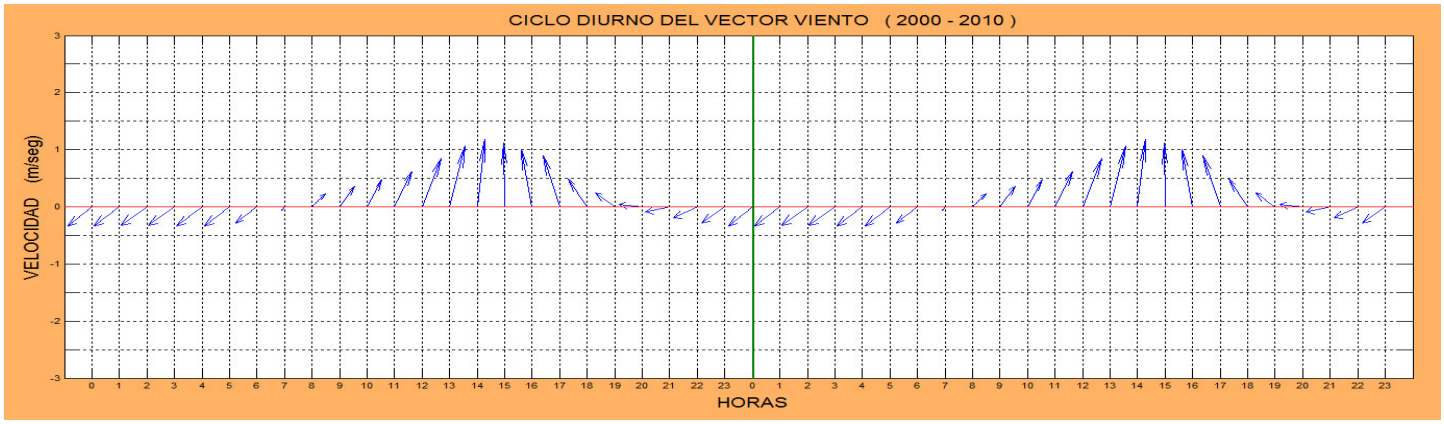

Figura 4.5.- Gráfica del resultado del cálculo del ciclo diurno - promedio multidiario y multianual de datos horarios del vector viento.

En la figura 4.6 se muestra el resultado del cálculo del ciclo diurno, promedio multianual de datos horarios de la magnitud del vector viento. Se muestra dos ciclos, el segundo repetido del primero, para una mejor interpretación de los cambios de la magnitud del vector viento durante las 24 horas.

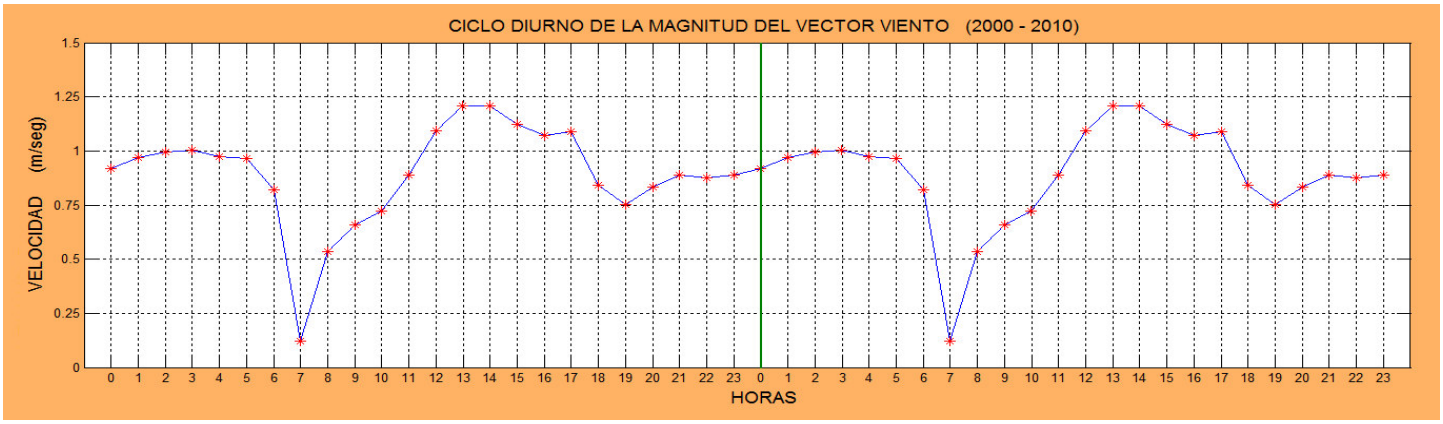

Figura 4.6.- Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo diurno - promedio multidiario y multianual de datos horarios de la magnitud del vector viento.

En la figura 4.7 se muestra el resultado del cálculo del ciclo diurno, promedio multianual de datos horarios de la componente zonal (U) del vector viento. Se muestra dos ciclos, el segundo repetido del primero, para una mejor interpretación de los cambios de la magnitud del vector viento durante las 24 horas.

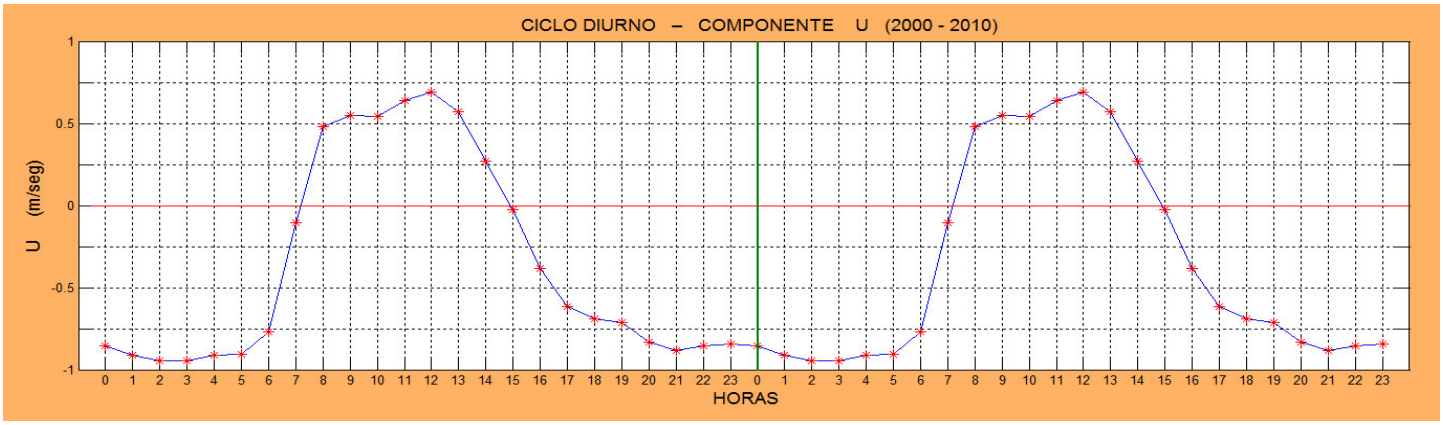

Figura 4.7.- Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo diurno - promedio multidiario y multianual de datos horarios de la componente zonal (U).

En la figura 4.8 se muestra el resultado del cálculo del ciclo diurno, promedio multianual de datos horarios de la componente meridional (V) del vector viento. Se muestra dos ciclos, el segundo repetido del primero, para una mejor interpretación de los cambios de la magnitud del vector viento durante las 24 horas.

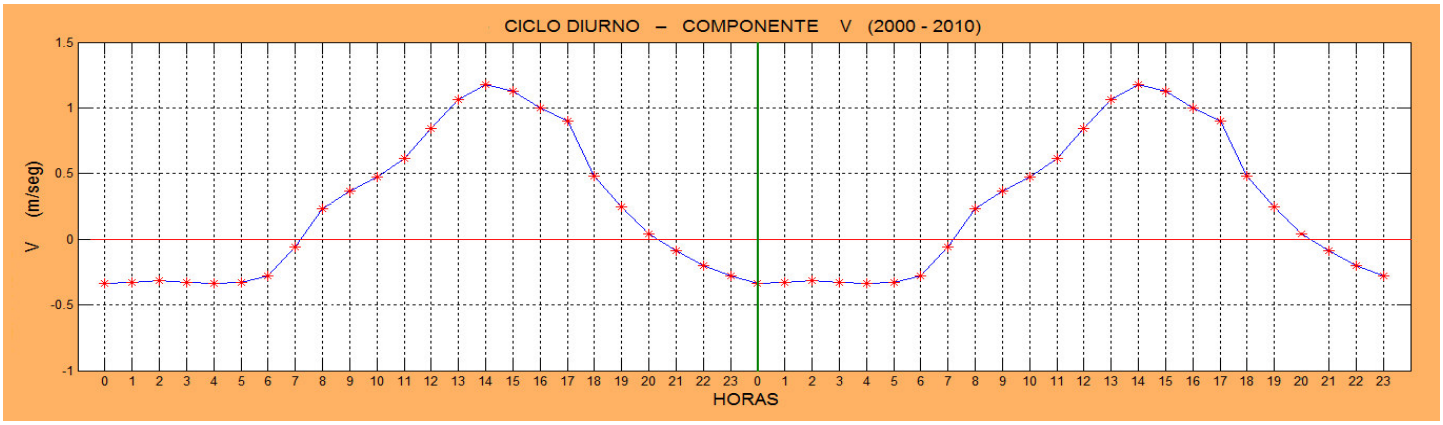

Figura 4.8.- Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo diurno - promedio multidiario y multianual de datos horarios de la componente meridional

Las características del ciclo diurno del vector viento son que durante la noche y madrugada a partir de las 19 horas la magnitud se incrementa ligeramente hasta las 03 horas y a partir de 04 horas empieza a disminuir, llegando a un valor mínimo a las 07 horas y durante estas horas la dirección del viento es del NE. Durante el día y a partir de las 08 horas la magnitud se incrementa hasta las 13 horas y a partir de las 14 horas se inicia el descenso hasta las 19 horas. La dirección del viento en las primeras horas del día es de NE y va cambiando del NE a del S hasta 15 horas y luego va cambiando del S a del SE. Los mayores valores de la magnitud del viento se observa entre las 13 y 14 horas con valores de 1.24 m/s aproximadamente.

Las características del ciclo diurno de la componente zonal del vector viento son que a las 07 horas la dirección de los vientos zonales cambia de negativo (de este a oeste) a positivo (de oeste a este). Desde las 08 horas hasta las 15 horas los vientos zonales son de oeste a este y desde las 16 horas hasta las 07 horas los vientos zonales son de este a oeste.

Las características del ciclo diurno de la componente meridional del vector viento son que a las 07 horas la dirección de los vientos meridionales cambia de negativo (de norte a sur) a positivo (de sur a norte). Desde las 08 horas hasta las 20 horas, en el día, los vientos meridionales son de sur a norte y desde las 21 horas hasta las 07 horas, en la noche, los vientos meridionales son de norte a sur.

Para propósitos de la distribución horaria y descripción del concepto de madrugada, mañana, tarde y noche, se utilizara el grafico sectorizado que se muestra en la figura 4.9 y tabla 4.

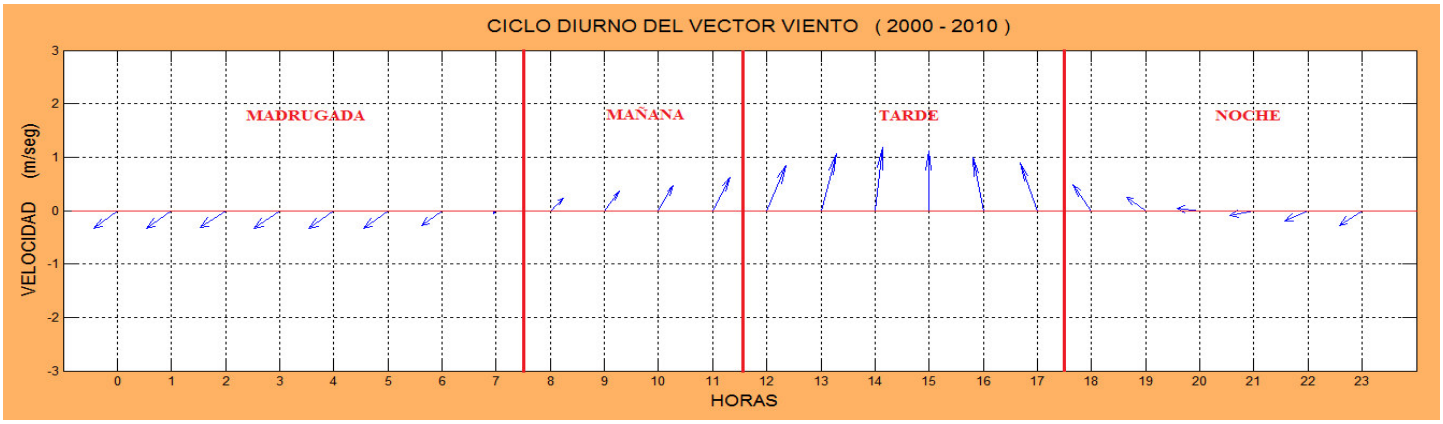

Figura 4.9.- Sectorización de la distribución horaria del ciclo diurno.

Tabla 4. Distribución horaria de la madrugada, mañana, tarde y noche.

Madrugada	**Mañana**	**Tarde**	**Noche**
00 : 00 - 07 : 00 Horas	08 : 00 - 11 : 00 Horas	12 : 00 - 17 : 00 Horas	18 : 00 - 23 : 00 Horas

La distribución horaria de la madrugada y mañana se basa en el cambio de dirección del viento de NE a SO entre 07 y 08 hrs; el segmento tarde agrupa los vientos más intensos del día; el segmento noche agrupa los vientos entre 18 y 23 hrs.

Los cambios bruscos de la velocidad y dirección de los vientos no necesariamente están relacionados con los campos de gradiente de presión, sino con las características geográficas, tales como colinas, montañas y valles, como es el caso del cambio de velocidad y dirección a las 7 am del vector viento. El calentamiento diurno y el enfriamiento nocturno en las laderas de las montañas producen el cambio de noche-día del viento. Como se indicó en el marco teórico, estos vientos se denominan brisas de montaña y brisas de valle. En el ciclo diurno de los datos observados, estos vientos (brisas) están presentes y son parte de los vientos de mesoescala y son vientos débiles. En la noche estos vientos vienen del NE y durante el día vienen del SO. Durante el día se registran los vientos son más intensos principalmente entre las 13 y 14 horas. Estos vientos están compuestos de vientos de mesoescala y vientos de escala sinóptica que vienen del SE.

4.3 Variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud, componente zonal y meridional del vector viento

Con el propósito de visualizar mejor la variabilidad interdiaria de la variación diurna, se procedió a suavizar los gráficos de las figuras 4.2, 4.3, y 4.4 (a, b, c, d). Para el suavizado de estos gráficos se utilizó el método de la media móvil de 4 horas**.** A continuación se muestra el suavizado de la magnitud del vector, de la componente U y de la componente V del viento para un mes representativo de la estación de verano, de otoño, de invierno y de primavera del año 2005.

En la figura 4.10a se muestra el resultado del suavizado de la figura 4.2a en el que se puede visualizar con mayor claridad la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud del vector viento durante el mes de febrero de 2005, como ejemplo del conjunto de los gráficos obtenidos para todos los meses del periodo 2000 – 2010.

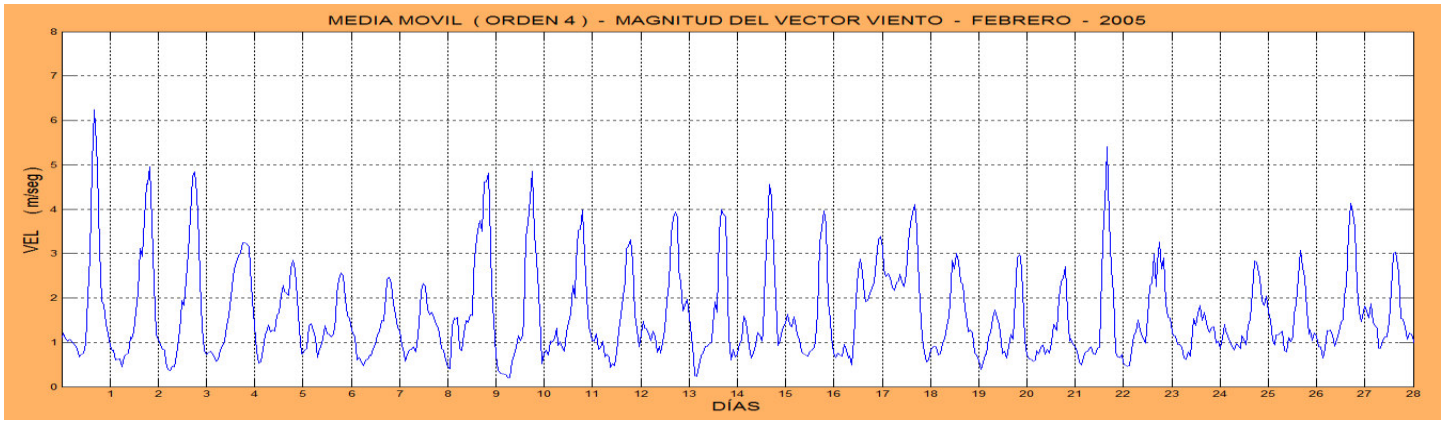

Figura 4.10a.- Suavizado de la figura 4.2a de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud del vector viento para el mes de febrero del año 2005.

En la figura 4.10b se muestra el resultado del suavizado de la figura 4.3a en el que se puede visualizar con mayor claridad de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente zonal (U) del vector viento durante el mes de febrero de 2000, como ejemplo del conjunto de los gráficos obtenidos para todos los meses del periodo 2000 – 2010.

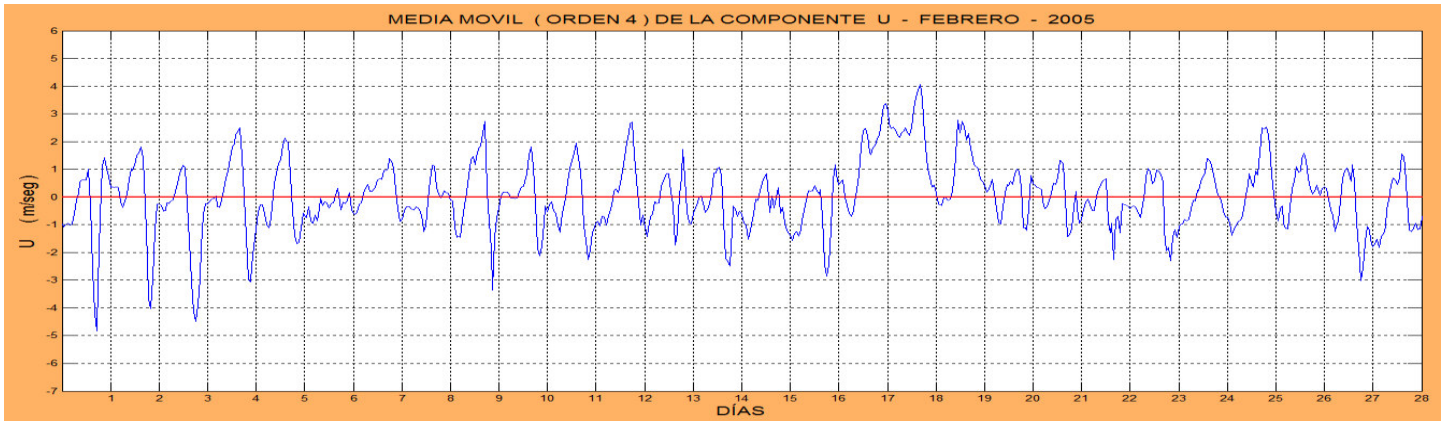

Figura 4.10b.- Suavizado de la figura 4.3a de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente zonal del vector viento para el mes de febrero del año 2005.

En la figura 4.10c se muestra el resultado del suavizado de la figura 4.4a en el que se puede visualizar con mayor claridad la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la

componente meridional (V) del vector viento durante el mes de febrero de 2005, como ejemplo del conjunto de los gráficos obtenidos para todos los meses del periodo 2000 – 2010.

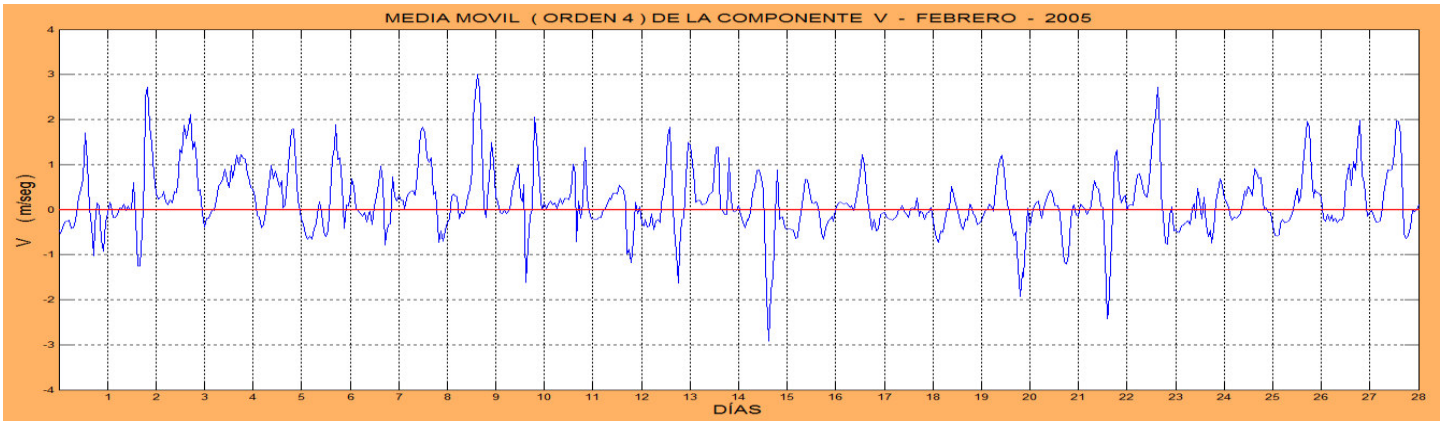

Figura 4.10c.- Suavizado de la figura 4.4a de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente meridional del vector viento para el mes de febrero del año 2005.

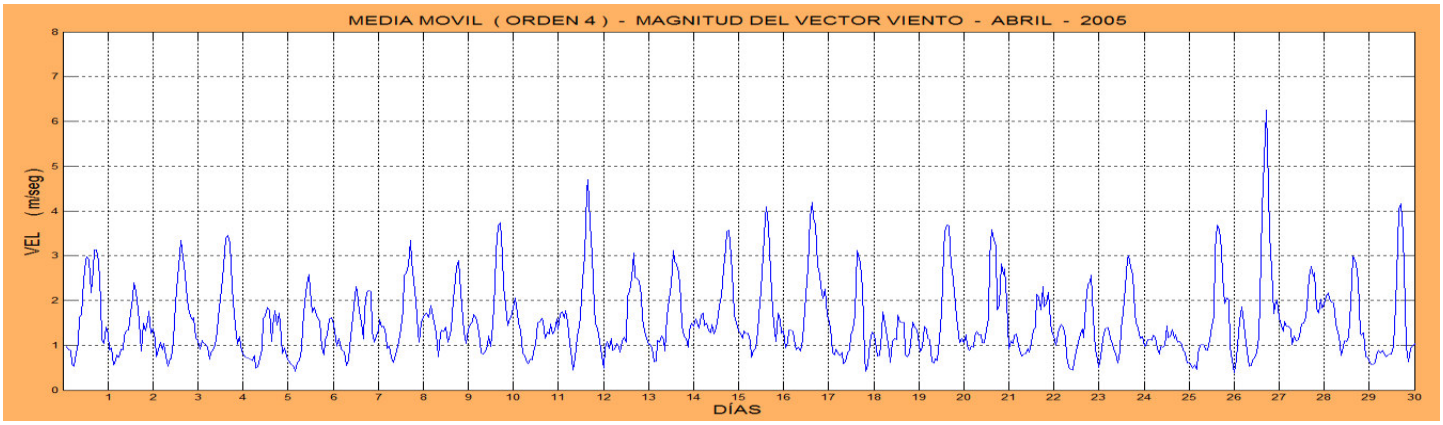

Figura 4.11a.- Suavizado de la figura 4.2b de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud del vector viento para el mes de abril del año 2005.

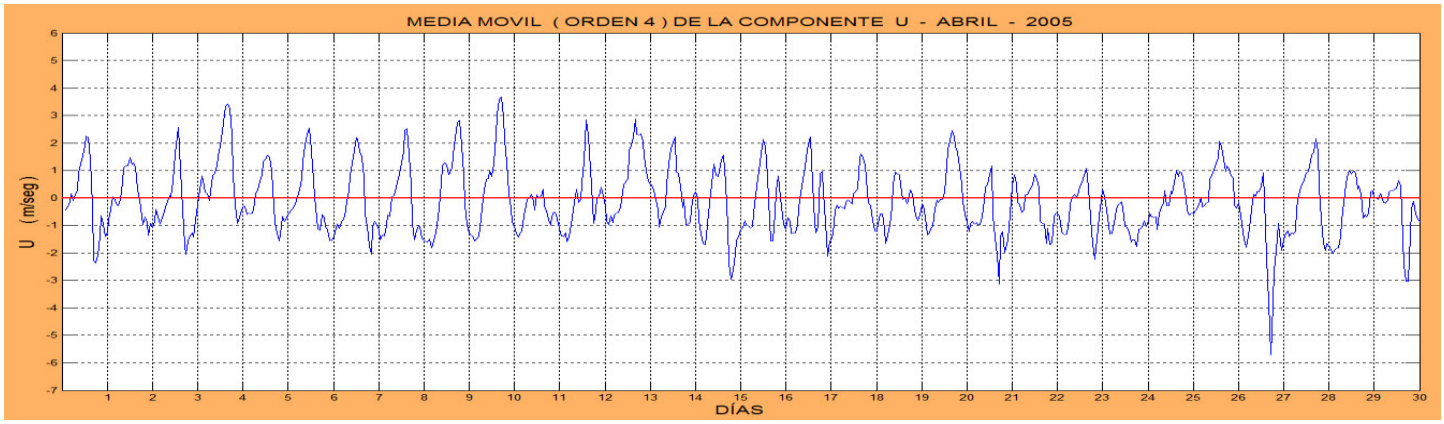

Figura 4.11b.- Suavizado de la figura 4.3b de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente zonal del vector viento para el mes de abril del año 2005.

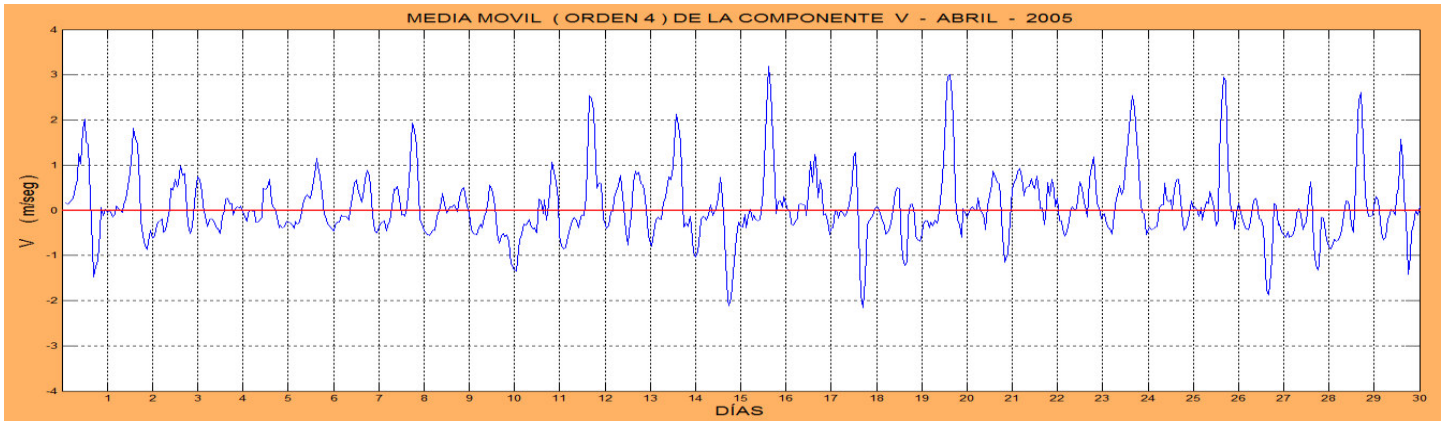

Figura 4.11c.- Suavizado de la figura 4.4b de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente meridional del vector viento para el mes de abril del año 2005.

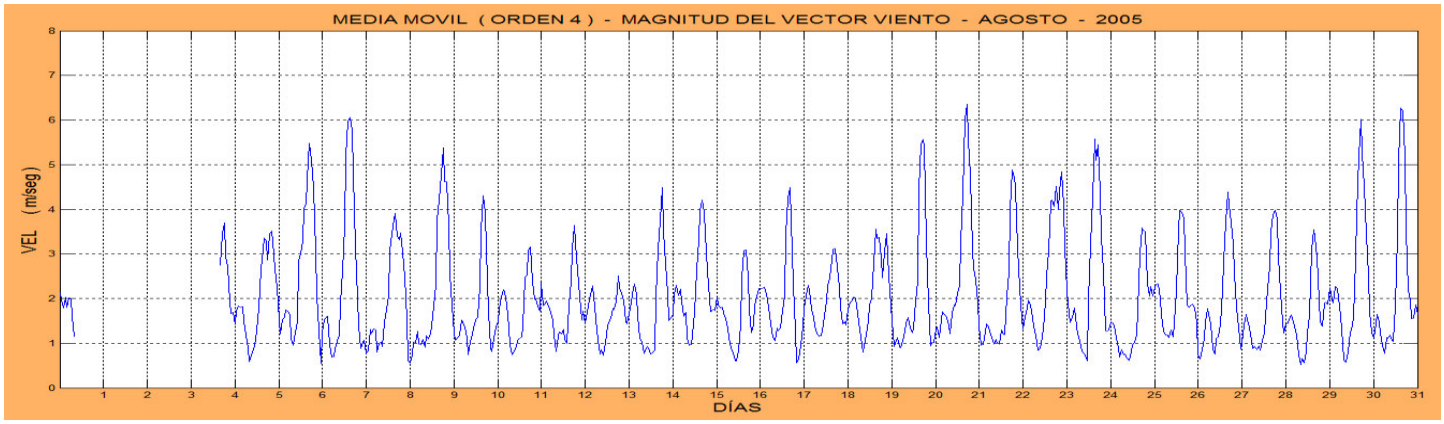

Figura 4.12a.- Suavizado de la figura 4.2c de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud del vector viento para el mes de agosto del año 2005.

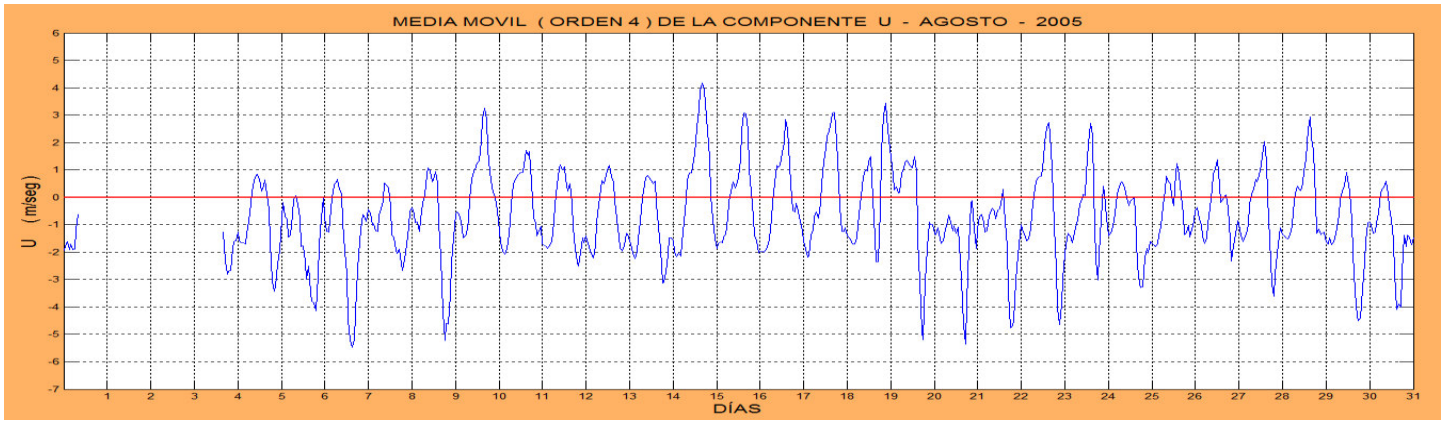

Figura 4.12b.- Suavizado de la figura 4.3c de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente zonal del vector viento para el mes de agosto del año 2005.

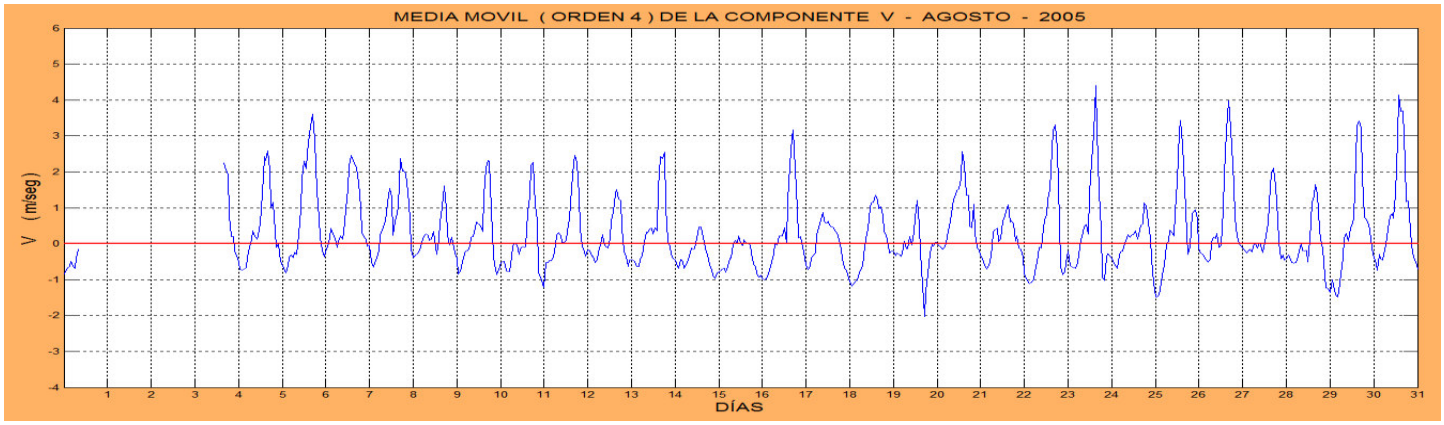

Figura 4.12c.- Suavizado de la figura 4.4c de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente meridional del vector viento durante el mes de agosto de 2005.

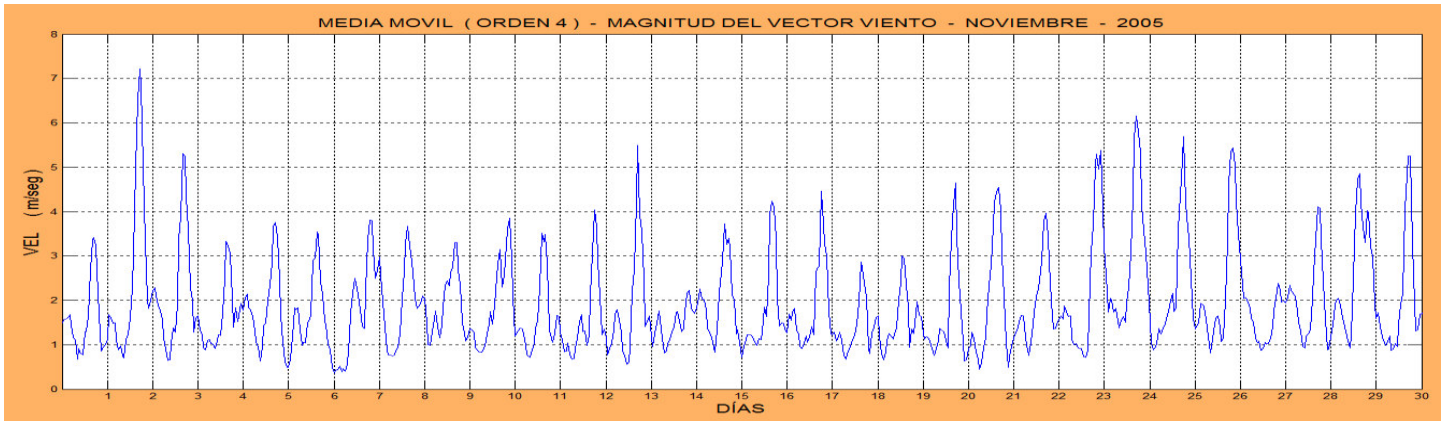

Figura 4.13a.- Suavizado de la figura 4.2d de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la magnitud del vector viento para el mes de noviembre del año 2005.

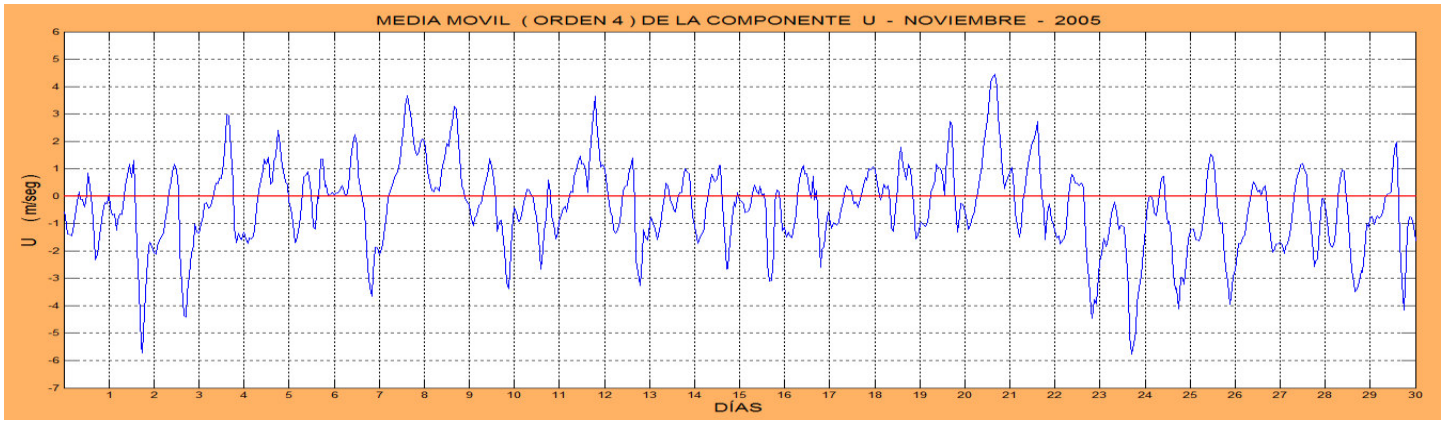

Figura 4.13b.- Suavizado de la figura 4.3d de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente zonal del vector viento para el mes de noviembre del año 2005.

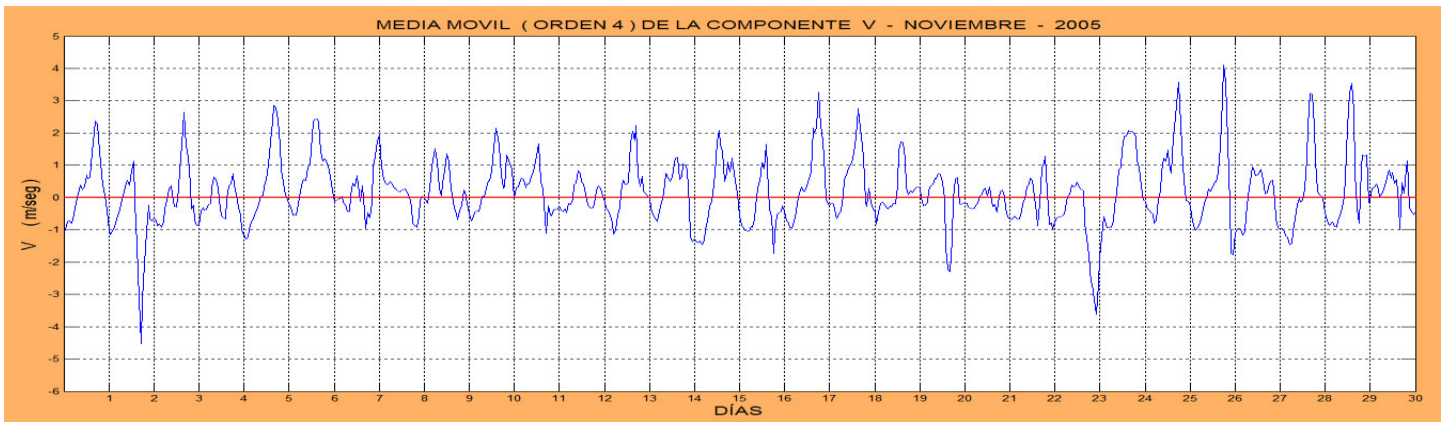

Figura 4.13c.- Suavizado de la figura 4.4d de la variabilidad interdiaria de la variación diurna de la componente meridional del vector viento durante el mes de noviembre de 2005.

Los vientos superficiales registrados en el Observatorio de Huancayo, tanto la intensidad o magnitud como la dirección muestran un comportamiento cíclico con periodos de 24 horas. Este comportamiento está relacionado con el forzamiento térmico de la atmósfera por la radiación solar. Los vientos están forzados por el gradiente de presión. Como el gradiente de presión está relacionado directamente por el gradiente de temperatura, podemos decir que los vientos están forzados por el gradiente de temperatura. La radiación solar tiene una variación diurna. Durante el día, la intensidad de la radiación solar se va incrementando desde el amanecer, crepúsculo matutino, hasta aproximadamente el medio día y luego desciende hasta

el crepúsculo vespertino. En la noche la intensidad de la radiación solar es nula. Como consecuencia, la atmosfera se calienta durante el día y se enfría durante la noche. Este comportamiento de la radiación solar y la respuesta de la atmosfera dan origen a la presencia de los vientos con una variación cíclica de 24 horas. Los vientos cambian de intensidad y dirección también con un periodo de 24 horas. Sin embargo, las características de los cambios de intensidad y dirección del viento en las 24 horas varían de un día a otro, como puede verse en las figuras 4.1 a, b, c, d, e, f, g, h. Las causas de las variaciones de las características de la intensidad y dirección de los vientos no solo se debe a los cambios del forzamiento térmico, si no también dependen de otros factores como la presencia de nubes y las lluvias que impiden la llegada de la radiación solar directamente a la superficie de la tierra, y principalmente debido a la presencia de las brisas de montaña y de valle originados por las características geográficas locales. Los cambios de la variación diurna de un día otro también se puede observar en las componentes zonal y meridional del vector viento.

La variación diurna de los vientos en la zona central oeste del valle del rio Mantaro está asociada con el sistema del gradiente de presión de escala sinóptica - vientos alisios, y vientos de mesoescala – brisas de montaña, En el caso de las características del ciclo diurno de la magnitud del vector viento, se observa en los gráficos que se muestra en las figuras 4.2 a, b, c, d, que el comportamiento diurno es más uniforme que en el caso del vector viento. Lo mismo ocurre con las características del ciclo diurno de las componentes zonal (U) y meridional (V), figuras 4.3 y 4.4 (a, b, c, d). Existe, sin embargo diferencias entre el comportamiento de la componente zonal y meridional. La variación diurna de la componente zonal es ligeramente más uniforme que la componente meridional.

Como se puede visualizar en las figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13 (a, b, c, d), la amplitud y las características de la variación diurna son distintas de un día a otro, de una semana a otra y de mes a otro. Los vientos son más intensos en el mes de agosto y menos intenso en el mes de abril.

4.4 Ciclo anual del vector viento, de la magnitud, de la componente zonal y meridional.

En la figura 4.14 se muestra el resultado del cálculo del ciclo anual del vector viento, iniciando con el mes de enero. Se muestra dos ciclos, el segundo repetido del primero, para

una interpretación completa de los cambios de la magnitud y dirección del viento durante los 12 meses.

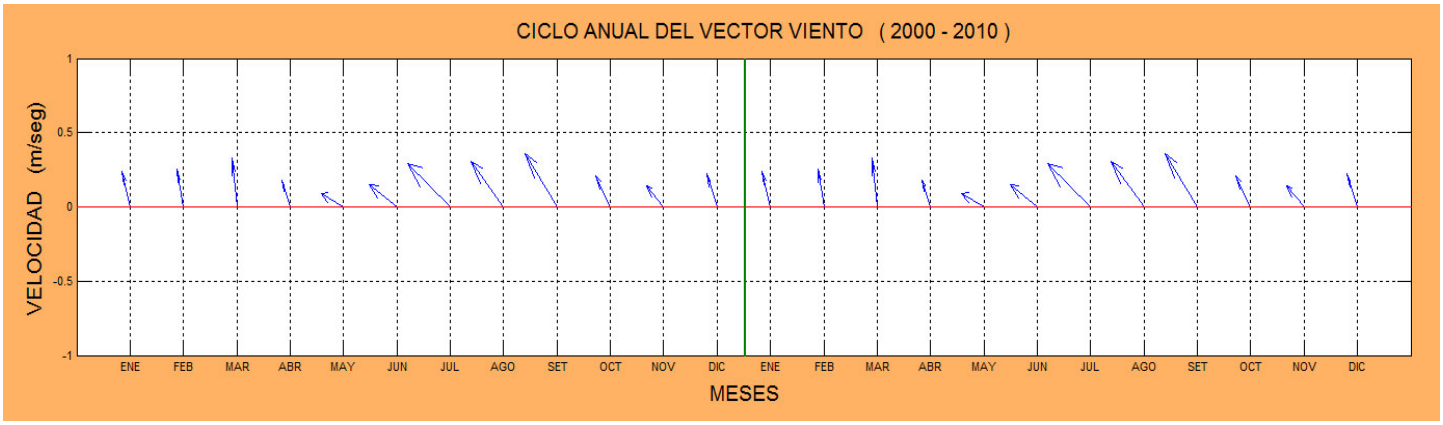

Figura 4.14 - Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo anual del vector viento, iniciando con el mes de enero.

En la figura 4.15 se muestra el resultado del cálculo del ciclo anual, de la magnitud del vector viento. Se muestra dos ciclos, el segundo repetido del primero, para una interpretación completa de los cambios de la magnitud del vector viento durante los 12 meses.

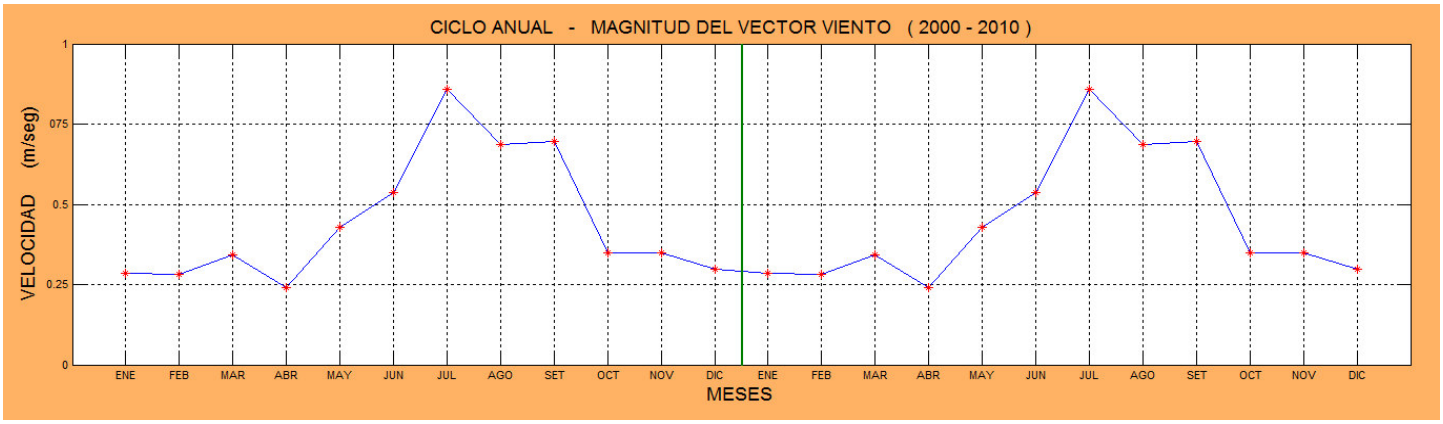

Figura 4.15.- Grafica que muestra el resultado del cálculo del ciclo anual de la magnitud del vector viento.

En la figura 4.16 se muestra el resultado del cálculo del ciclo anual de la componente zonal del vector viento. Se muestra dos ciclos, el segundo repetido del primero, para una interpretación completa de los cambios de la magnitud del vector viento durante los 12 meses.

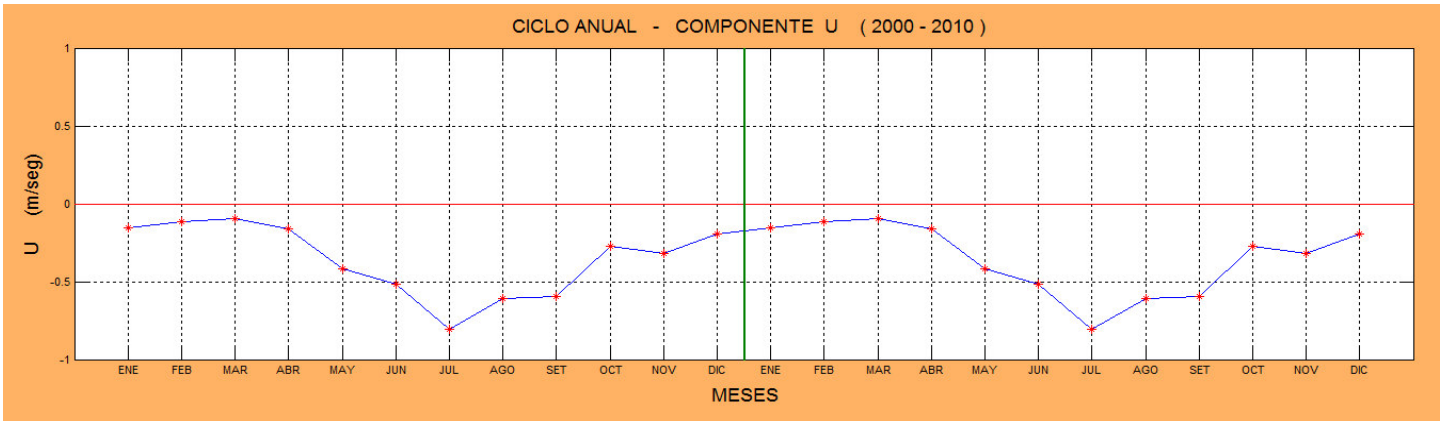

Figura 4.16.- Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo anual de la componente zonal (U) del vector viento.

En la figura 4.17 se muestra el resultado del cálculo del ciclo anual de la componente meridional (V) del vector viento. Se muestra dos ciclos, el segundo repetido del primero, para una interpretación completa de los cambios de la magnitud del vector viento durante los 12 meses.

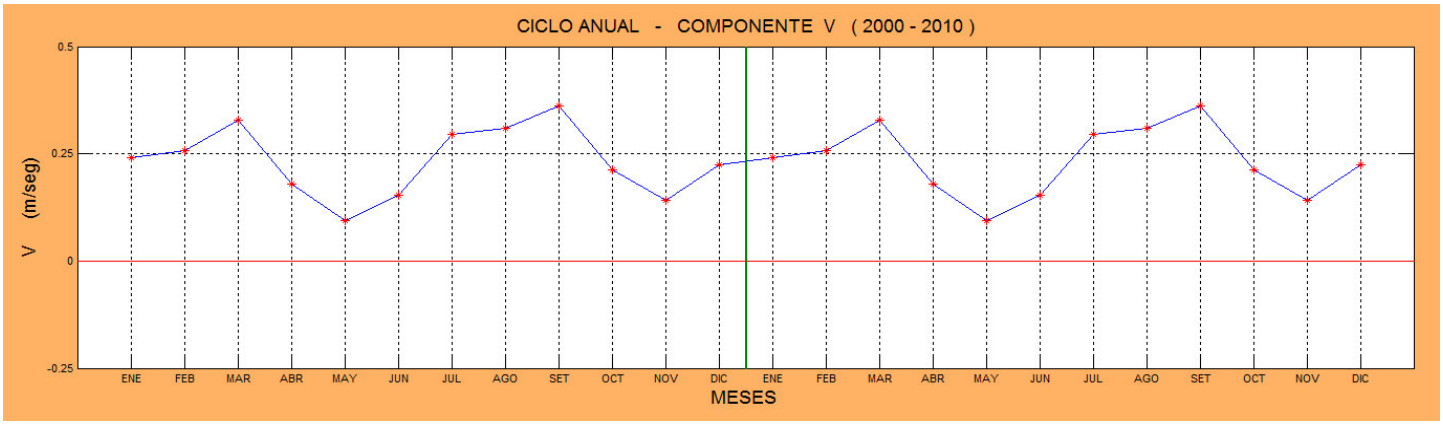

Figura 4.17.- Gráfica que muestra el resultado del cálculo del ciclo anual de la componente meridional (V) del vector viento.

La variación de los vientos en escala de tiempo de horas a días, variación horaria y diurna, se anulan entre sí. Estos vientos de mesoescala desaparecen y solo quedan los vientos sinópticos, de escala regional. Estos vientos sinópticos tienen una variación estacional, de intensidad y de dirección. En la estación de verano los vientos son más débiles y en la estación de invierno los vientos son más intensos. En la estación de verano la dirección de los vientos son de sur a norte y en la estación de invierno los vientos son de sureste a noroeste. Este comportamiento se muestra también en la magnitud del vector viento y en la componente zonal del vector viento. La componente meridional muestra dos máximos, en marzo y en setiembre, y dos mínimos, en mayo y noviembre.

4.5 Variabilidad interanual de la magnitud, de la componente zonal y meridional del vector viento.

En esta sección se describe las características de la variación interanual de la magnitud y de las componentes U y V del vector viento registradas en el Observatorio de Huancayo del IGP durante el periodo 2000 – 2010. Con el propósito de visualizar mejor las características de la variación interanual de los vientos, se procedió a suavizar los gráficos de cada variable utilizando el método de la media móvil de 30 días**.**

En la figura 4.18a se muestra la gráfica de la serie temporal de los datos promedios diarios de la magnitud del vector viento para el periodo 2000 – 2010.

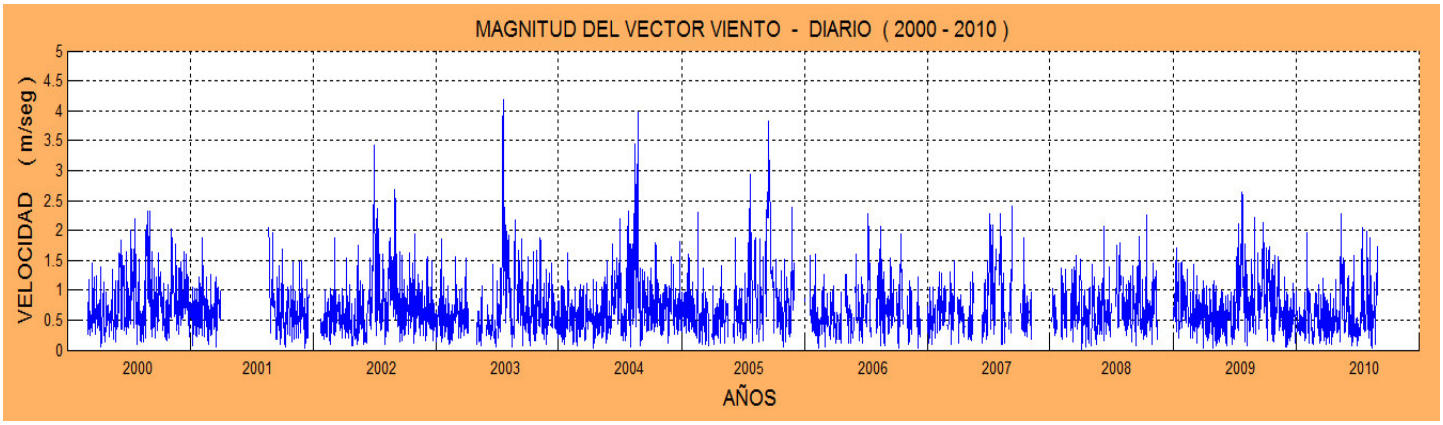

Figura 4.18a.- Gráfica que muestra la serie temporal de los datos promedios diarios de la magnitud del vector viento para el periodo 2000 – 2010.

En la figura 4.18b se muestra el resultado del suavizado de la figura 4.18a en el que se puede visualizar con mayor claridad la variación interanual de la magnitud del vector viento durante el periodo 2000 – 2010.



Figura 4.18b- Grafica del suavizado de la figura 4.18a

En la figura 4.19a se muestra la gráfica de la serie temporal de los datos promedios diarios de la componente zonal (U) del vector viento para el periodo 2000 – 2010.

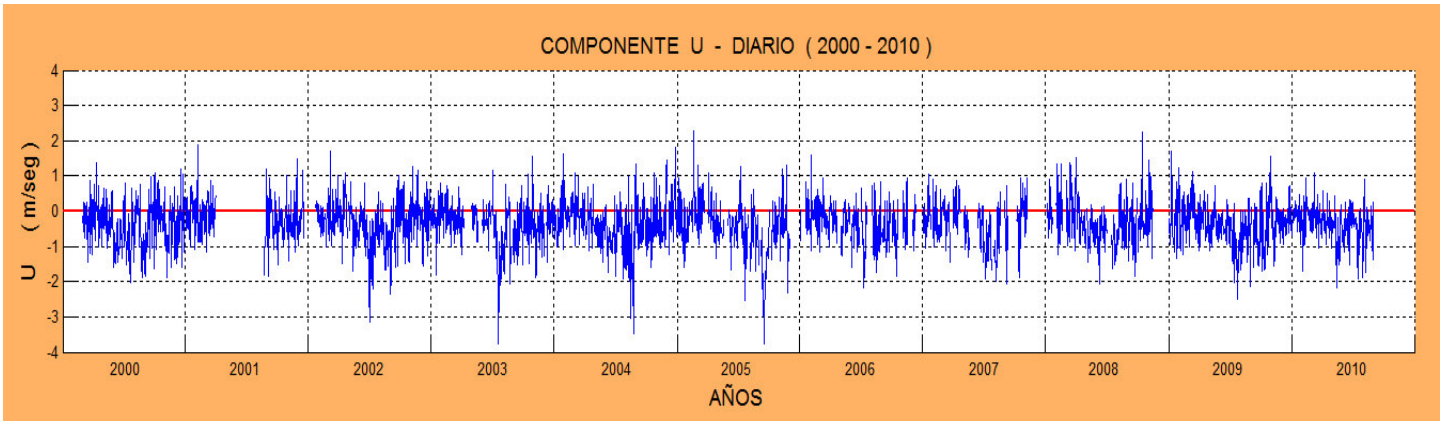

Figura 4.19a.- Gráfica que muestra la serie temporal de los datos promedios diarios de la componente zonal (U) del vector viento para el periodo 2000 – 2010.

En la figura 4.19b se muestra el resultado del suavizado de la figura 4.19a en el que se puede visualizar con mayor claridad la variación interanual de la componente zonal (U) del vector viento durante el periodo 2000 – 2010.



Figura 4.19b.- Grafica del suavizado de la figura 4.19a

En la figura 4.20a se muestra la gráfica de la serie temporal de los datos promedios diarios de la componente meridional (V) del vector viento para el periodo 2000 – 2010.

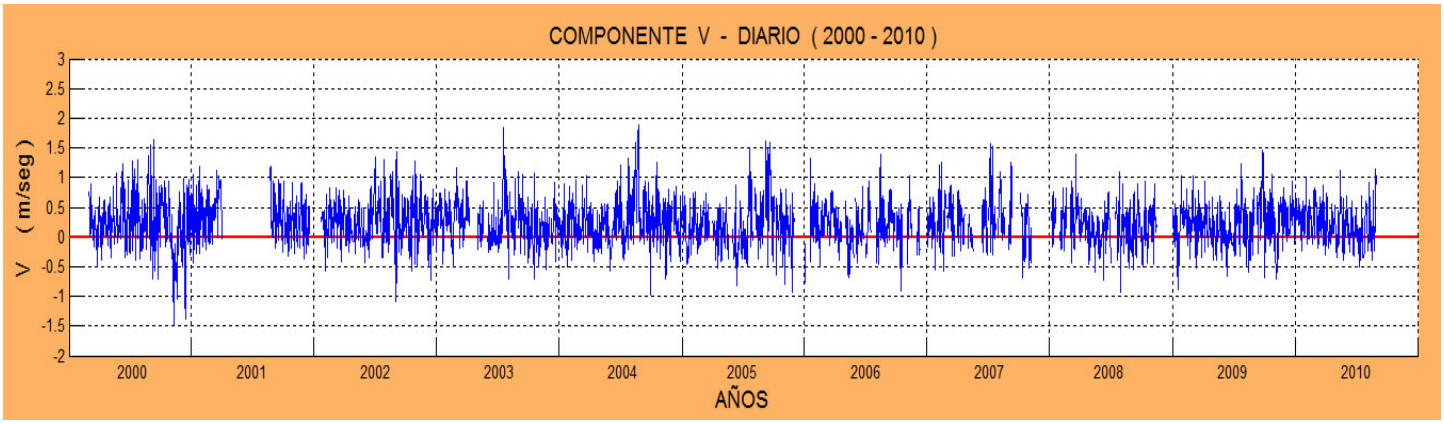

Figura 4.20a.- Gráfica que muestra la serie temporal de los datos promedios diarios de la componente meridional (V) del vector viento para el periodo 2000 – 2010.

En la figura 4.20b se muestra el resultado del suavizado de la figura 4.20a en el que se puede visualizar con mayor claridad la variación interanual de la componente meridional (V) del vector viento durante el periodo 2000 – 2010.



Figura 4.20b.- Grafica del suavizado de la figura 4.20ª.

Para tener una mejor visión del comportamiento vectorial interanual se graficaron las figuras 4.21a y 4.21b, utilizando los datos mensuales.

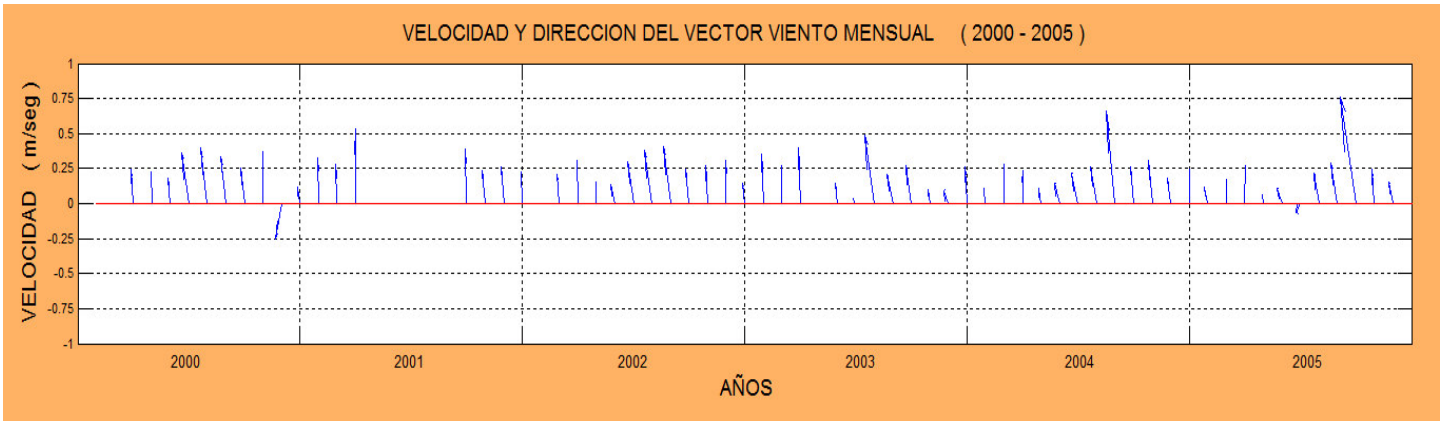

Figura 4.21a.- Gráfica que muestra la variabilidad interanual de la variación anual de la intensidad y dirección del viento para los años 2000-2005.

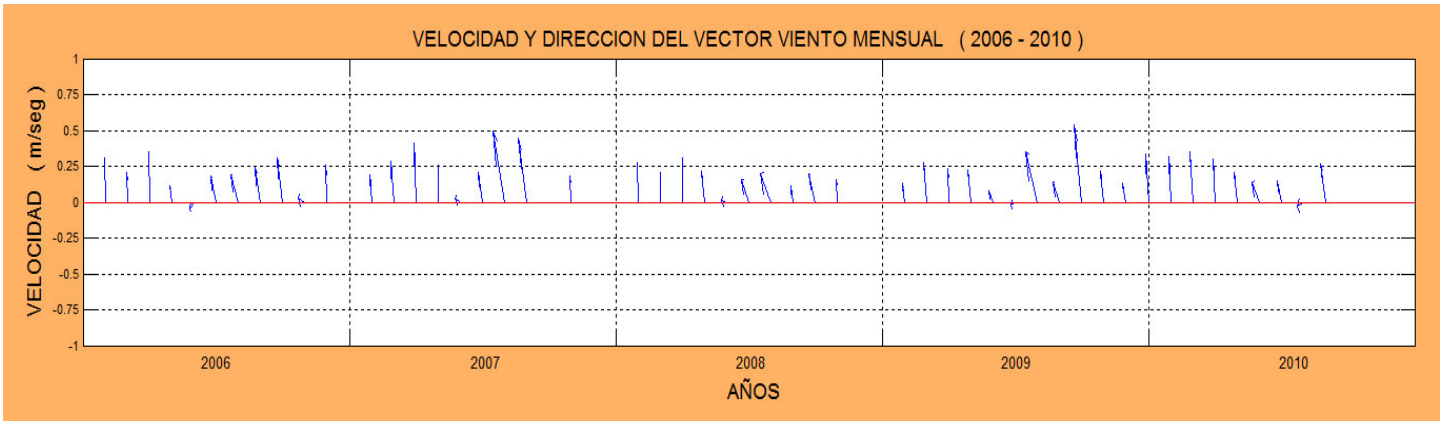

Figura 4.21b.- Gráfica que muestra la variabilidad interanual de la variación anual de la intensidad y dirección del viento para los años 2006-2010.

Los gráficos de las figuras 4.18b, 4.19b y 4.20b muestran con claridad la variabilidad interanual de la variación anual de la magnitud, de la componente zonal y componente meridional del vector viento. Las características de la variación anual de algunos años son semejantes, los años 2000, 2002, 2003, 2004, 2005, 2007 y 2009, mientras que el resto de los años son ligeramente diferentes. Particularmente, en los años 2003, 2004 y 2005 existen meses con vientos fuertes. Estos vientos fuertes se manifiestan también en las componentes zonal y meridional. En la componente zonal, el año 2005 tiene el mes más intenso, mientras que en la componente meridional los años que tienen meses más intensos son 2004 y 2005.

Normalmente la dirección de la componente meridional durante todos los años es de sur a norte, pero en los últimos meses del año 2000 la dirección cambio y es de norte a sur. Otra manera de visualizar la variabilidad interanual del viento es utilizando los promedios mensuales.

Las figuras 4.21 a y b, muestra la variabilidad interanual de la variación anual del vector viento-intensidad y dirección del viento, que permite identificar los meses de los años anómalos. Por ejemplo, el mes de noviembre del año 2000 y junio del 2005, la dirección del viento es opuesto al de un año normal. En los meses de agosto de 2004 y setiembre de 2005 los vientos son los más intensos del periodo de registro.

4.6 Anomalías de la magnitud, componente zonal y meridional del vector viento

Las figuras 4.22, 4.23 y 4.24 muestran las anomalías de la variabilidad interanual de la magnitud, de la componente zonal y componente meridional del vector viento, que permite identificar los meses y los años anómalos. Por ejemplo, el mes de setiembre de 2005 se registró anormalmente los vientos más intensos del periodo de registro, vientos que se manifiestan en la magnitud del vector viento y en la componente zonal.

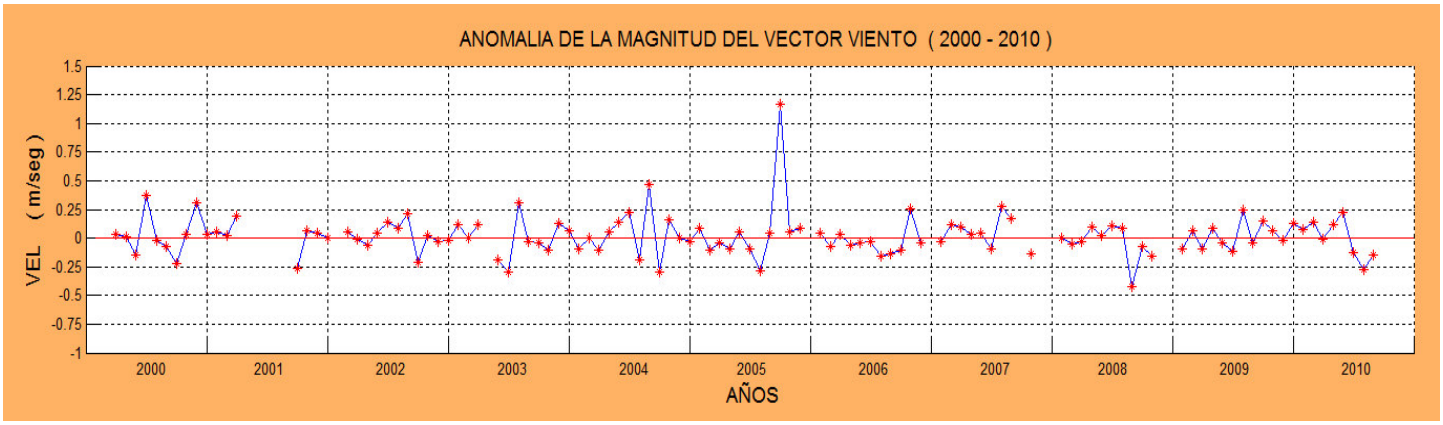

Figura 4.22.- Grafica que muestra las anomalías de la magnitud del vector viento.

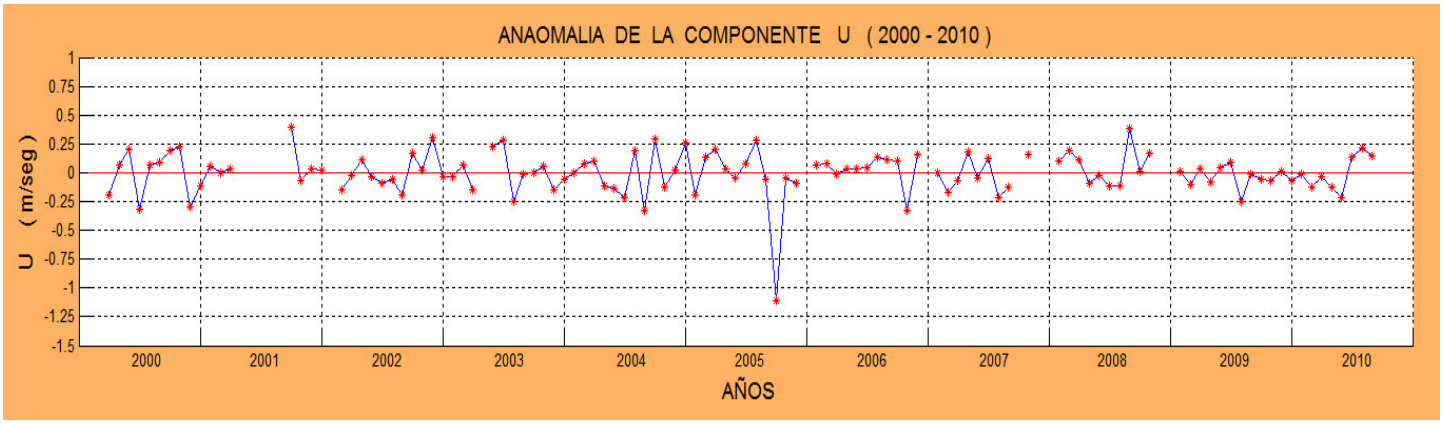

Figura 4.23.- Gráfica que muestra las anomalías de la componente zonal del vector viento.



Figura 4.24.- Gráfica que muestra las anomalías de la componente meridional del vector viento.

4.7 Rosa de vientos

4.7.1 Rosa de vientos del ciclo diurno

Para describir las características de los vientos en términos del porcentaje de ocurrencia de los vientos con determinada velocidad y dirección utilizaremos la tabla 3 y las figuras 2.5 y 2.6.

En las figuras del 4.25a al 4.25 e, presentamos los resultados de rosa de vientos utilizando los datos horarios de todo el periodo de registro estratificados en 4 periodos, madrugada, mañana, tarde y noche del día, ver tabla 4, y el resultado de la rosa de vientos utilizando horarios de todo el periodo de registro.

La figura 4.25a muestra el resultado para el periodo 00:00 – 00:07; la figura 4.25b muestra el resultado para el periodo 08:00 - 11:00; la figura 4.25c muestra el resultado para el periodo 12:00 -17:00; la figura 4.25d muestra el resultado para el periodo 18:00 - 23:00; y la figura 4.25e muestra el resultado para el periodo 00:00 - 23:00.

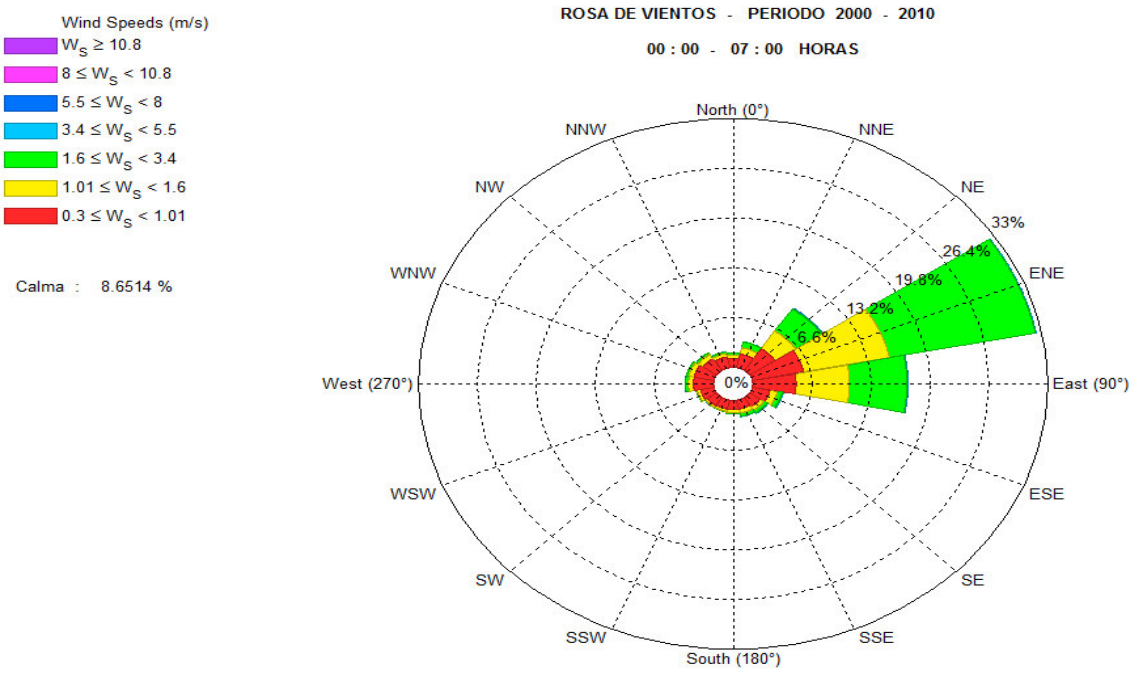

Figura 4.25a.- Gráfico que muestra el resultado de la rosa de vientos utilizando los datos horarios de todo el periodo de registro de la madrugada en el rango de 00:00 – 07:00.

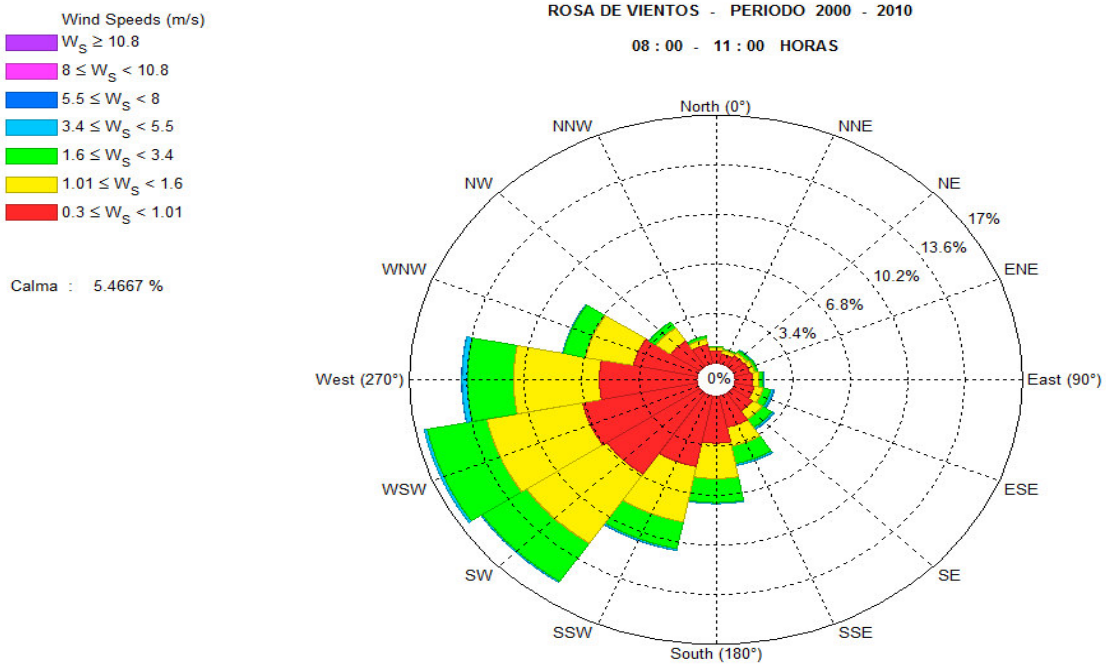

Figura 4.25b.- Gráfico que muestra el resultado de la rosa de vientos utilizando los datos horarios de todo el periodo de registro de la madrugada en el rango de 08:00 – 11:00.

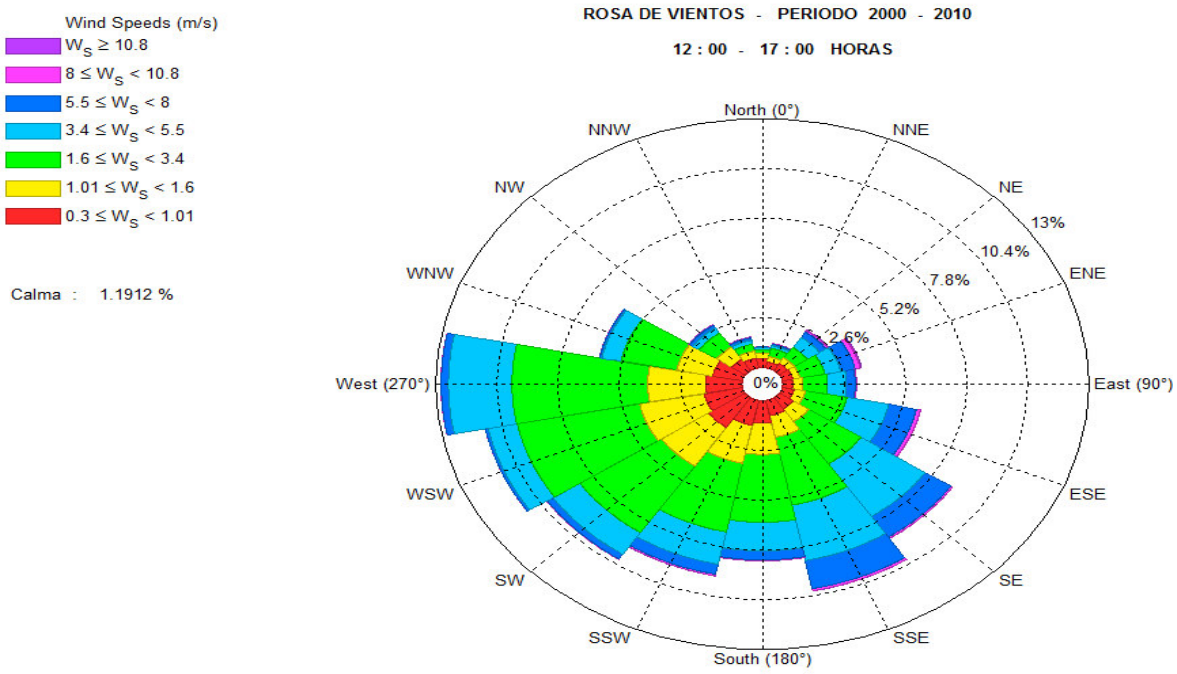

Figura 4.25c.- Gráfico que muestra el resultado de la rosa de vientos utilizando los datos horarios de todo el periodo de registro de la madrugada en el rango de 12:00 – 17:00.

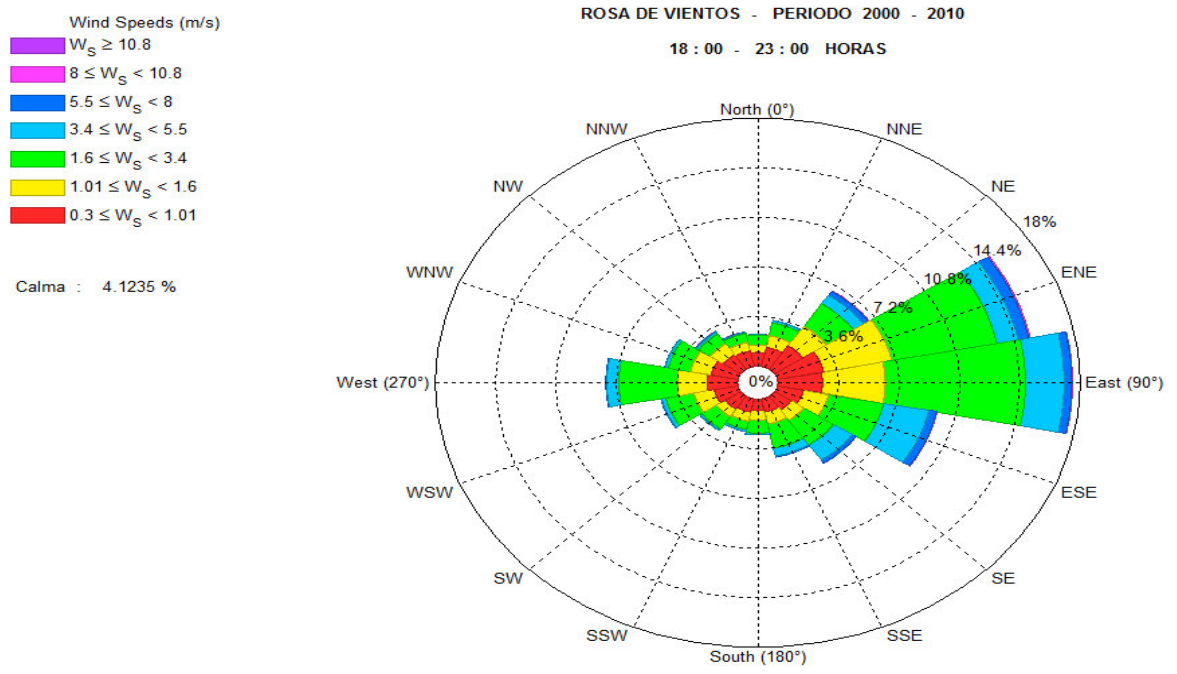

Figura 4.25d.- Gráfico que muestra el resultado de la rosa de vientos utilizando los datos horarios de todo el periodo de registro de la madrugada en el rango de 18:00 – 23:00.

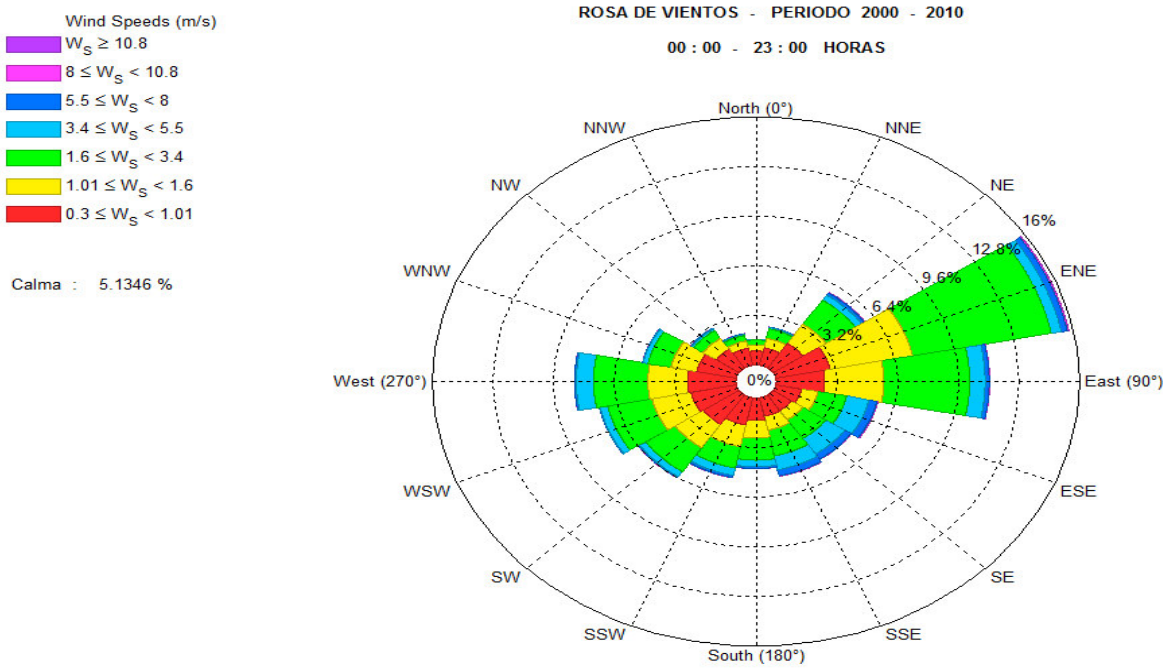

Figura 4.25e.- Gráfico que muestra el resultado de la rosa de vientos utilizando los datos horarios de todo el periodo de registro para las 24 horas

Tabla 5. Resumen de la dirección de los vientos predominantes observados en las Rosas de Vientos para el periodo de las 24 horas del ciclo diurno.

Periodo: 2000 - 2010	**Madrugada**	**Mañana**	**Tarde**	**Noche**	**Todo el Día**
Dirección Predominante	ENE	WSW – SW - W	W – WSW - SSE	E – ENE	ENE - E

4.7.2 Rosa de vientos del ciclo estacional utilizando promedios horarios

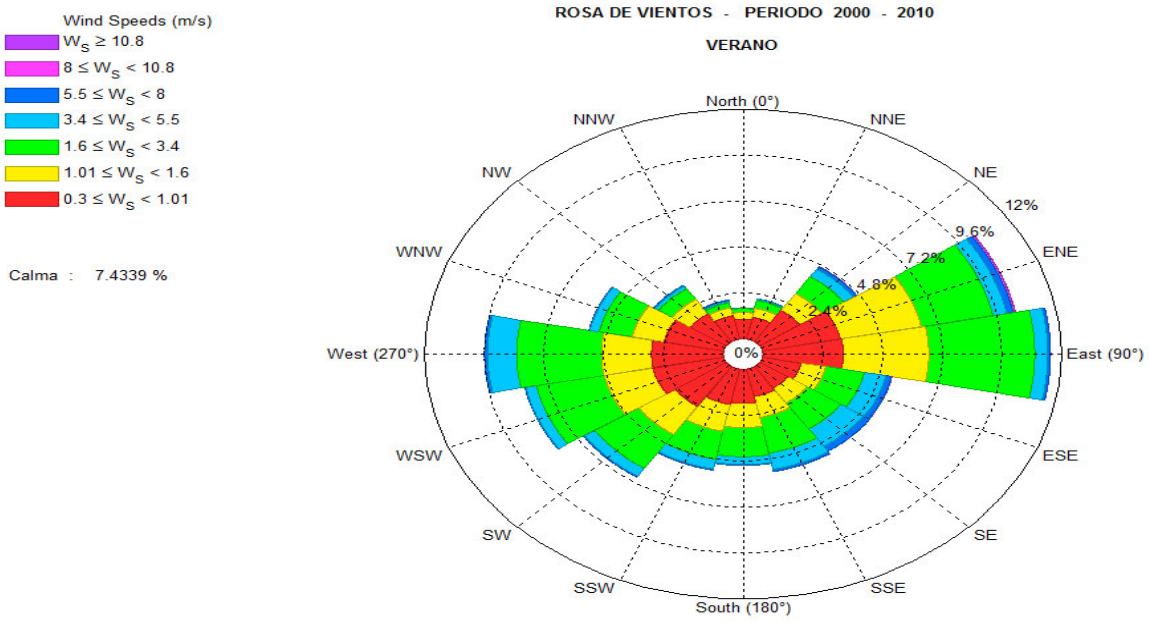

Figura 4.26a.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios horarios de los meses de verano.

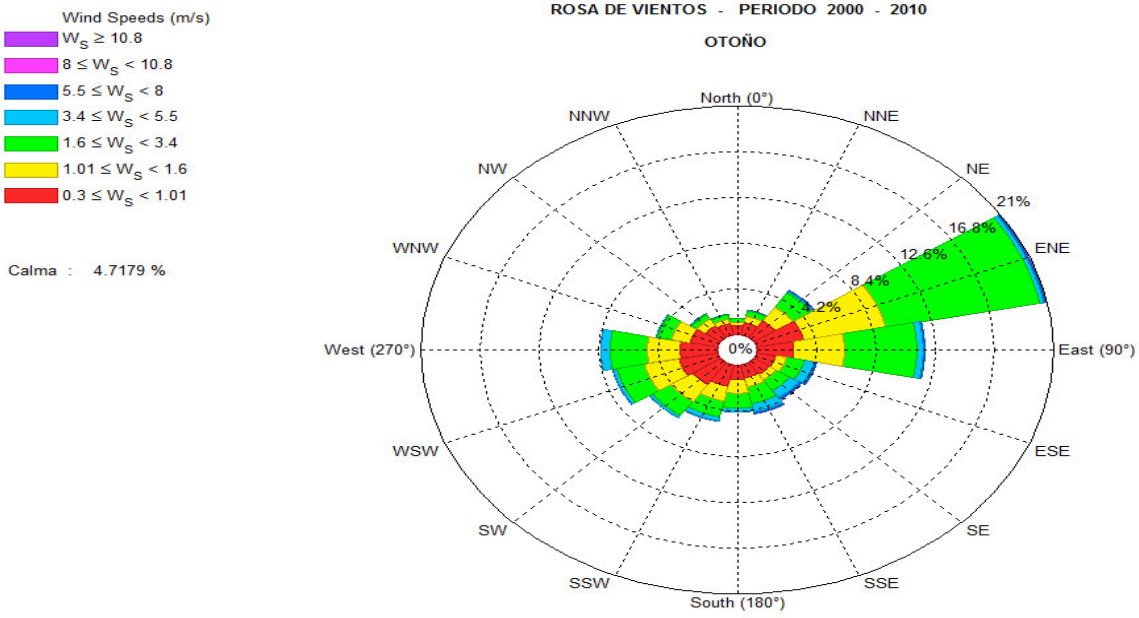

Figura 4.26b.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios horarios de los meses de otoño

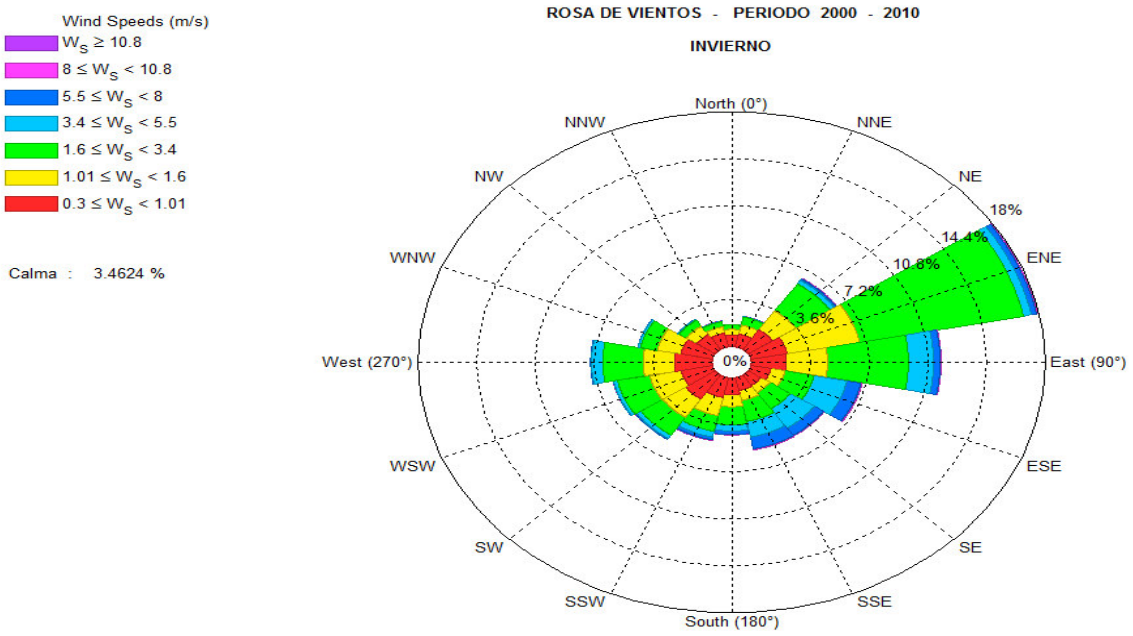

Figura 4.26c.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios horarios de los meses de invierno.

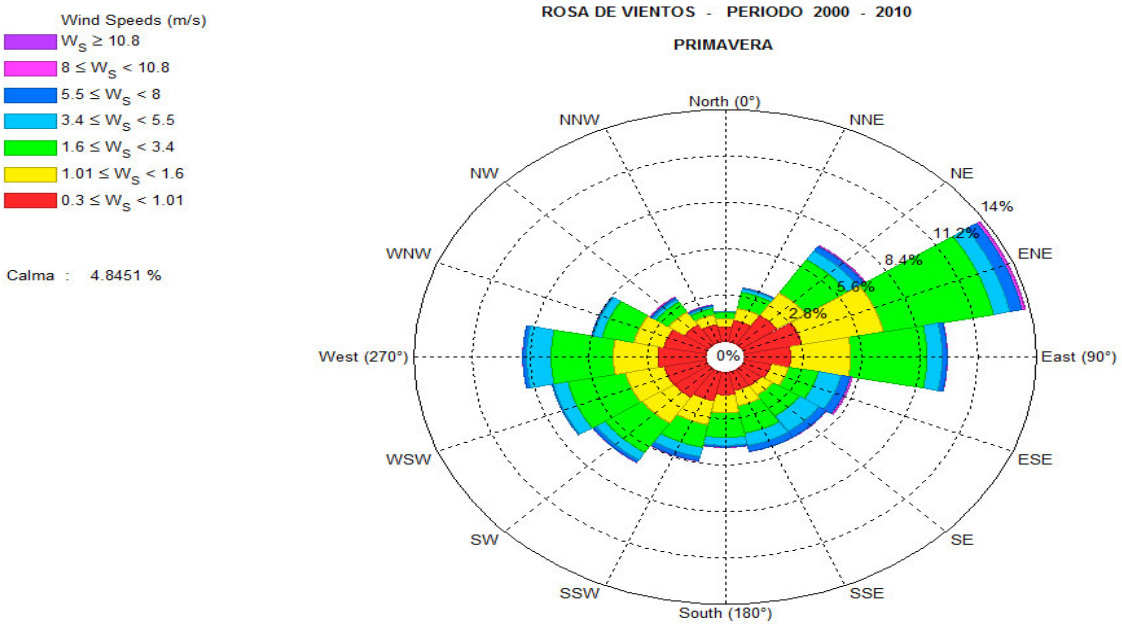

Figura 4.26d.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios horarios de los meses de primavera

Tabla 6. Resumen de la dirección de los vientos predominantes observados en las Rosas de Vientos utilizando promedios horarios para las 4 estaciones del año.

Periodo: 2000 – 2010	**Verano**	**Otoño**	**Invierno**	**Primavera**
Dirección Predominante	E - ENE – W	ENE	ENE - E	ENE – E

4.7.3 Rosa de vientos del ciclo estacional utilizando promedios diarios

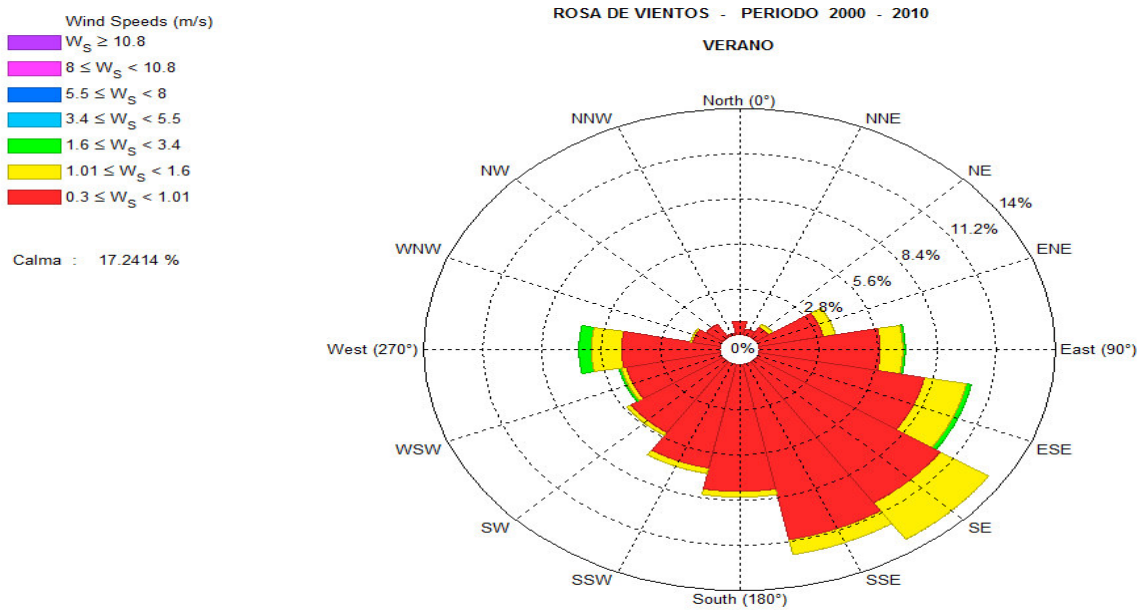

Figura 4.27a.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios diarios de los meses de verano

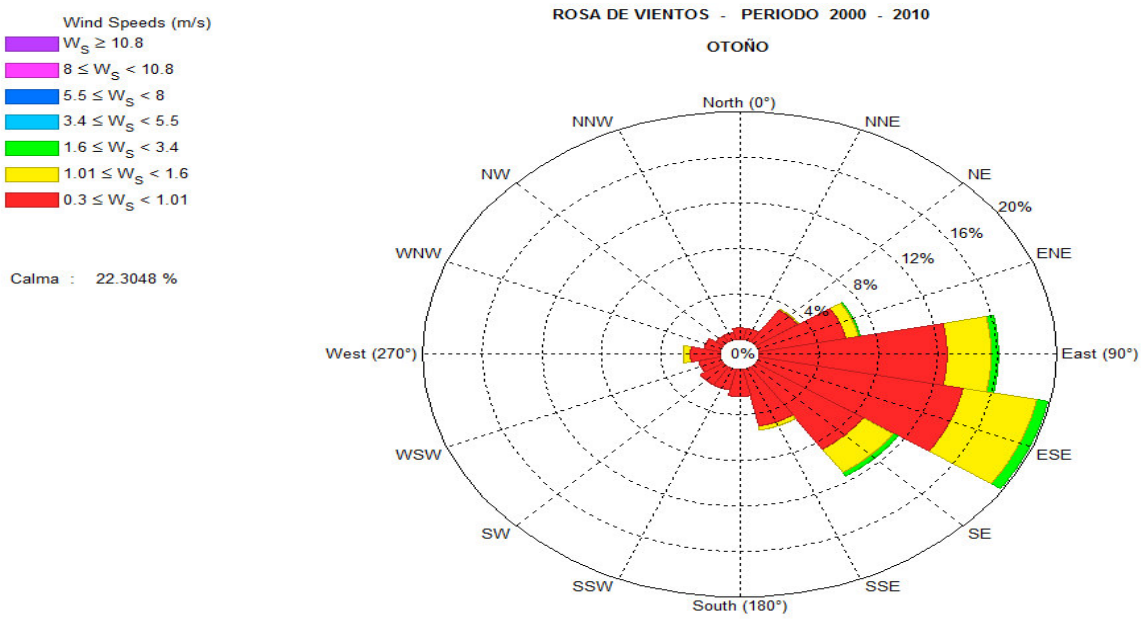

Figura 4.27b.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios diarios de los meses de otoño

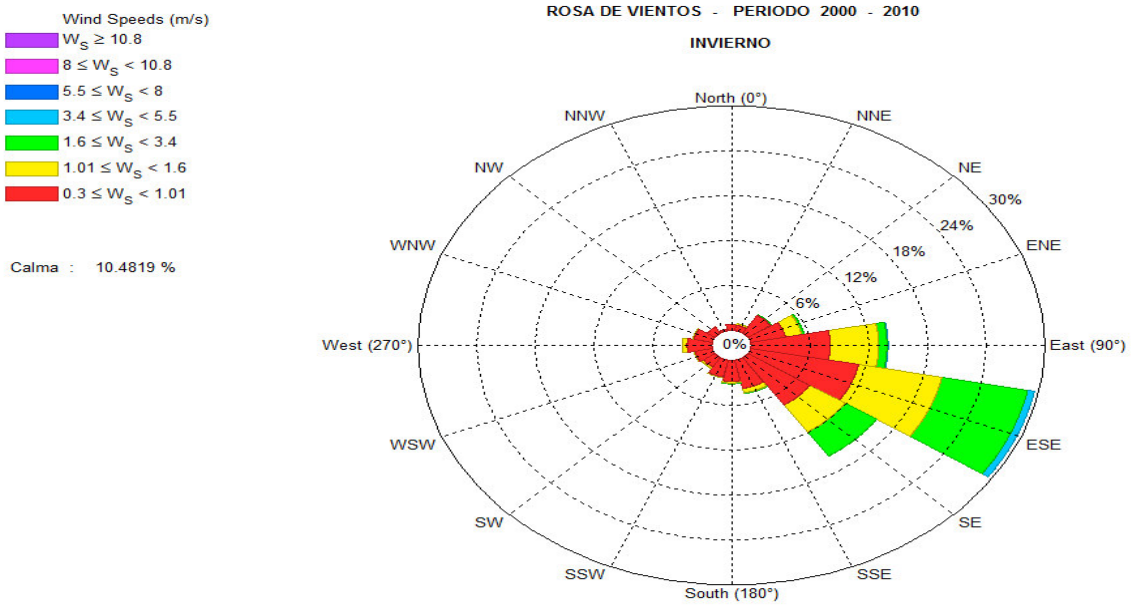

Figura 4.27c.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios diarios de los meses de invierno

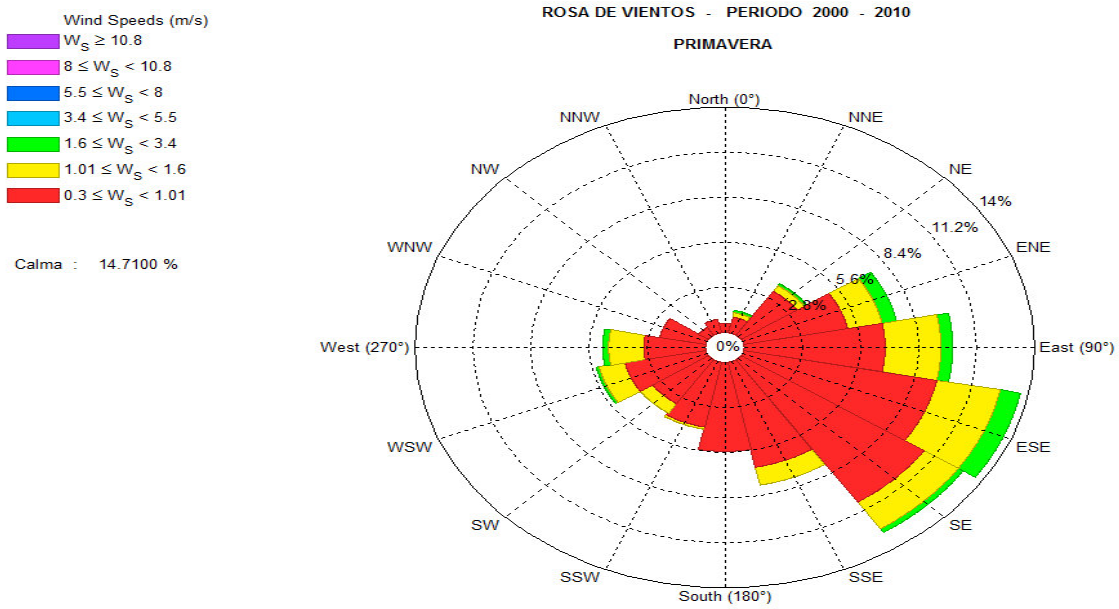

Figura 4.27d.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios diarios de los meses de primavera

Tabla 7. Resumen de la dirección de los vientos predominantes observados en las Rosas de Vientos utilizando promedios diarios para las 4 estaciones del año.

Periodo: 2000 – 2010	**Verano**	**Otoño**	**Invierno**	**Primavera**
Dirección Predominante	SE - SSE - ESE	ESE - E	ESE	ESE - SE - E

4.7.4 Rosa de vientos del ciclo estacional utilizando los promedios mensuales

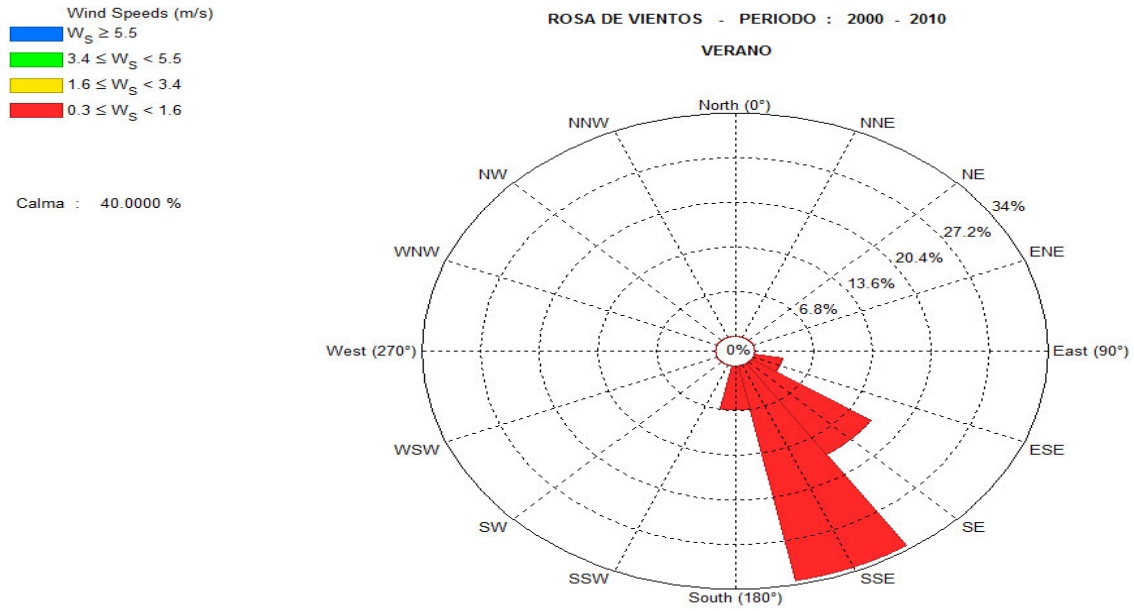

Figura 4.28a.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios mensuales de los meses de verano

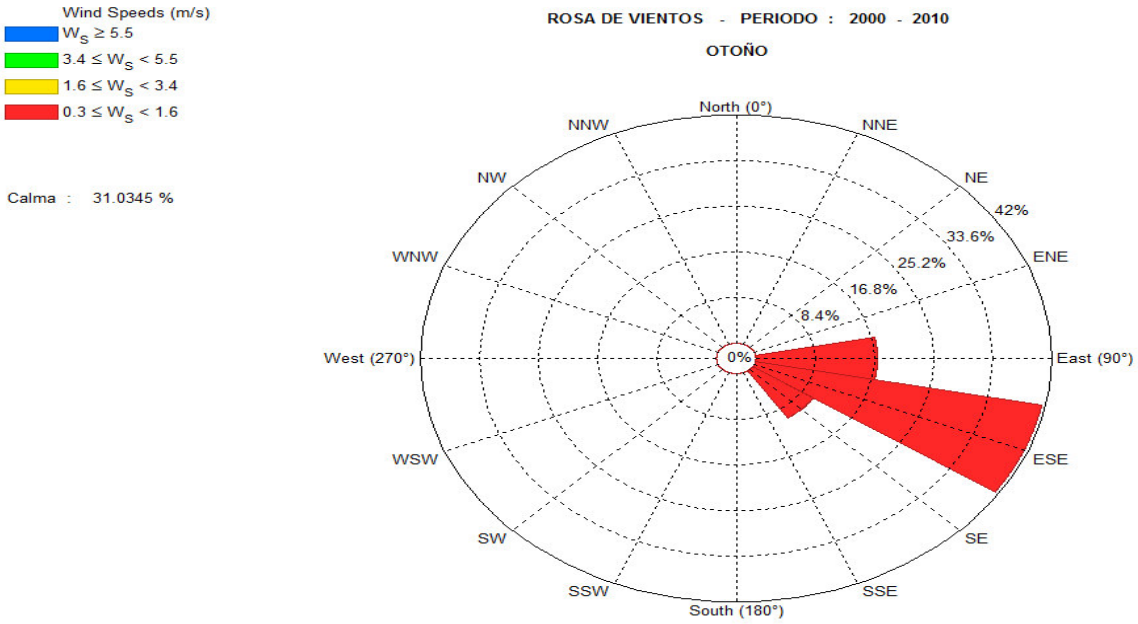

Figura 4.28b.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios mensuales de los meses de otoño

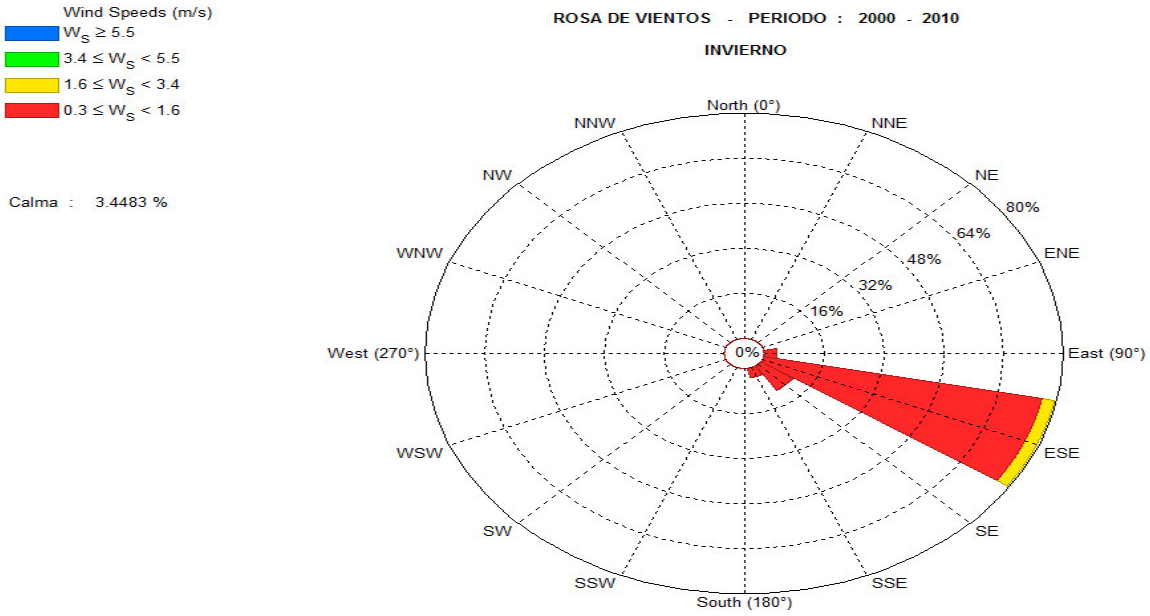

Figura 4.28c.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios mensuales de los meses de invierno

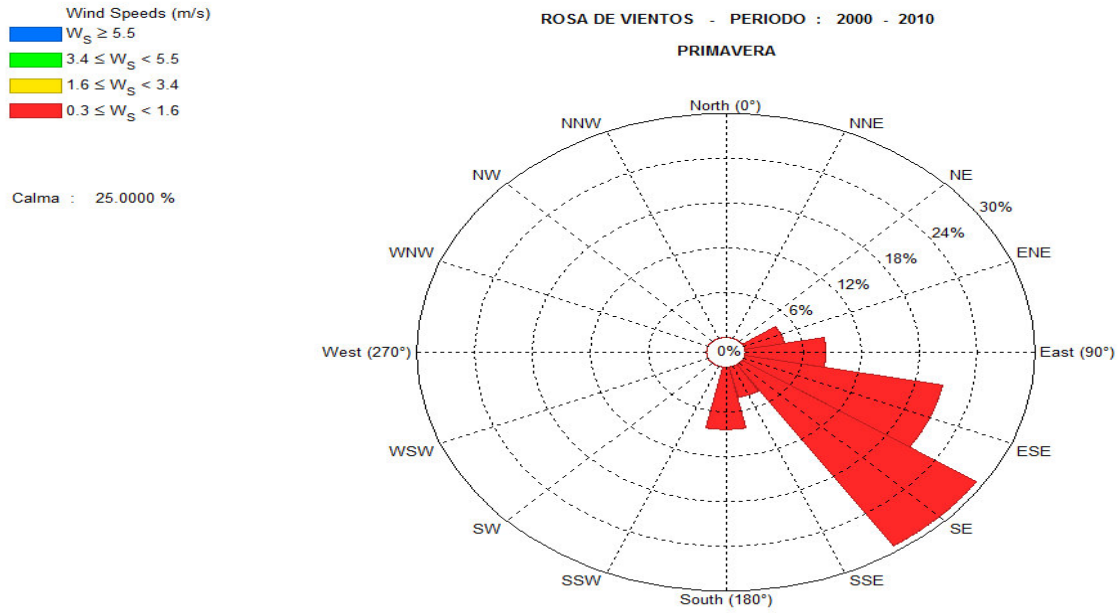

Figura 4.28d.- Gráfico que muestra el resultado del cálculo de la rosa de vientos utilizando los datos correspondientes a los promedios mensuales de los meses de primavera

Tabla 8. Resumen de la dirección de los vientos predominantes observados en las Rosas de Vientos utilizando promedios mensuales para las 4 estaciones del año.

Periodo: 2000 – 2010	**Verano**	**Otoño**	**Invierno**	**Primavera**
Dirección Predominante	SSE	ESE	ESE	SE - ESE

4.8 Aplicación. Evaluación del potencial eólico

En esta sección se describe la evaluación del recurso eólico para su posible utilización en la generación de energía eléctrica en la localidad del Observatorio de Huancayo. En este estudio se utilizó solo los datos horarios del año 2009, como ejemplo. Los datos horarios del viento registrados a 10 m de altura se extrapolaron hasta los 98 metros de altura utilizando la ley logarítmica del viento, que usualmente se requiere por los aerogeneradores de energía eólica. A continuación se describe el procedimiento para generar la energía eléctrica utilizando el recurso eólico.

4.8.1 Histogramas de frecuencia y función de Weibull

A continuación se presenta los histogramas de frecuencia (barras color rojo) obtenidos con los datos horarios que se dispone para las cuatro estaciones del año 2009, las curvas de la función de Weibull (curva azul) y los parámetros de Weibull. En las figuras 4.29a, 4.29b, 4.29c y 4.29d se incluyen los gráficos para las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera. En la figura 4.29e se incluye el grafico correspondiente a todo el año 2009.

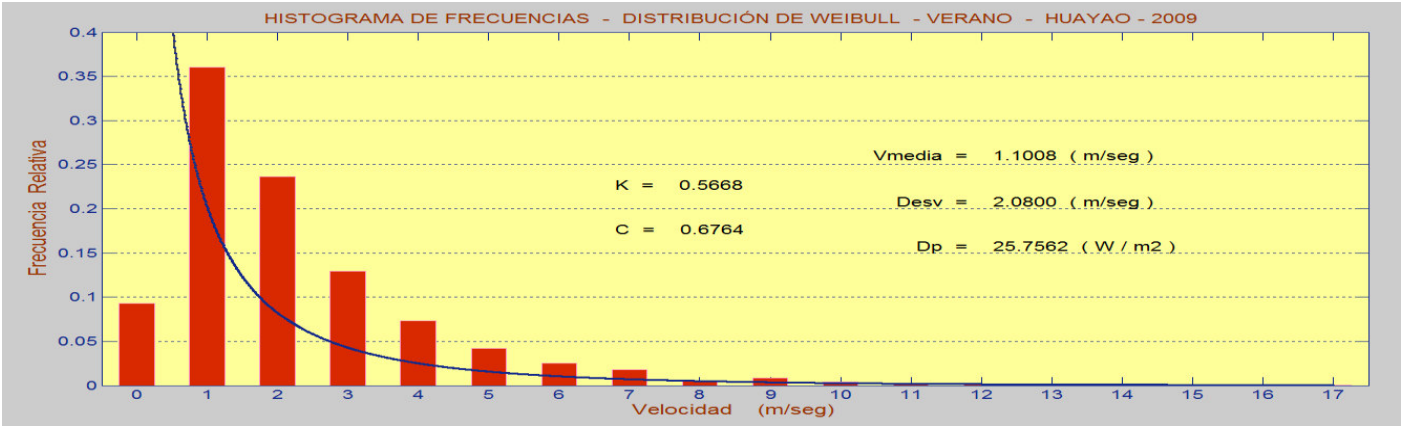

Figura 4.29a.- Histograma de frecuencias, función de Weibull y sus respectivos parámetros de Weibull para la estación de verano del año 2009.

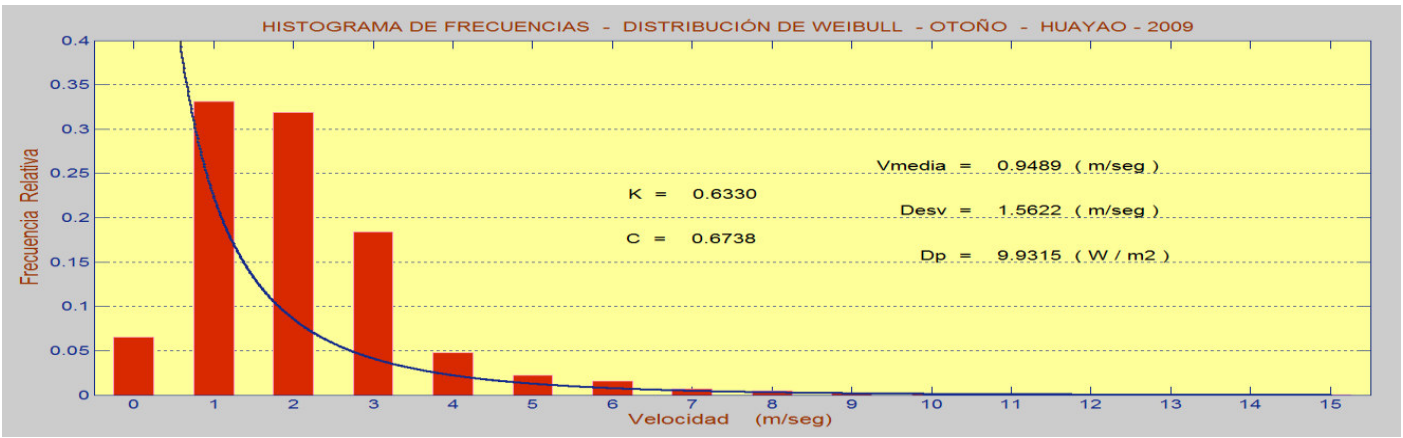

Figura 4.29b.- Histograma de frecuencias, función de Weibull y sus respectivos parámetros de Weibull para la estación de otoño del año 2009.

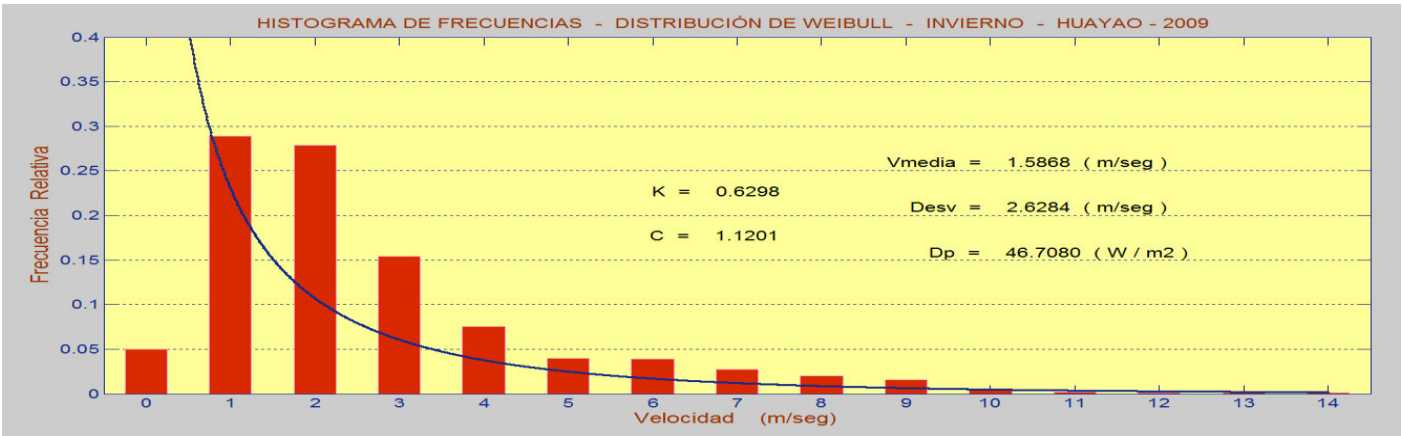

Figura 4.29c.- Histograma de frecuencias, función de Weibull y sus respectivos parámetros de Weibull para la estación de invierno del año 2009.

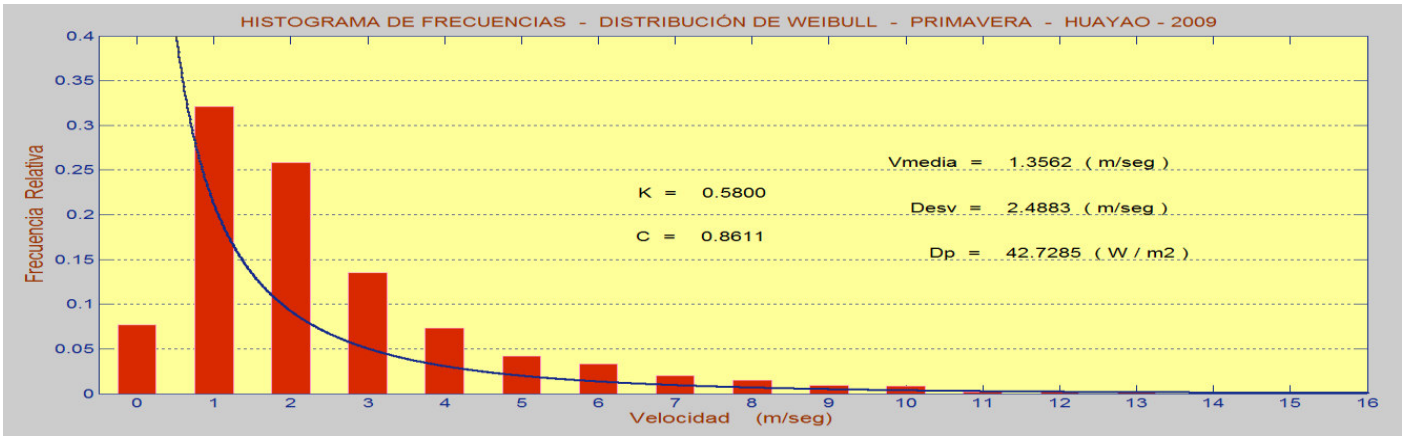

Figura 4.29d.- Histograma de frecuencias, función de Weibull y sus respectivos parámetros de Weibull para la estación de primavera del año 2009.

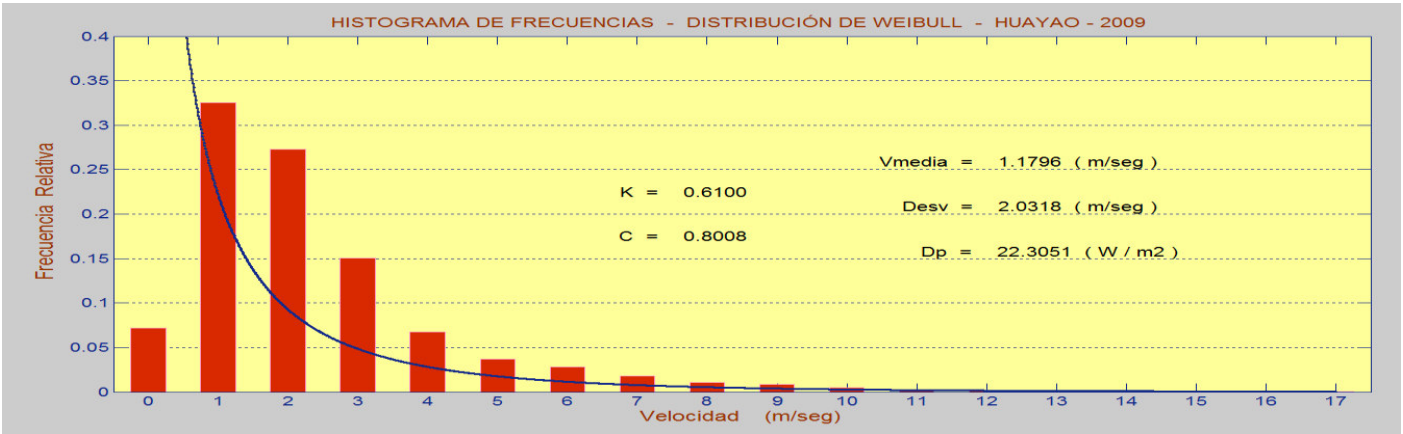

Figura 4.29e.- Histograma de frecuencias, función de Weibull y sus respectivos parámetros de Weibull para el año 2009.

Tabla 9. Parámetros de la distribución Weibull para cada estación del año 2009.

Estación	**K**	**C**	**V media (m/seg)**	**Desv (m/seg)**	**D_p (m/seg)**
Verano	0.5668	0.6764	1.1008	2.0800	24.7562

Otoño	0.6330	0.6738	0.9480	1.5622	9.9315
Invierno	0.6298	1.1201	1.5868	2.6284	46.7080
Primavera	0.5800	0.8611	1.3562	2.4883	42.7285
Año 2009	0.6100	0.8008	1.1796	2.0318	22.3051

4.8.2 Curva de potencia del aerogenerador

A continuación se presenta la curva de potencia del aerogenerador E – 82 /2000 utilizando la tabla de datos del trabajo Viabilidad de un Parque Eólico (Racero, 2012) y la energía eléctrica generada para las cuatro estaciones del año.

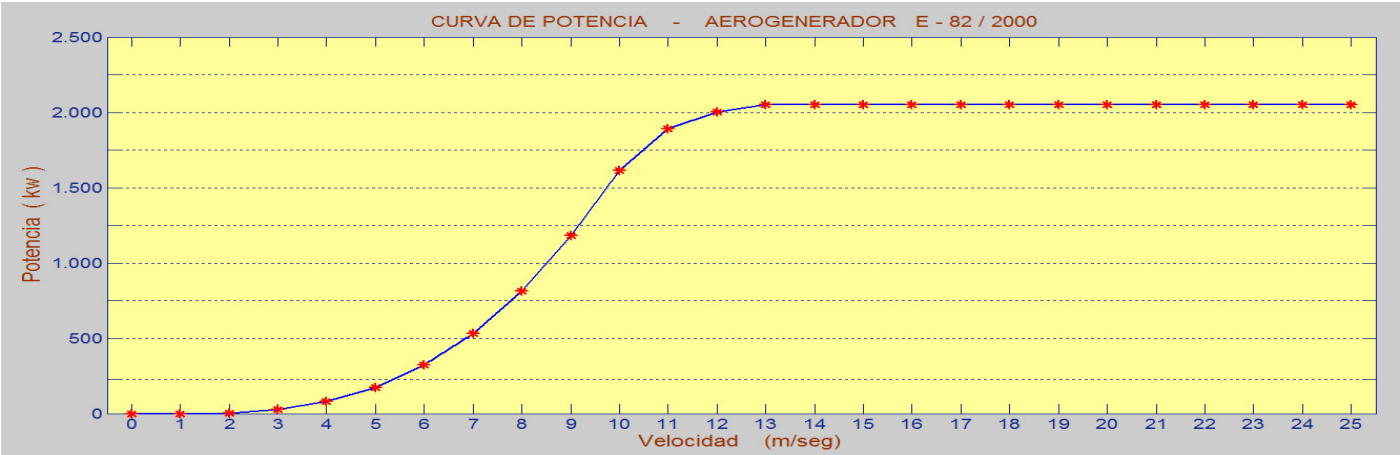

Figura 4.30- Curva de potencia del aerogenerador E–82 / 2000 que permite calcular la energía (kw – h) que es capaz de producir la velocidad del viento (m/seg).

4.8.3 Distribución de energía eléctrica generada

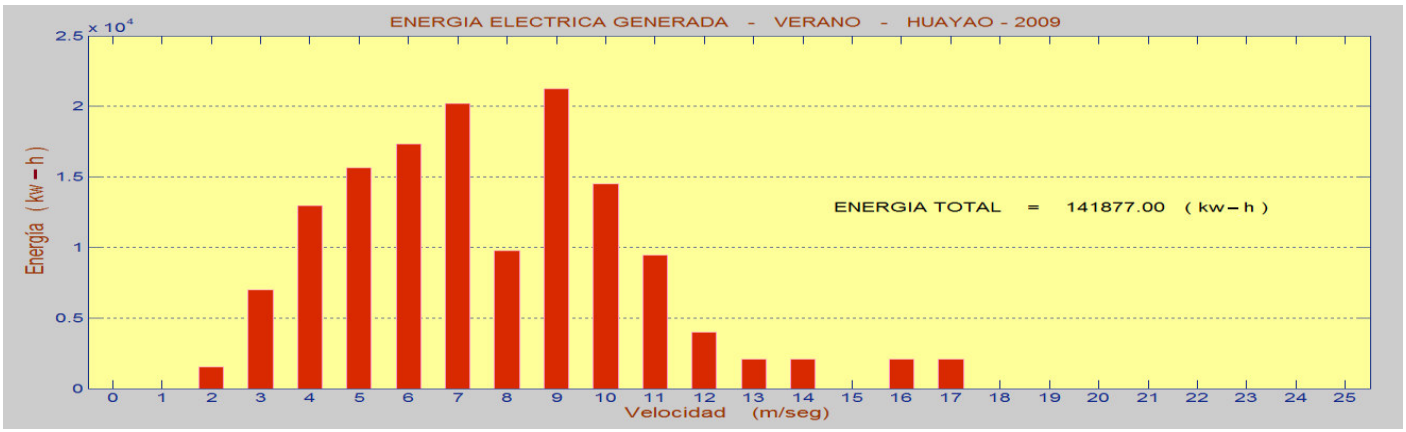

Figura 4.31a.- Distribución de la energía eléctrica generada por la velocidad del viento (m/seg), para la estación de verano del año 2009.

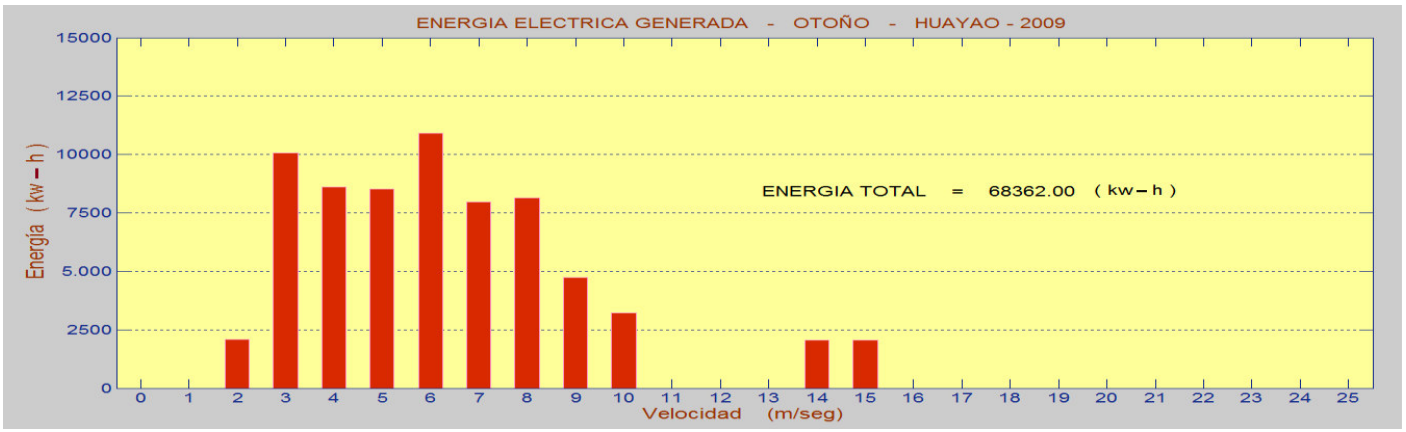

Figura 4.31b.- Distribución de la energía eléctrica generada por la velocidad del viento (m/seg), para la estación de otoño del año 2009.

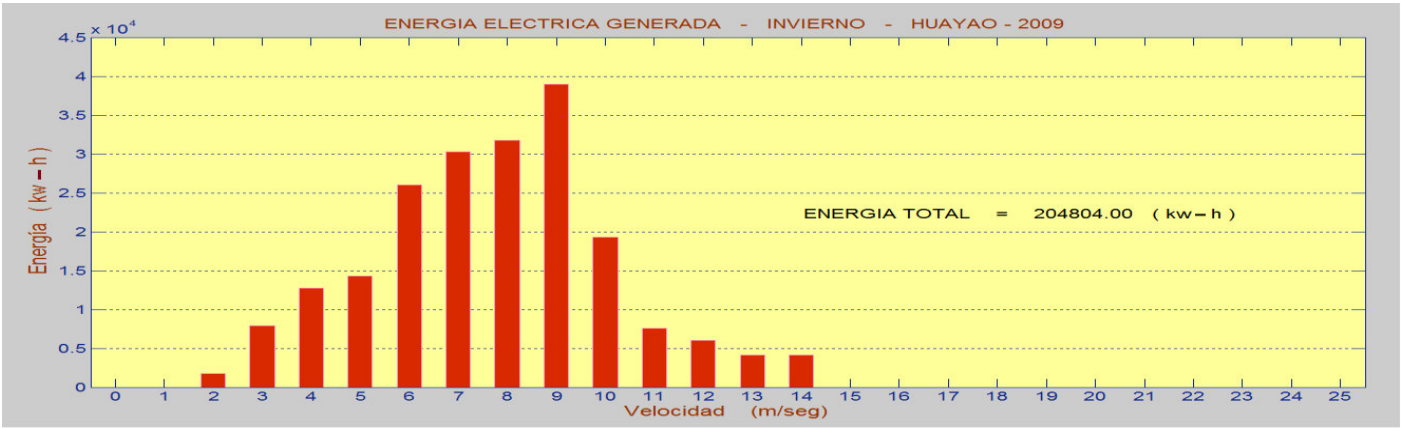

Figura 4.31c.- Distribución de la energía eléctrica generada por la velocidad del viento (m/seg), para la estación de invierno del año 2009.

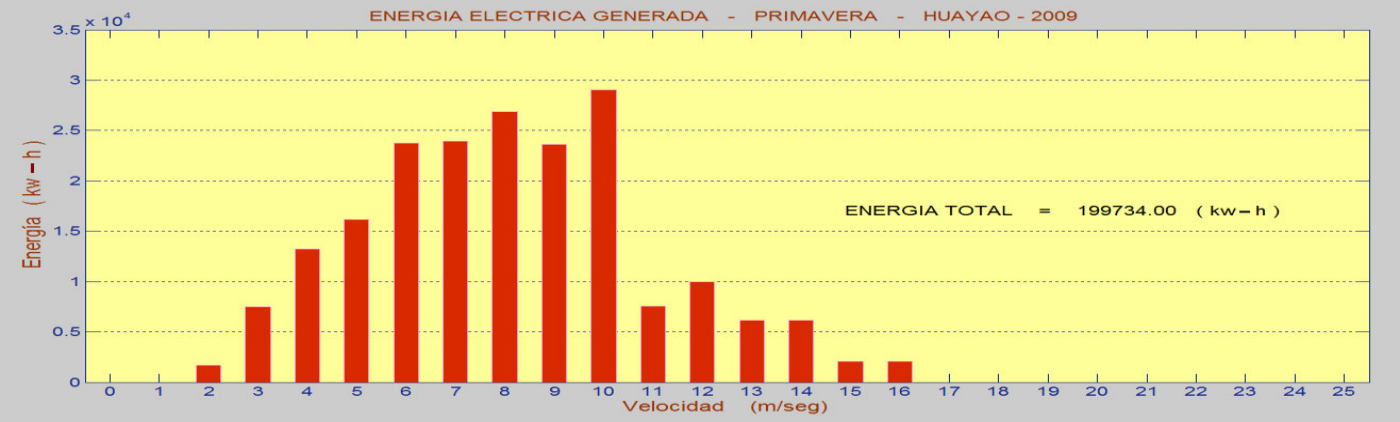

Figura 4.31d. Distribución de la energía eléctrica generada por la velocidad del viento (m/seg), para la estación de primavera del año 2009.

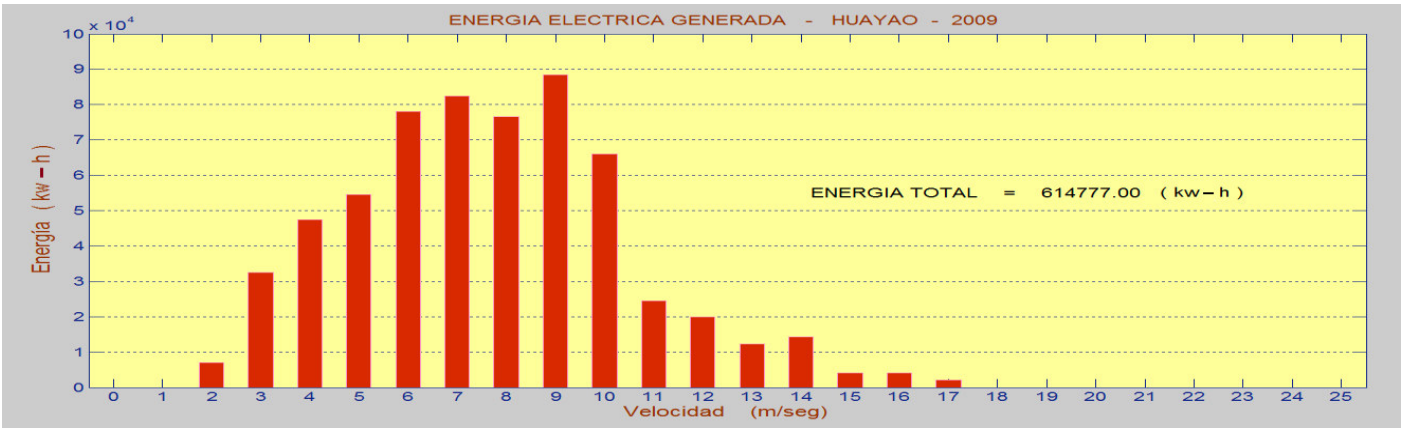

Figura 4.31e. Distribución de la energía eléctrica generada por la velocidad del viento (m/seg), para el año 2009.

4.8.4 Potencial uso de la energía eléctrica generada en viviendas

"A nivel nacional, la mediana del consumo eléctrico residencial alcanzó los 60 KWh. Este estadístico de tendencia central fue mayor en el área urbana (85 KWh-mes), siendo éste 4.3 veces superior al nivel registrado en el ámbito rural (16 KWh-mes)" (Osinerming, 2018).

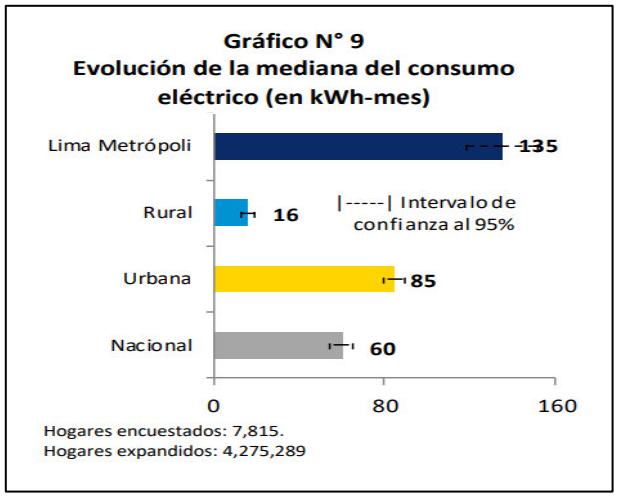

Figura 4.32. Evaluación de la mediana del consumo eléctrico (KWh – mes)

Fuente: ERCUE 2018. **Elaboración:** GPAE – Osinerming.

Tomando como referencia el estudio del consumo de energía eléctrica a nivel nacional (60 KWh – mes) realizado por Osinerming en el 2018, podemos tener una idea de cuantas casas podrían ser abastecidas por la energía eléctrica generada por el aerogenerador E - 82/2000, durante las estaciones de verano, otoño, invierno, primavera y durante el año 2009 como cálculo promedio. Mediante la siguiente relación:

$$\mathbf{N.C.A} = \frac{\mathbf{E.T.G\ \ (kwh-3\ meses)}}{\mathbf{3\ \ x\ \ E.P.C\ \ (kwh-mes)}}$$

Dónde: **N.C.A** es el número de casas que pueden ser abastecidas durante cada estación del año, **E.T.G** es la energía total generada durante la estación (3 meses), **E.P.C** es la energía promedio utilizada por casa que seria 60 KWh–mes.

En la tabla 10 se muestran los valores de la energía eléctrica total generada (kw-h) que se obtuvieron para cada estación del año de 2009 seleccionadas y durante todo el año 2009.

Tabla 10. Energía eléctrica generada (kw-h) para cada estación del año y para el total del año 2009.

Estación	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Año 2009
Energía Total (kw – h)	141877	68362	204804	199734	**614777**
Número de casas abastecidas	788	379	1137	1109	**853**

Los resultados indican que el potencial eólico aprovechable en el Observatorio de Huancayo es de aproximadamente 614,777 KW-h/año, si se utiliza un aerogenerador marca ENERCON modelo E-82/2000 de 98 metros de altura. Con estos resultados se podría dejar de consumir 66,247.52 litros de gasolina o 52.8613 Toneladas Equivalentes de Petróleo (TEP).

Capítulo 5

Conclusiones

En el presente estudio se investigó el ciclo diurno y el ciclo anual de los vientos superficiales utilizando los datos horarios registrados en el Observatorio de Huancayo. Considerando que el viento es un vector, los cálculos y los analices se realizaron como una variable vectorial con sus tres componentes escalares, la intensidad, la componente zonal (U) y la componente meridional (V). Para cada uno de estas variables escalares se generaron series de tiempo de datos horarios, diarios y mensuales. Para el análisis del ciclo diurno se utilizaron la serie de datos promedios horarios y para el análisis del ciclo anual se utilizaron las series de datos promedios diarios y promedios mensuales. Para el analices de la variación de la dirección del viento se generaron gráficos de rosa de vientos.

Los resultados muestran características temporales de los vientos muy interesantes, principalmente para su uso en la validación de los modelos numéricos regionales. Las principales conclusiones se resumen a continuación.

5.1 Ciclo diurno. Utilizando las series de tiempo de datos horarios se calcularon los promedios multidiario para cada una de las 24 horas del día para definir el ciclo diurno y se generaron los gráficos para describir las características del ciclo diurno del vector viento, de la intensidad y de las componentes zonal y meridional. Para visualizar y analizar la variabilidad interdiaria del viento se hizo un filtrado o suavizado de la serie de tiempo de datos horarios utilizando el promedio corrido de 4 horas.

La variación diurna de los vientos en la zona central oeste del valle del rio Mantaro está compuesta de dos sistemas de vientos. Un sistema de vientos de escala espacial local y mesoescala, con escala temporal de horas que está asociado con las brisas de valle y montaña, con intensidad casi constante y dirección de NE a SO en la noche y de SO a NE en el día; y un sistema de vientos de escala espacial regional con escala temporal de días a meses que está asociado con los vientos sinópticos con mayor intensidad y con dirección de S a N y SE a NO principalmente en la tarde.

Los gráficos de la variabilidad interdiaria muestran que el ciclo diurno está bien definido, pero con variación irregular de la intensidad de un día a otro.

Es evidente que el forzamiento del ciclo diurno del viento es el ciclo diurno de la radiación solar, particularmente en la componente zonal de viento (U) como se puede observar en la figura 5.1 que muestra la comparación entre el comportamiento del ciclo diurno de la de la componente zonal del viento (U) y el comportamiento del ciclo diurno de la radiación solar.

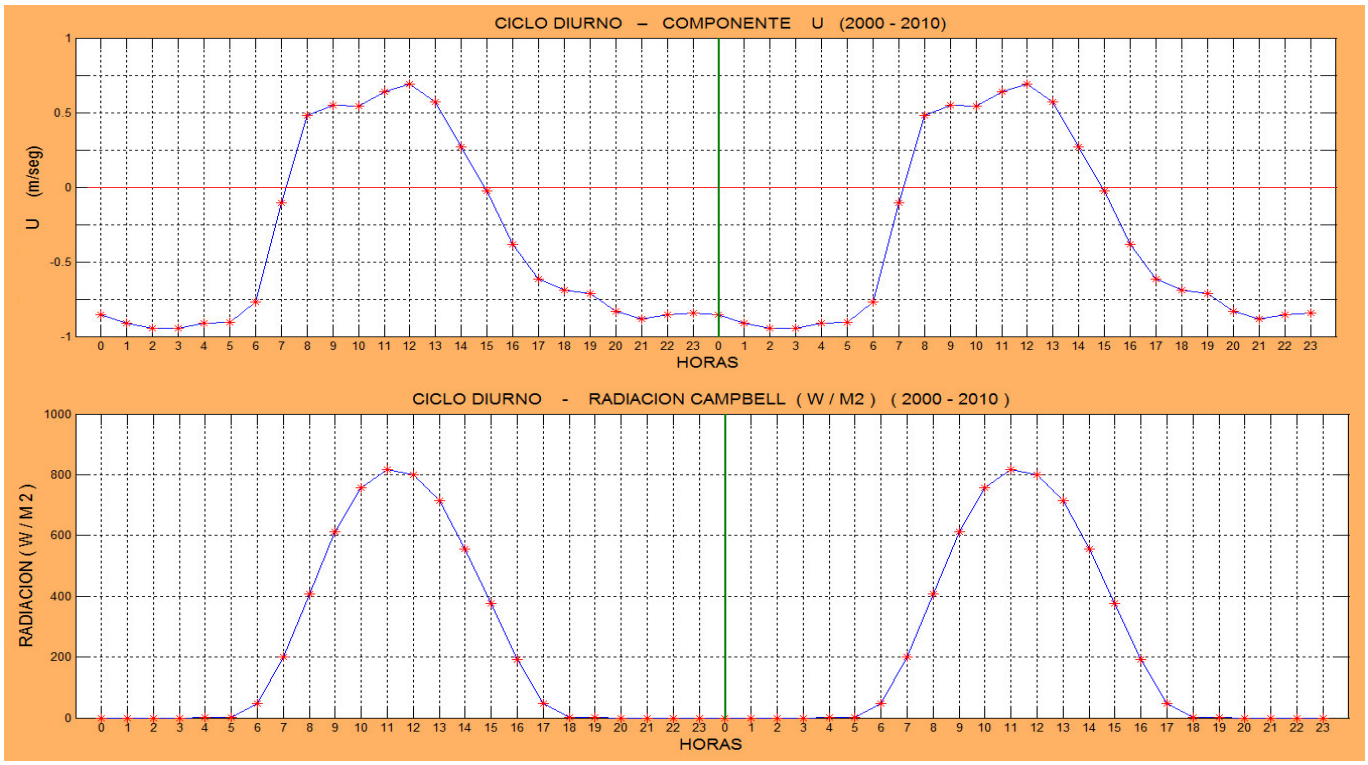

Figura 5.1. Comparación del ciclo diurno de los vientos zonales con el ciclo diurno de la radiación solar.

Note que durante el día la componente zonal del viento es positiva (hacia el este) y durante la noche el viento zonal es negativo (hacia el oeste). Los cambios de dirección del viento zonal ocurren aproximadamente a las 7 am y a las 3 pm.

El ciclo diurno de la componente meridional del viento (V) depende directamente del ciclo diurno de la temperatura del aire e indirectamente del ciclo diurno de la radiación solar como se puede observar en la figura 5.2. La componente meridional del viento es positivo (hacia el norte) durante el día y negativo (hacia el sur) durante la noche. Los cambios de dirección del viento meridional ocurren aproximadamente a las 7 am y a las 8 pm.

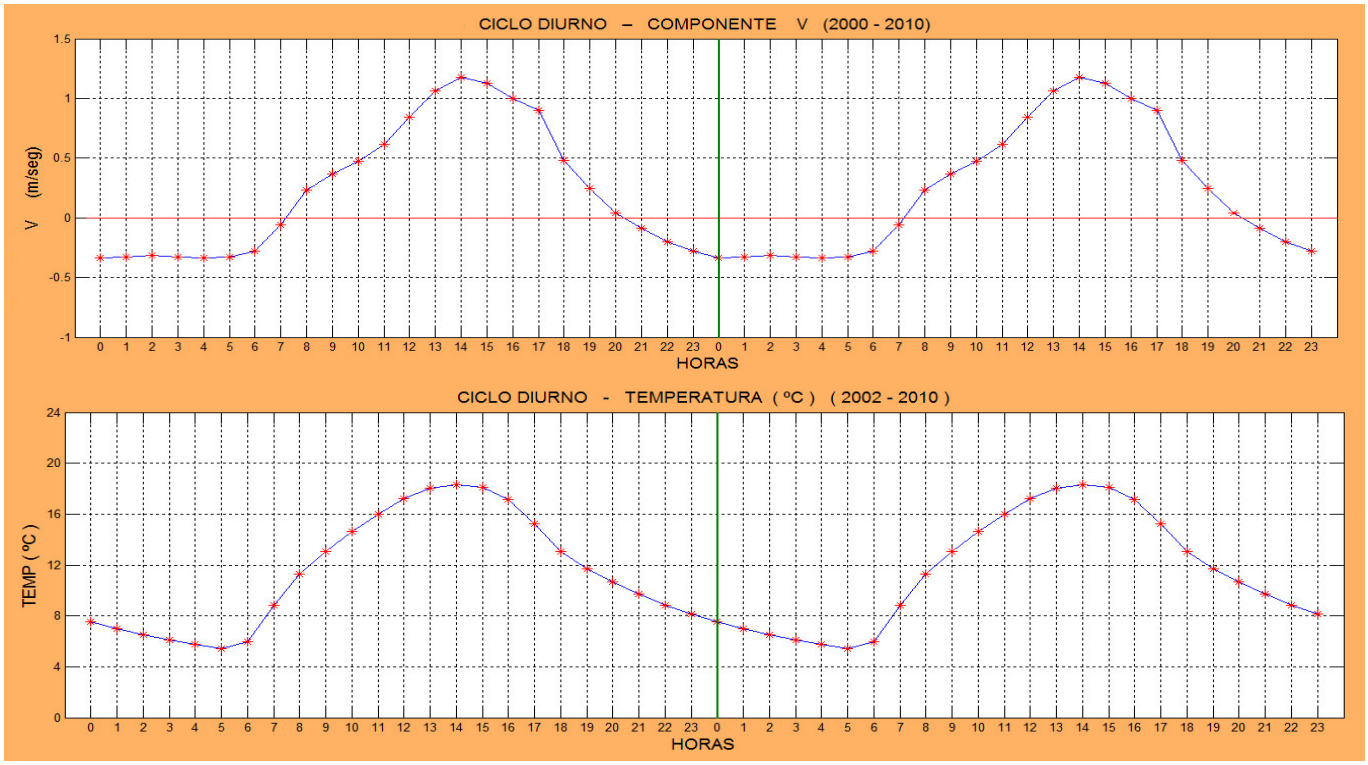

Figura 5.2. Comparación del ciclo diurno de los vientos meridionales con el ciclo diurno de la temperatura.

El comportamiento diurno del viento en la zona de estudio que es una planicie rodeada de montañas, es aproximadamente similar a los vientos de brisa de valle y montaña, que están forzadas por el ciclo diurno de la radiación solar, como se puede ver en la figura 5.1.

5.2 Ciclo anual. Utilizando las series de tiempo de datos diarios y mensuales se calcularon los promedios multianual y se generaron los gráficos para describir las características del ciclo anual del vector viento, de la intensidad y de las componentes zonal y meridional. Para visualizar y analizar la variabilidad interanual del viento se hizo un filtrado o suavizado de la serie de tiempo con datos diarios utilizando una media móvil de 30 días.

La variación anual de los vientos está asociada con los vientos sinópticos que son los vientos predominantes en Sudamérica. El forzamiento de estos vientos es el campo del gradiente de presión en Sudamérica. Los vientos más intensos se observan en los meses de julio a setiembre procedentes del ESE y los vientos más débiles se observa en los meses de octubre a abril procedentes del ESE y los vientos más débiles se observan en los meses de octubre a abril procedentes del SE y SSE.

En el ciclo anual de la componente zonal el mes más intenso es el mes de julio, viento procedente del E y los vientos más débiles son los meses de diciembre hasta abril procedentes también del E.

En el ciclo anual de la componente meridional se observa dos veces más intensos y dos veces más débiles, todos procedentes del Sur. El primero más intenso se observa en el mes de setiembre y el segundo más intenso se observa en el mes de marzo. El primero más débil se observa en el mes de mayo y el segundo más débil se observa en el mes de noviembre.

Estos dos ciclos semianuales, dos máximos y dos mínimos, del viento meridional deben estar asociados con el desplazamiento de norte a sur y de sur a norte, de la Banda de Convergencia Intertropical (BCIT), Figura 5.3. La BCIT está más lejos del ecuador durante los solsticios de invierno (21 de junio) y de verano (21 de diciembre) y están más cerca al ecuador en los equinoccios (21 de marzo y 21 de setiembre). El viento meridional es más intenso durante los equinoccios y más débiles durante los solsticios.

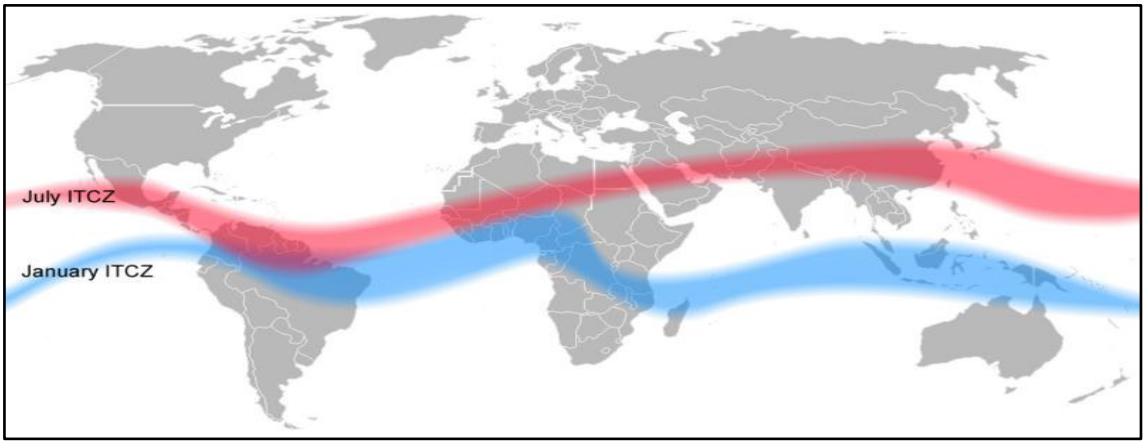

Figura 5.3 Banda de Convergencia Intertropical durante el verano boreal (rojo) y el verano austral (azul).

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Zona_de_convergencia_intertropical

La variación anual de la intensidad de los vientos durante todo el periodo 2000-2010 muestra regularidad, excepto en los años 2003, 2004 y 2005 que en algunos meses se registraron vientos fuertes. Estos vientos fuertes se manifiestan también en las componentes zonal y meridional. En los meses de agosto de 2004 y setiembre de 2005 los vientos son los más intensos del periodo de registro.

5.3 Rosa de vientos. Se generaron gráficos de la rosa de vientos con datos horarios para cuatro sectores del día, madrugada, mañana, tarde, noche, para visualizar los cambios de la dirección del viento durante el día. También se utilizaron los datos horarios para generar gráficos que permitan visualizar los cambios de dirección durante las cuatro estaciones del año. Se utilizaron los datos diarios para generar gráficos que permitan visualizar los cambios de dirección del viento durante las cuatro estaciones del año. También se utilizaron los datos mensuales para generar gráficos que permitan visualizar los cambios de dirección del viento durante las cuatro estaciones del año.

Los gráficos de rosa de vientos elaborados con datos horarios indican que en el ciclo diurno están presentes dos sistemas de vientos. Vientos asociados con las brisas de montaña y de valle forzados por el calentamiento de la atmosfera por la radiación solar durante el día y el enfriamiento nocturno, y vientos sinópticos asociados con el campo de presión a escala regional. La dirección de los vientos asociados con las brisas de montaña y de valle, en la madrugada vienen del ENE, en la mañana vienen del WSW-SW-W, en la tarde vienen de W-WSW-SSE y durante la noche vienen del E-ENE. La dirección de los vientos asociados con los vientos sinópticos vienen del SSE y SE.

Los gráficos de rosa de vientos elaborados con datos horarios para las cuatro estaciones del año indican que en el verano la dirección del viento vienen del ENE, E y del O. En el otoño vienen del ENE, en el invierno vienen del ENE y en primavera vienen del ENE.

Los gráficos de rosa de vientos elaborados con datos diarios, la dirección del viento para la estación de verano vienen del SE y SE; para la estación de otoño vienen del E, ESE; para el invierno vienen del ESE; para la primavera ESE, SE.

Los gráficos de rosa de vientos elaborados con datos mensuales, la dirección del viento para la estación de verano vienen del SSE; para la estación de otoño vienen del ESE; para el invierno vienen del ESE; para la primavera vienen del SE

En los gráficos elaborados con datos horarios, la presencia de los vientos asociados con las brisas de montañas y de valle es evidente, mientras que los gráficos elaborados con datos mensuales, los vientos que predominan son los asociados con los vientos sinópticos o dominantes.

5.4 Generación de energía eólica. Se evaluó el potencial de generación de energía eólica y se calculó la energía eléctrica generada (kw-h) para cada estación del año y para el total del año 2009. Los resultados indican que el potencial eólico aprovechable es de aproximadamente 614,777 KW-h/año.

Los resultados de este estudio nos permitirá entender mejor la importancia de las montañas, expuestas al ciclo diurno de la radiación solar, actúan como forzantes de los vientos de escala temporal de horas que se observan durante las 24 horas del día, y que los vientos sinópticos y predominantes, forzados por el campo de presión regional, de escala temporal de días a meses, procedentes del SE, están presentes solo durante la tarde. Además, que es posible generar energía eléctrica aprovechable utilizando la fuerza de los vientos en el Observatorio de Huancayo.

Finalmente, se espera que los resultados del presente estudio sea de utilidad en la validación de los modelos de simulación numérica de la dinámica de la atmosfera en los valles interandinos del Perú.

Anexos

A. Velocidad y dirección del vector viento – año 2005



Figura A.1 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Enero del año 2005.

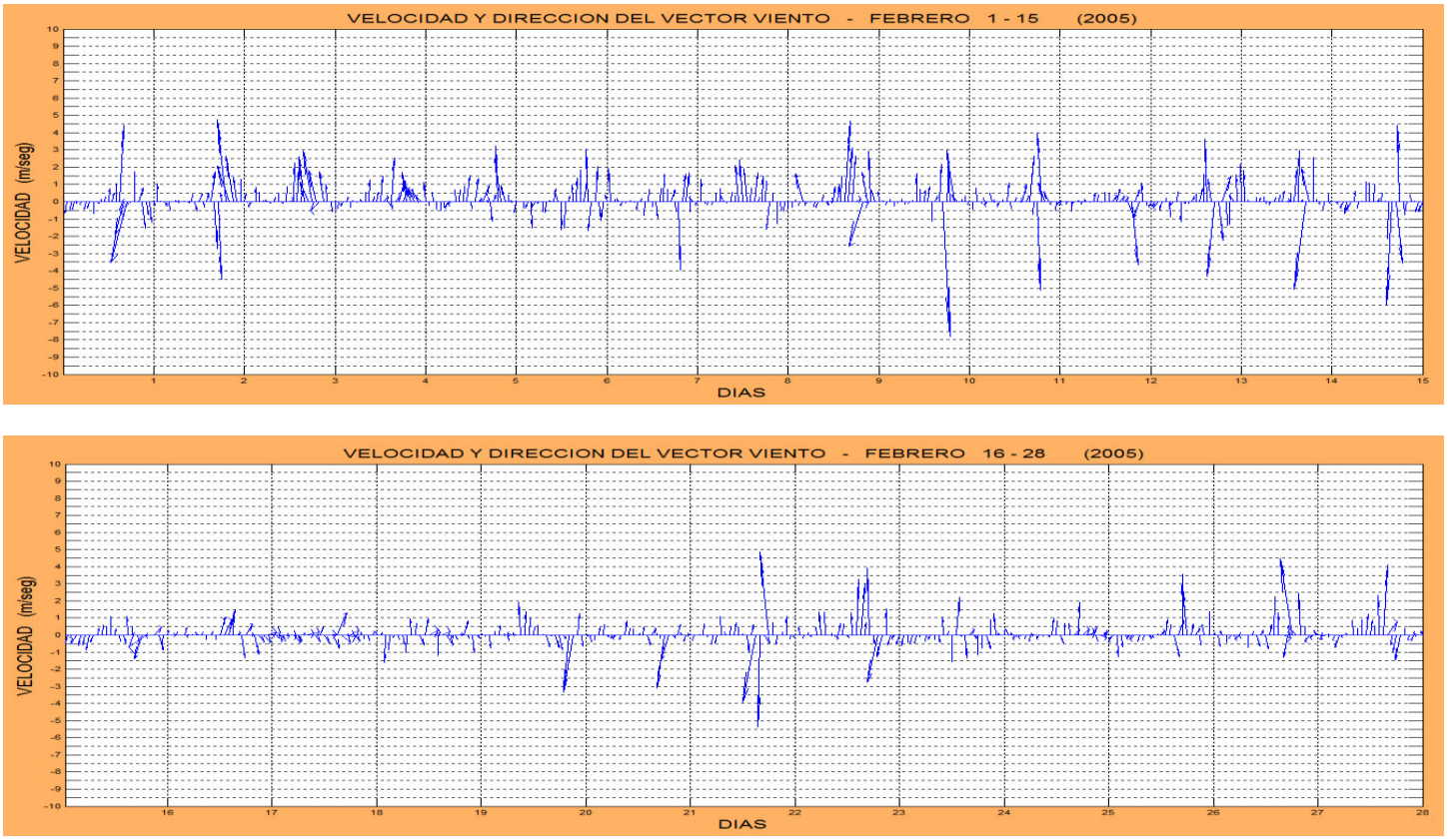

Figura A.2 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Febrero del año 2005.

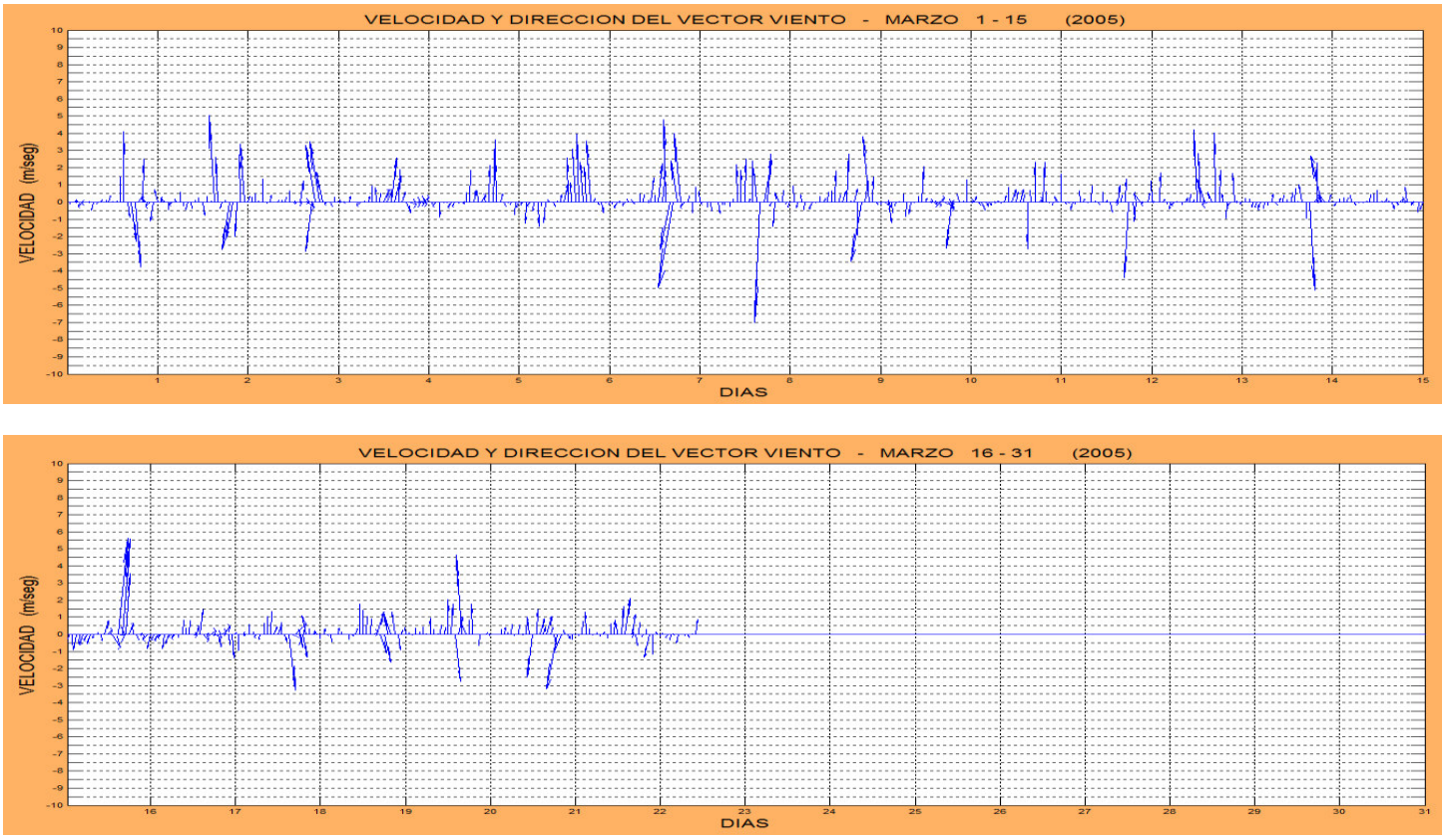

Figura A.3 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Marzo del año 2005.

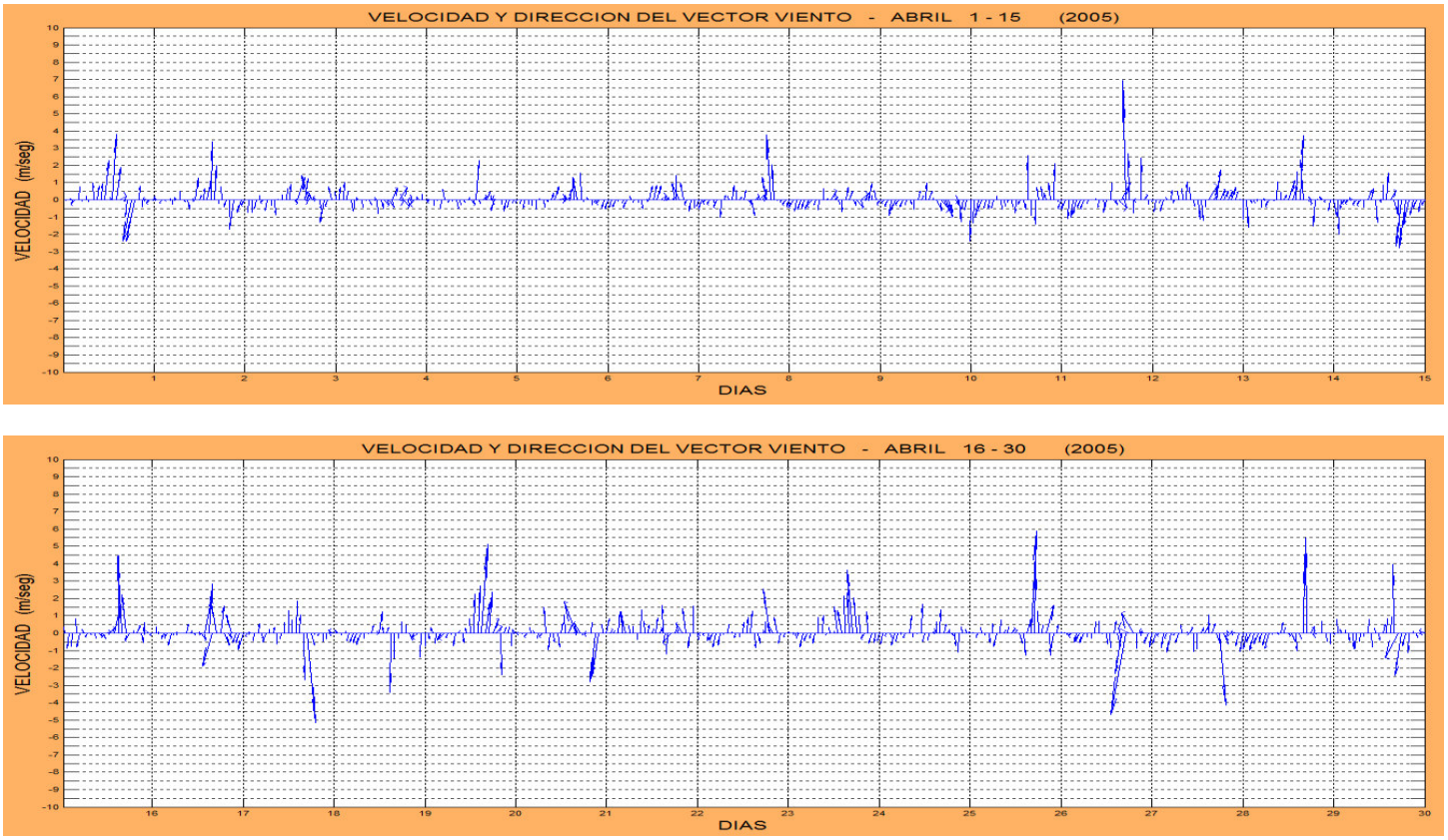

Figura A.4 **S**erie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Abril del año 2005.

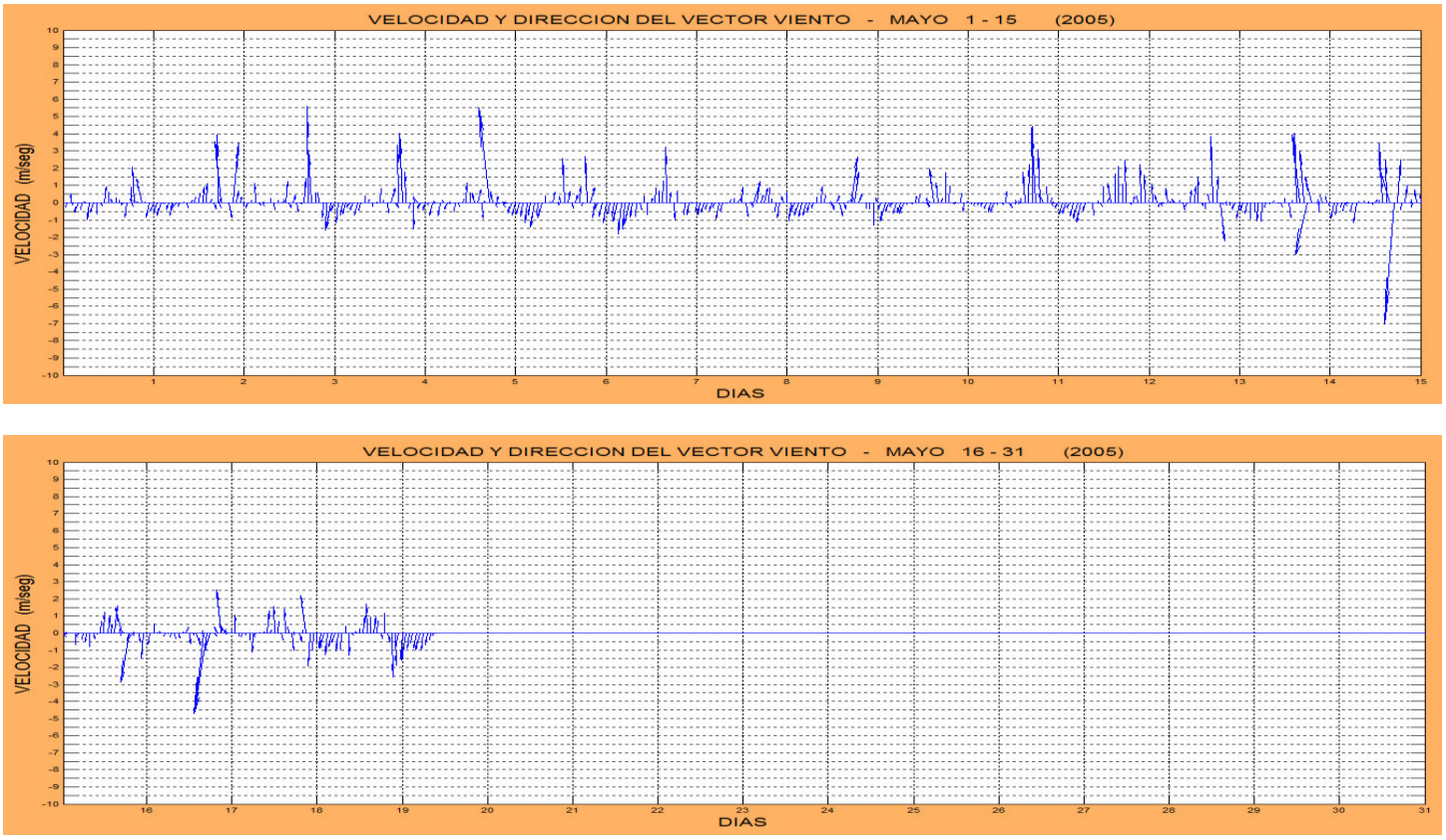

Figura A.5 **S**erie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Mayo del año 2005.

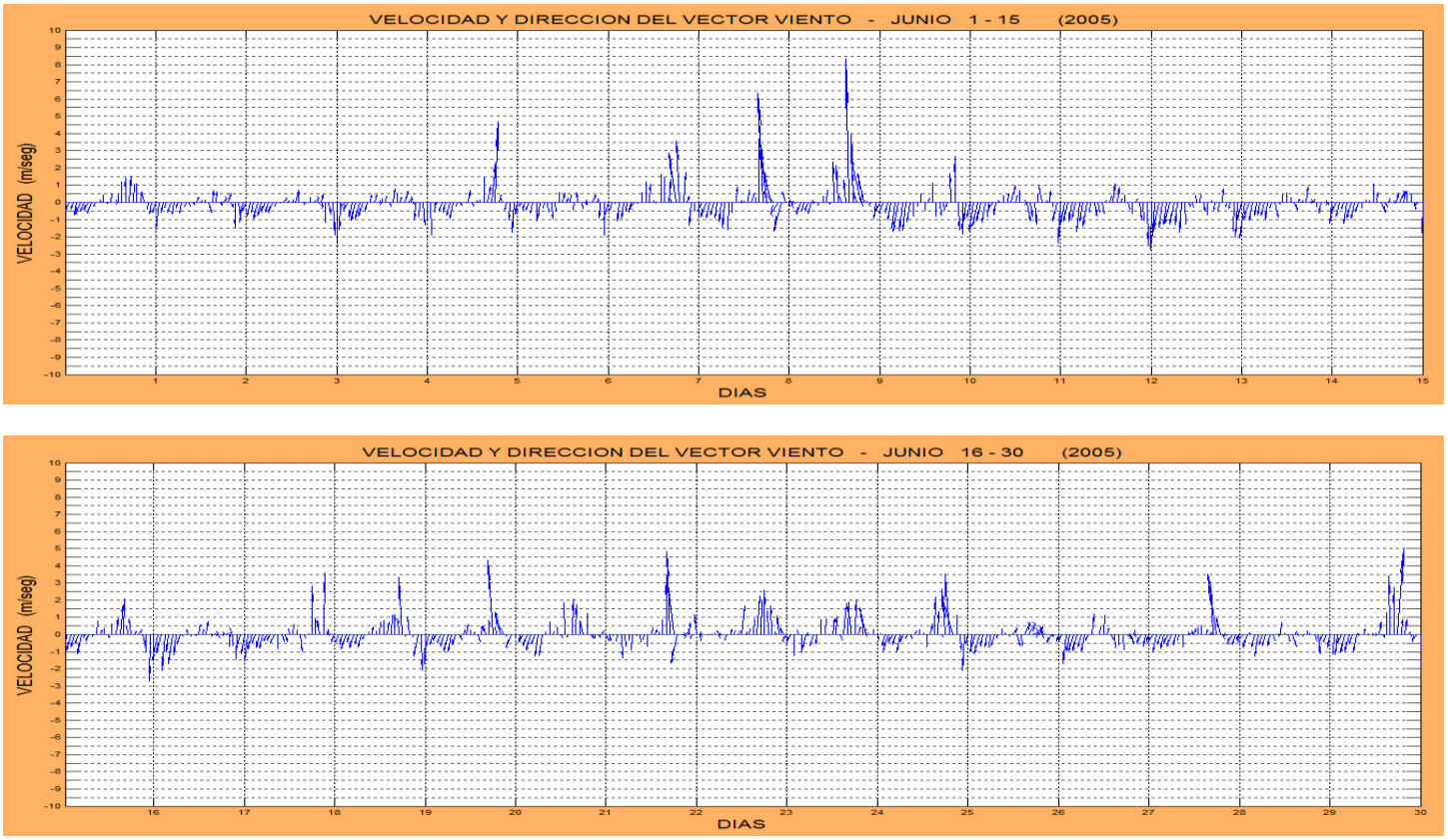

Figura A.6 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Junio del año 2005.

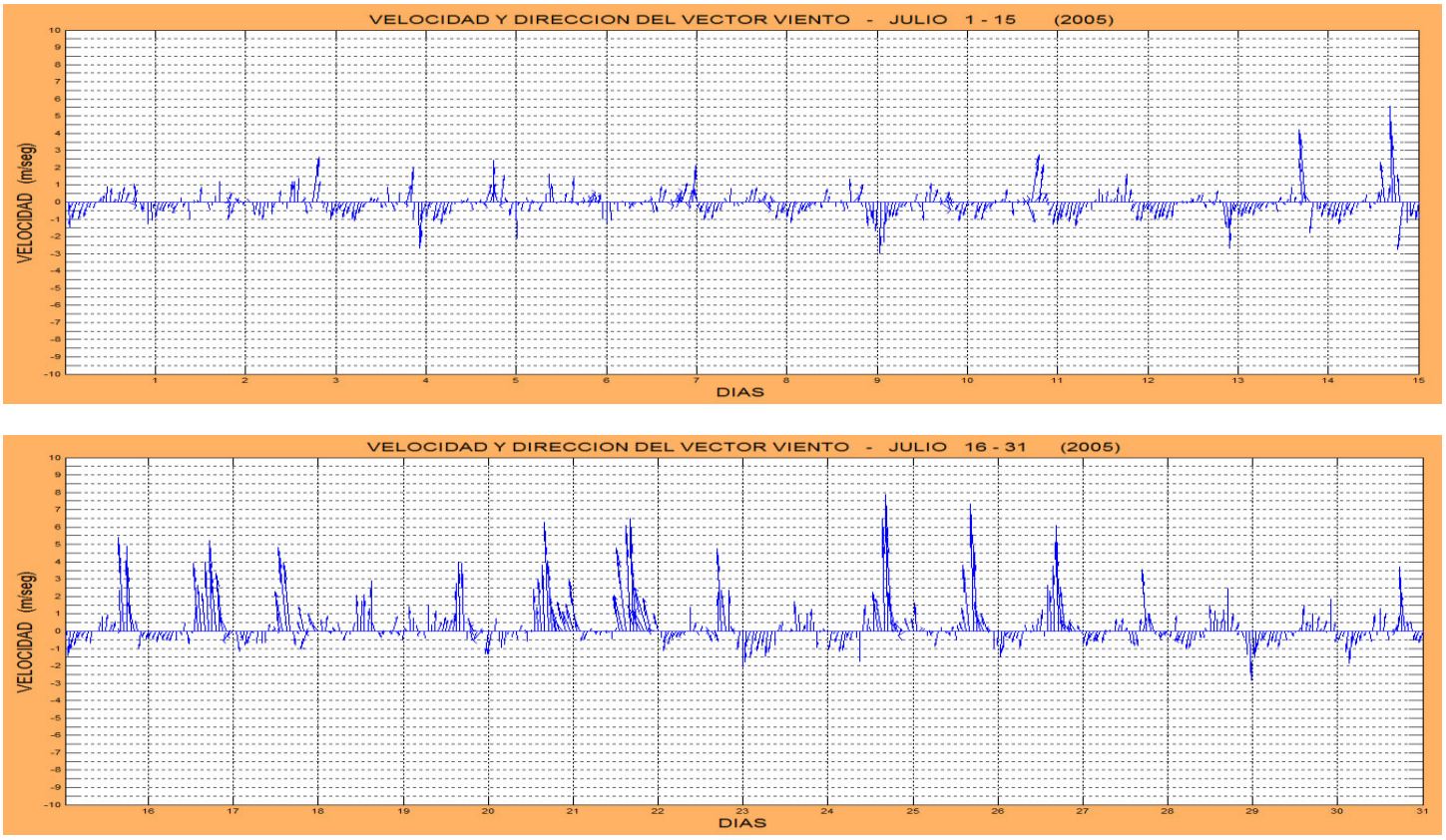

Figura A.7 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Julio del año 2005.

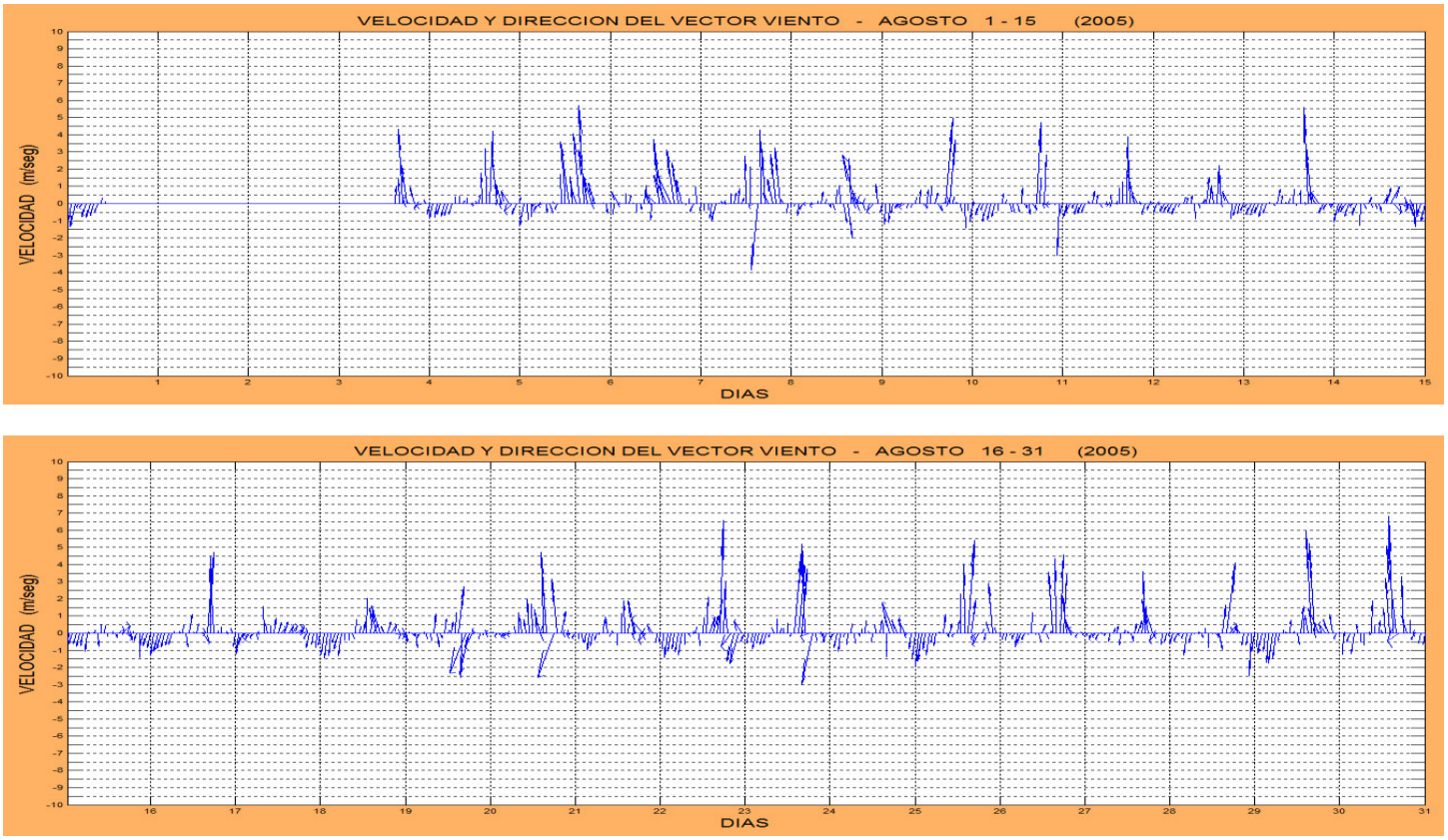

Figura A.8 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Agosto del año 2005.

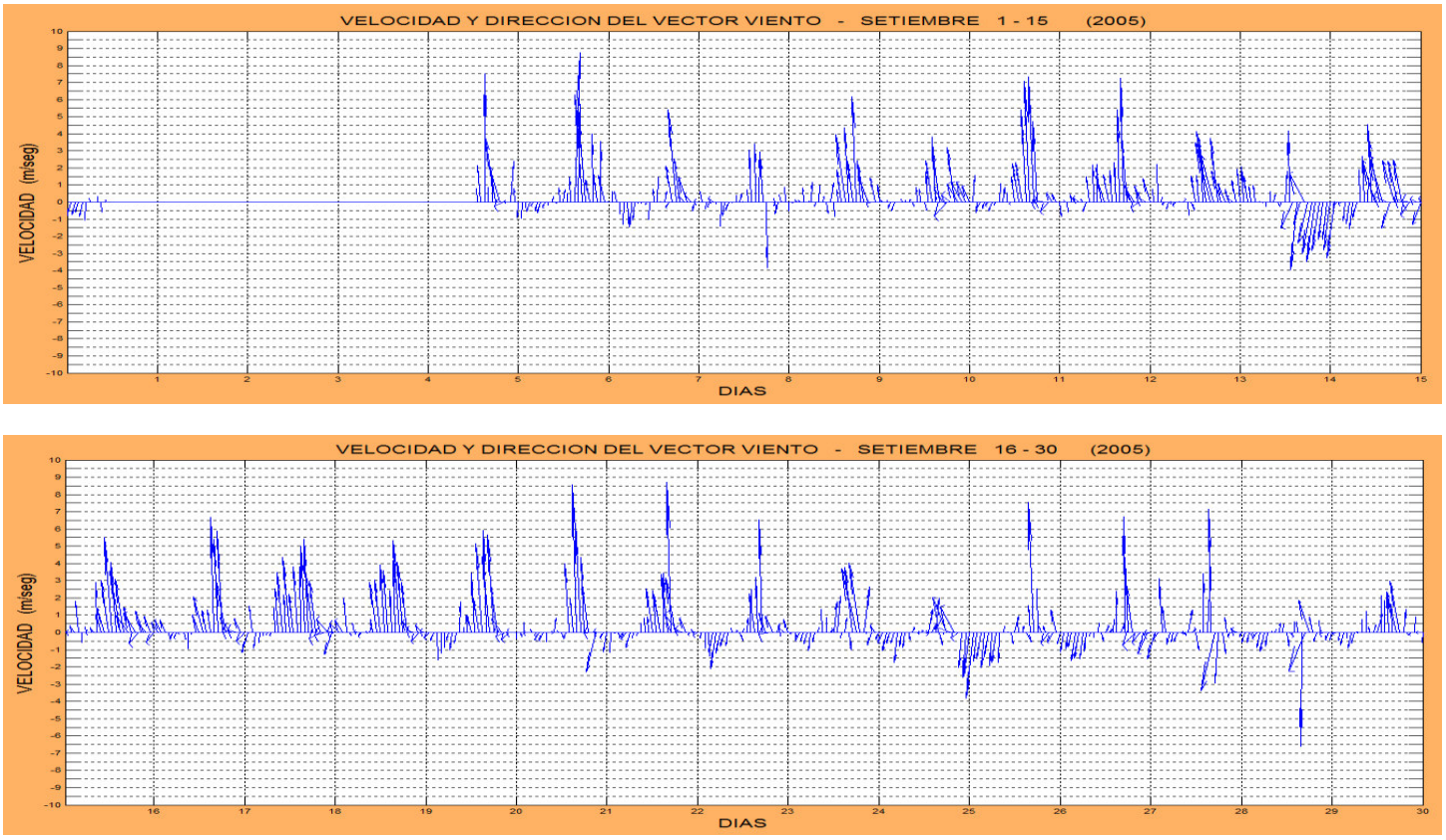

Figura A.9. **S**erie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Setiembre del año 2005.

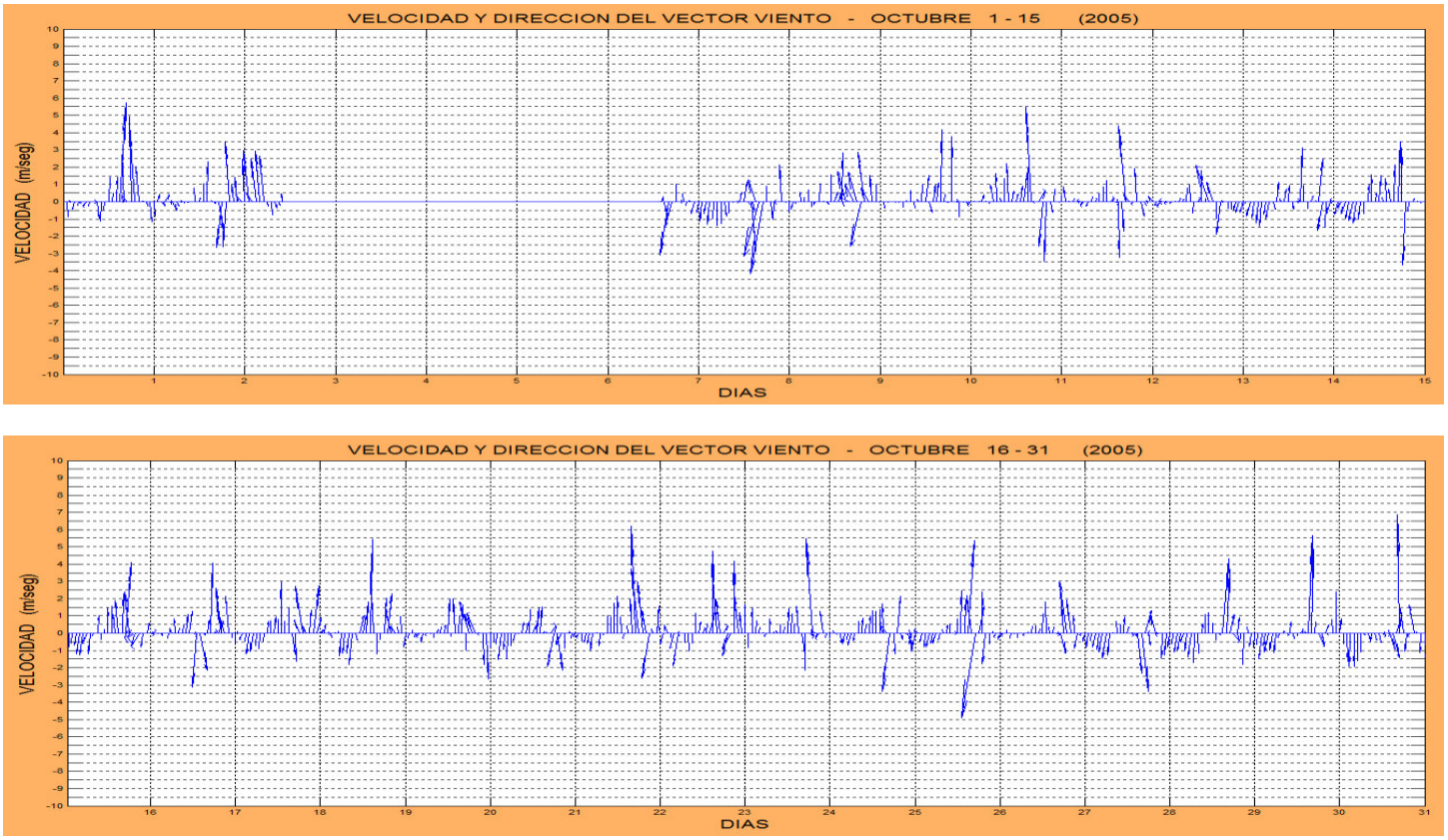

Figura A.10 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Octubre del año 2005.

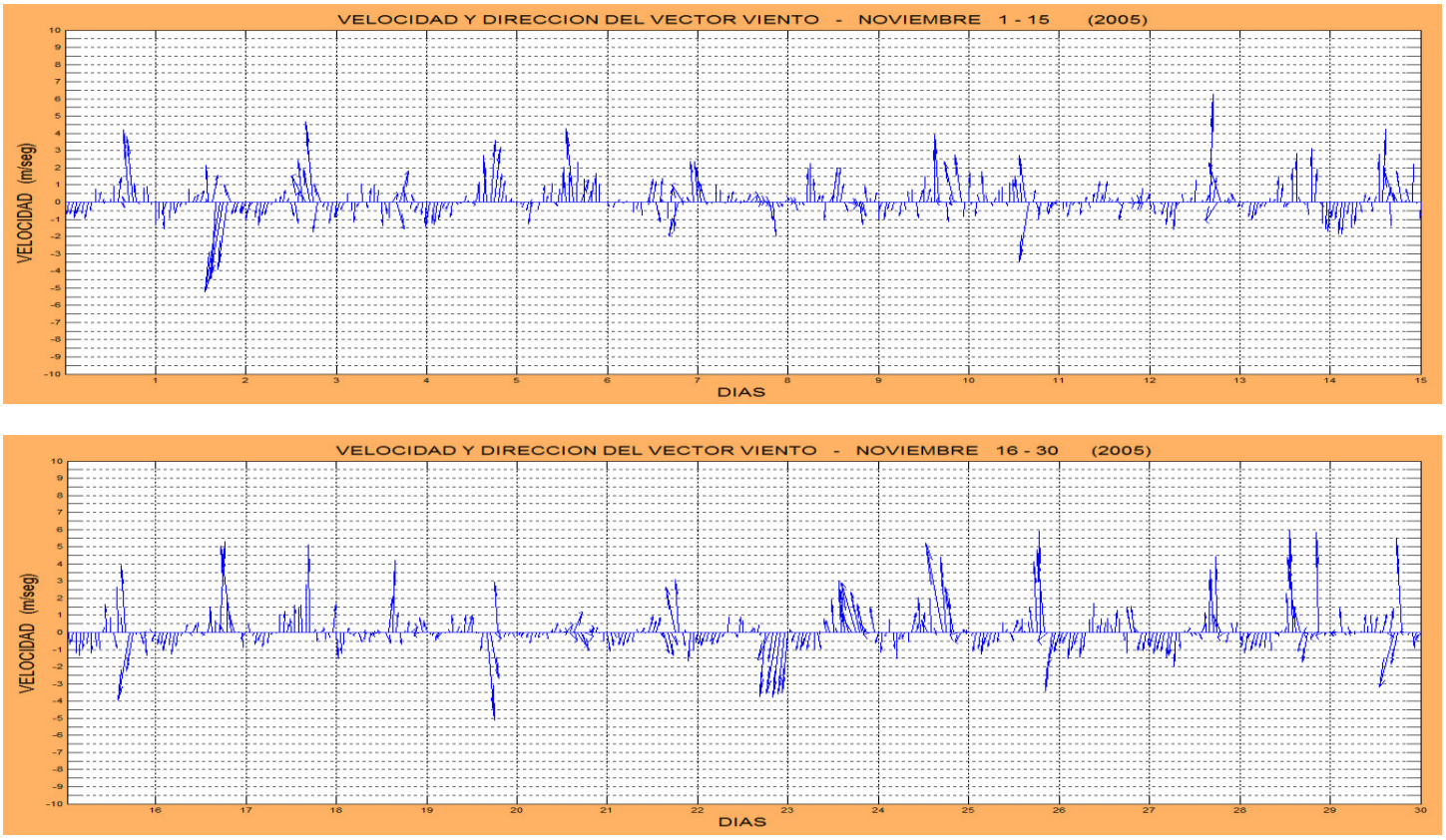

Figura A.11 Serie temporal de los datos horarios del vector viento para el mes de Noviembre del año 2005.

A.2 Magnitud del vector viento – año 2005

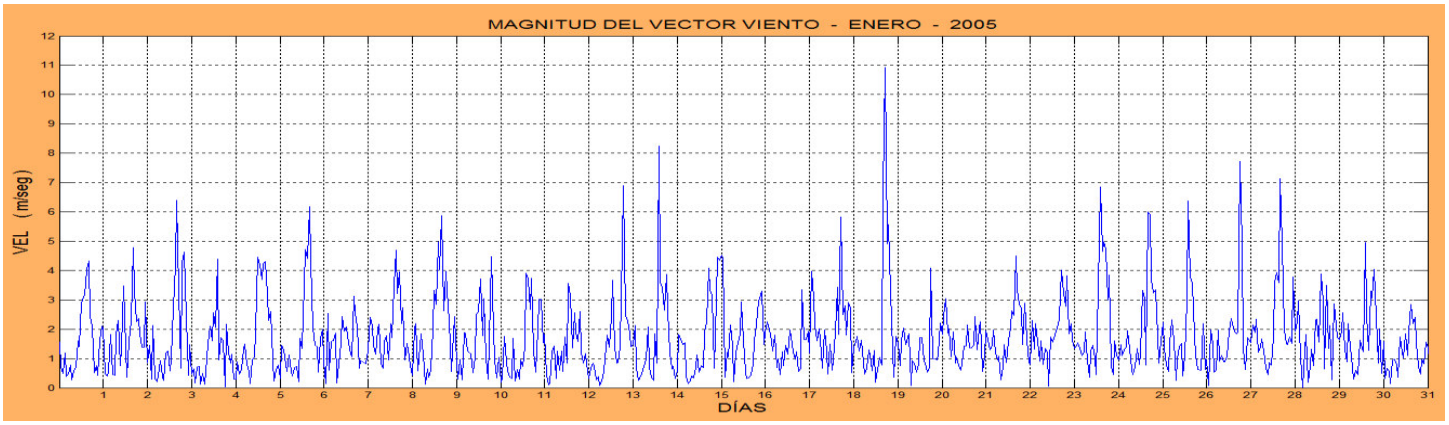

Figura A.12 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Enero del año 2005.

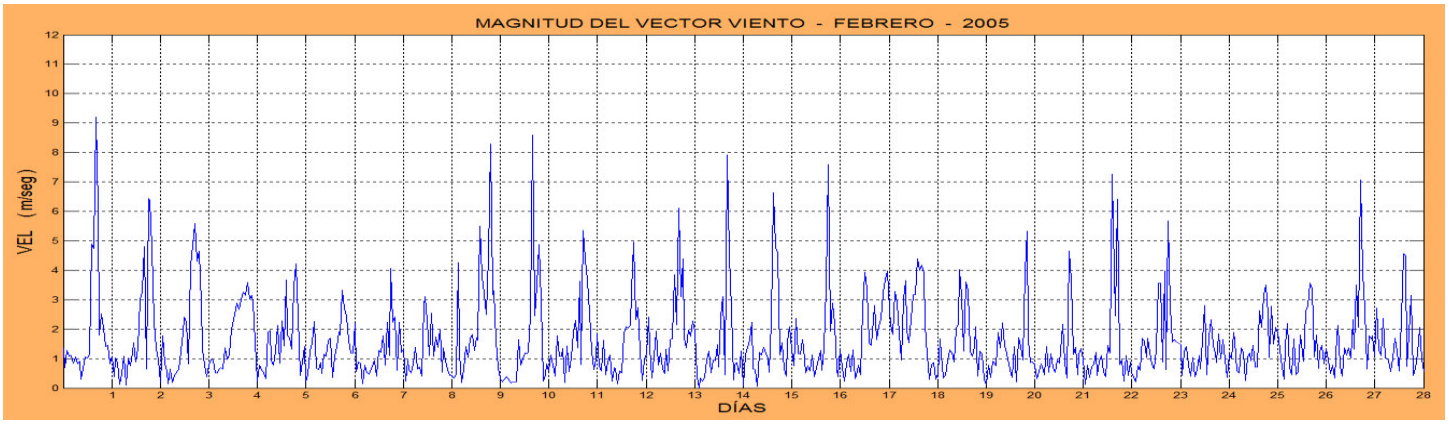

Figura A.13 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Febrero del año 2005.

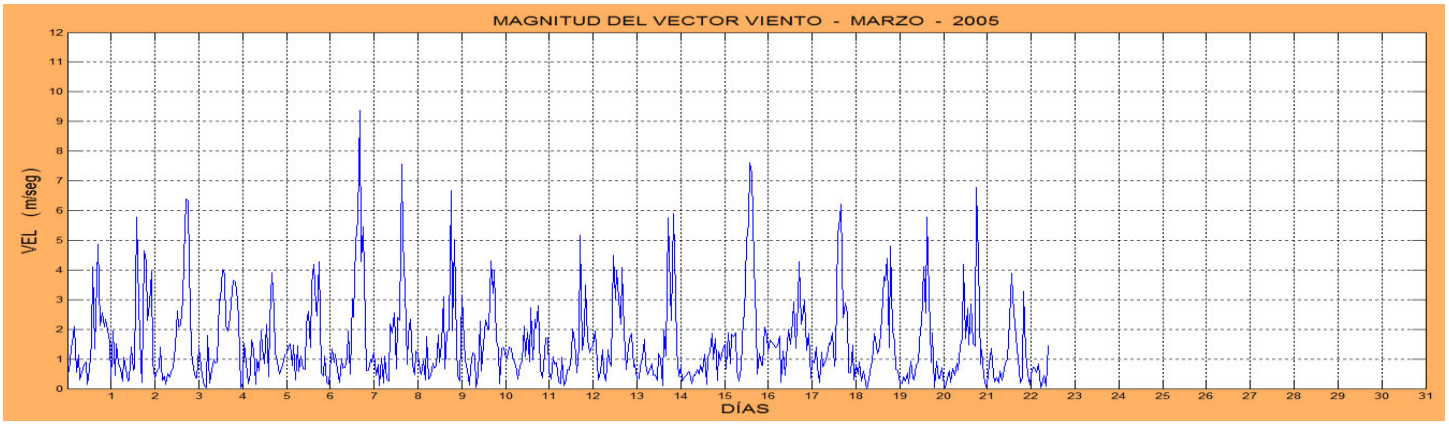

Figura A.14 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Marzo del año 2005.

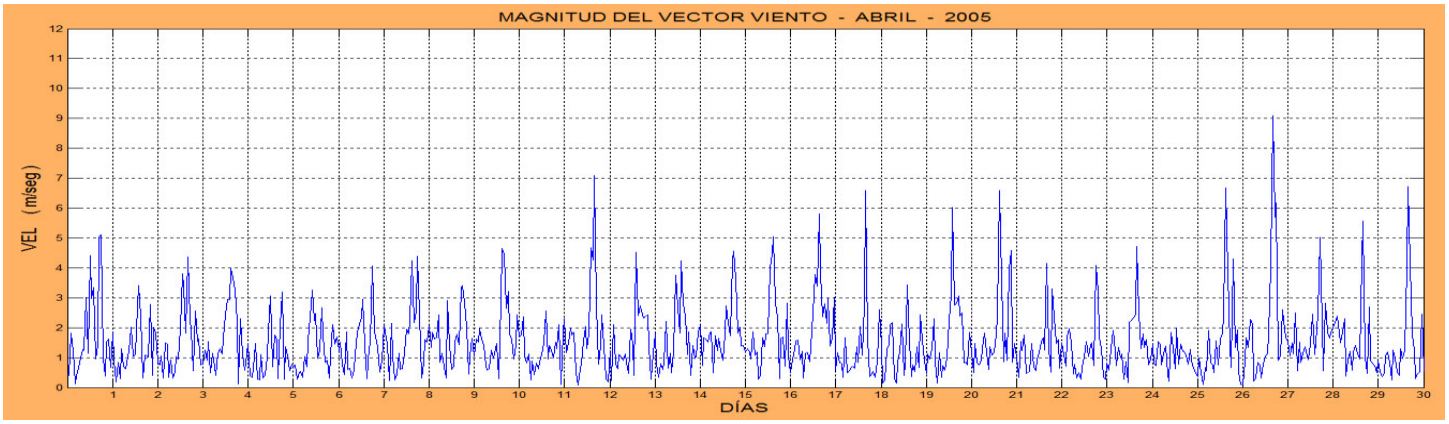

Figura A.15 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Abril del año 2005.

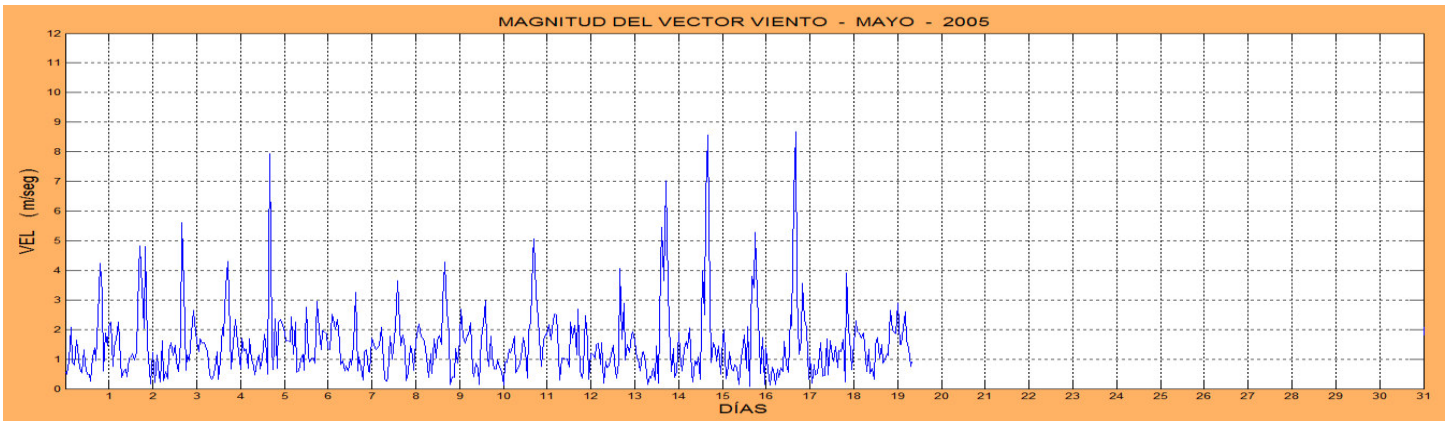

Figura A.16 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Mayo del año 2005.

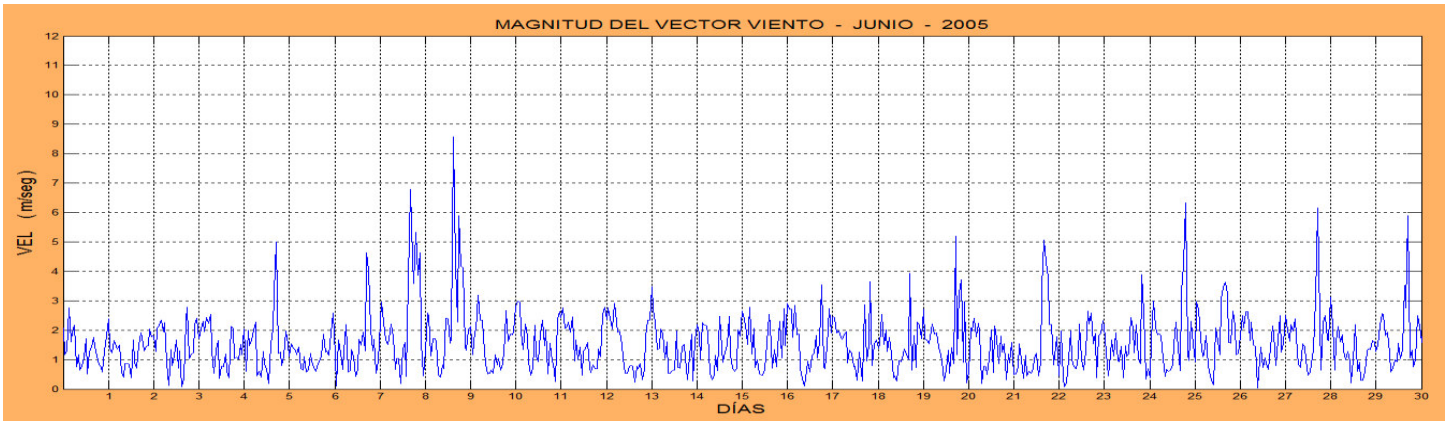

Figura A.17 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Junio del año 2005.

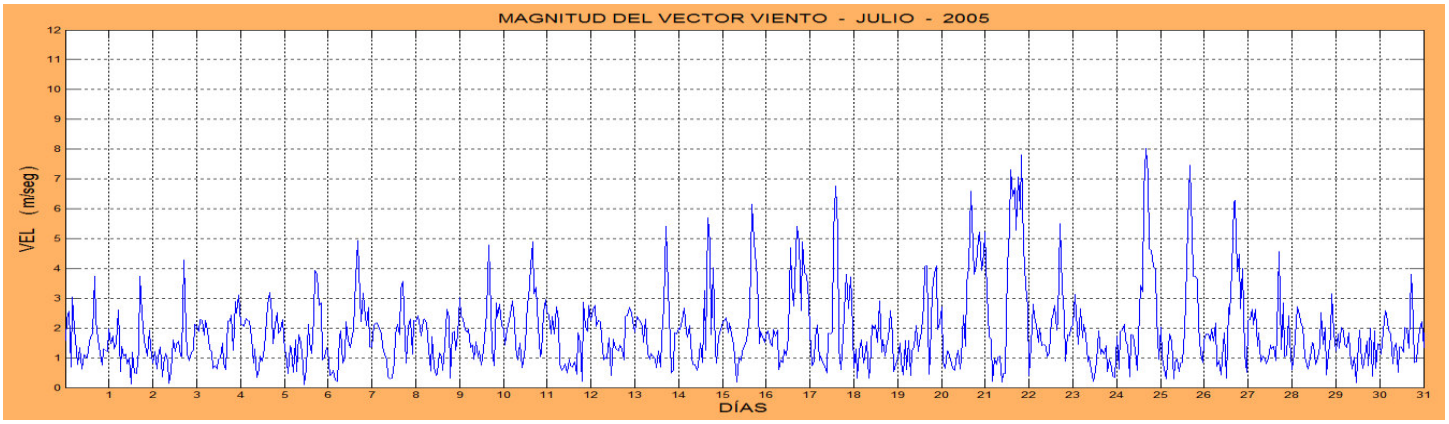

Figura A.18 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Julio del año 2005.

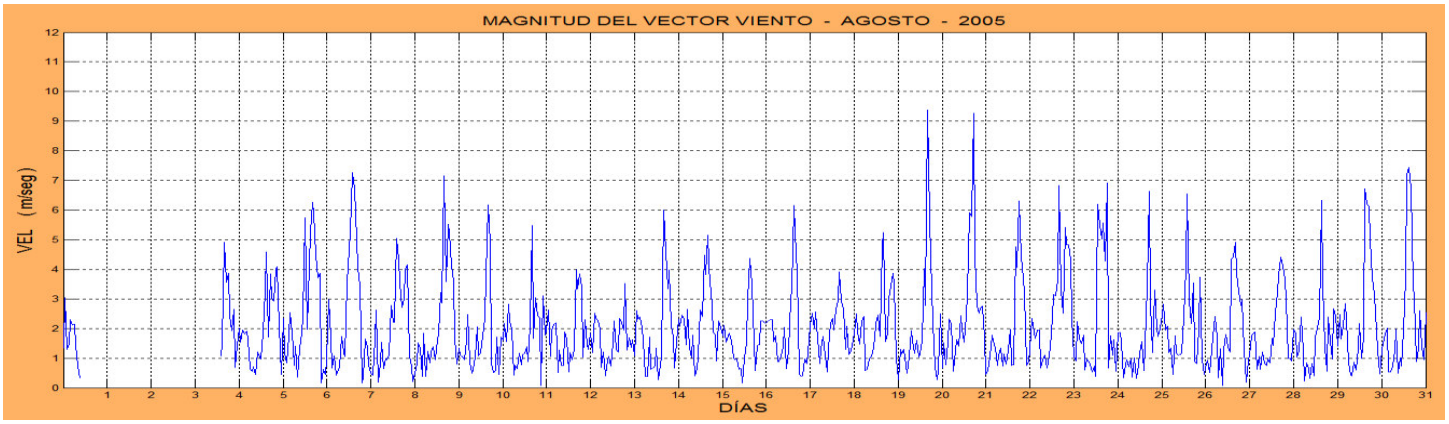

Figura A.20 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Agosto del año 2005.

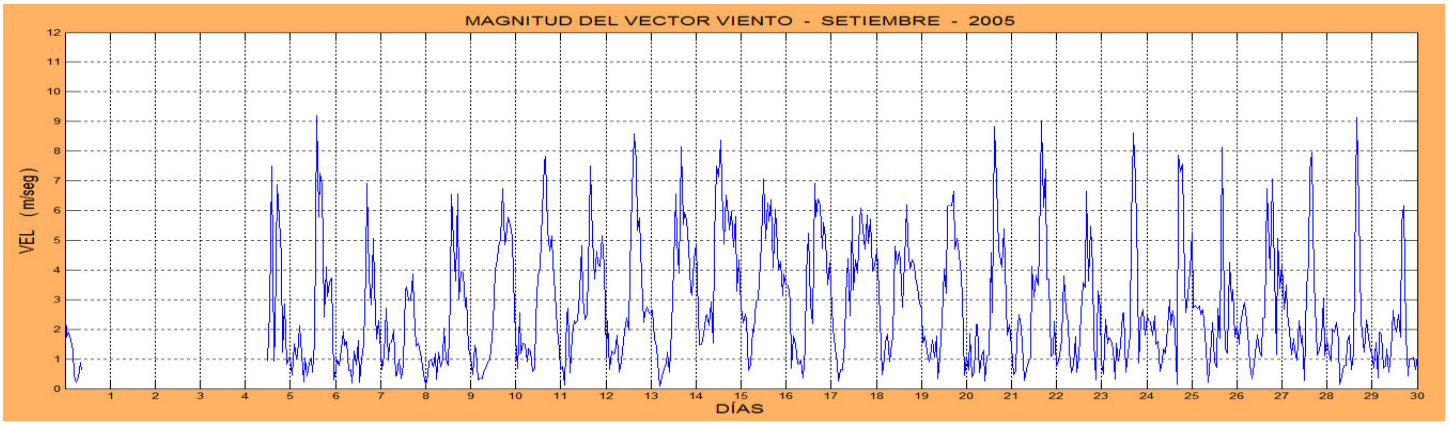

Figura A.21 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Setiembre del año 2005.

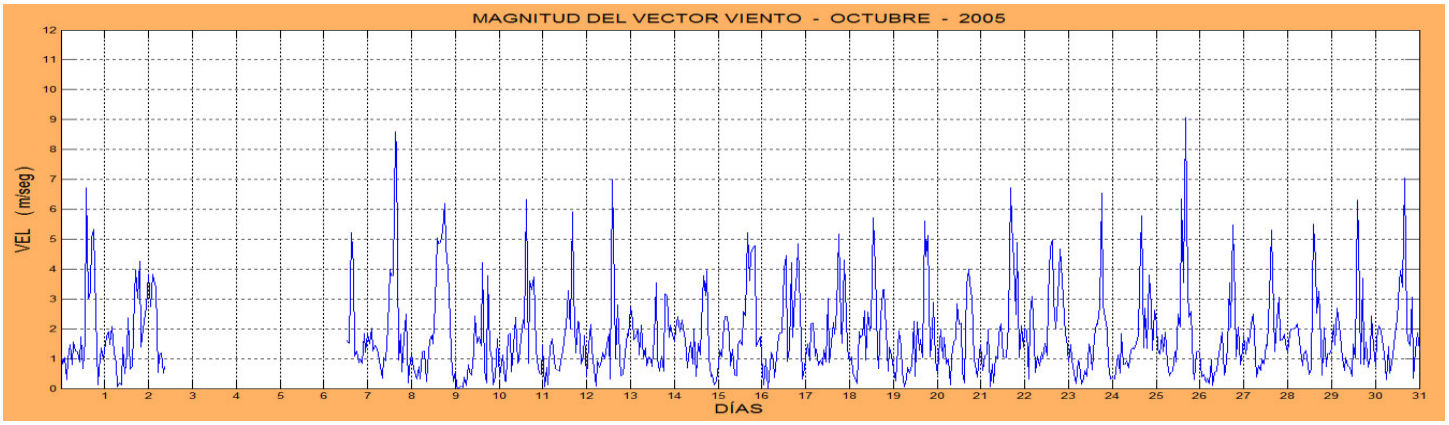

Figura A.22 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Octubre del año 2005.

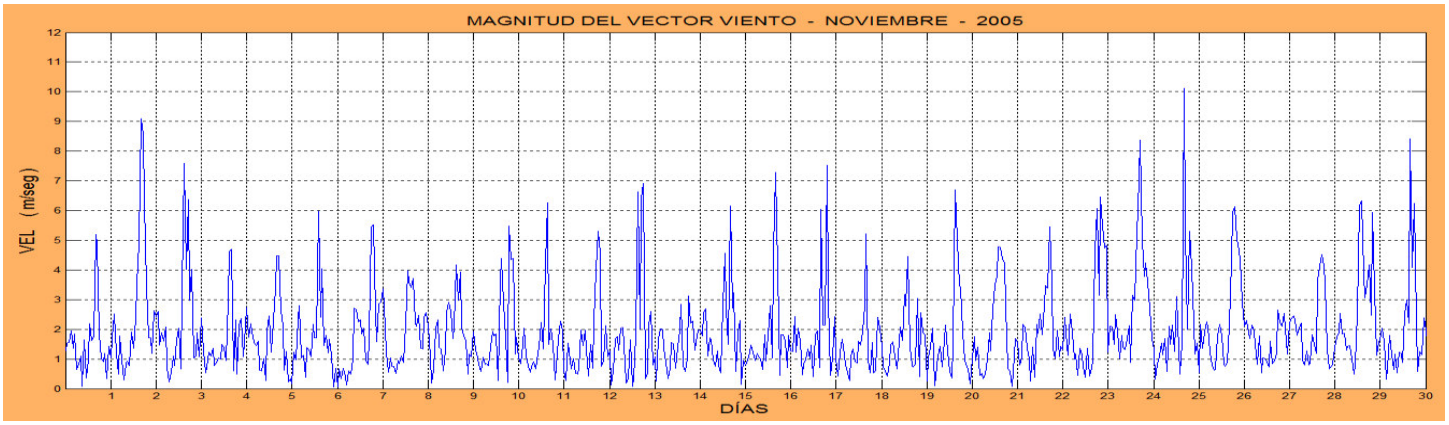

Figura A.23 Serie temporal de los datos horarios de la magnitud del vector viento para el mes de Noviembre del año 2005.

A.3 Componente zonal y meridional del vector viento – año 2005

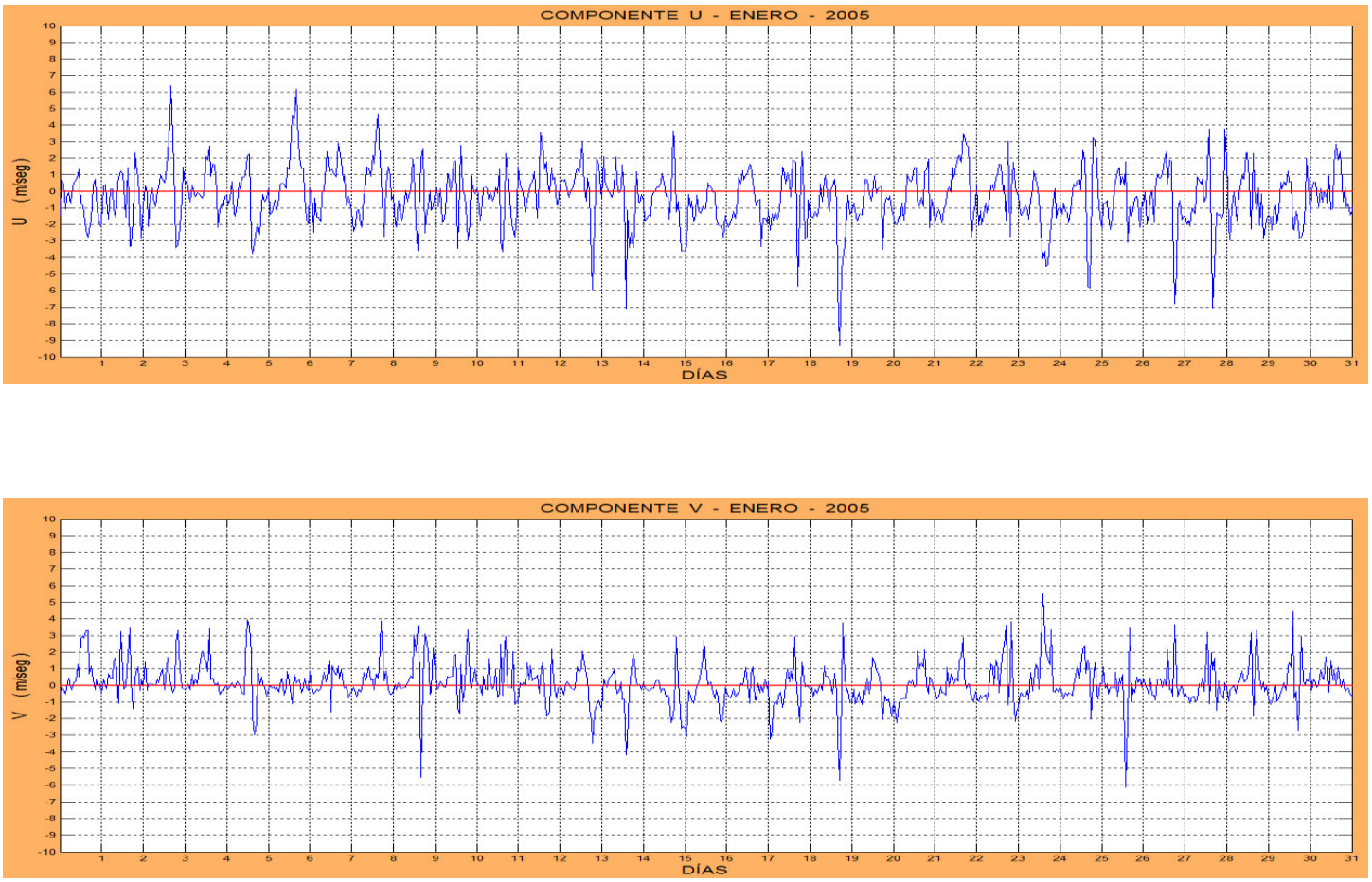

Figura A.24 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Enero del año 2005.

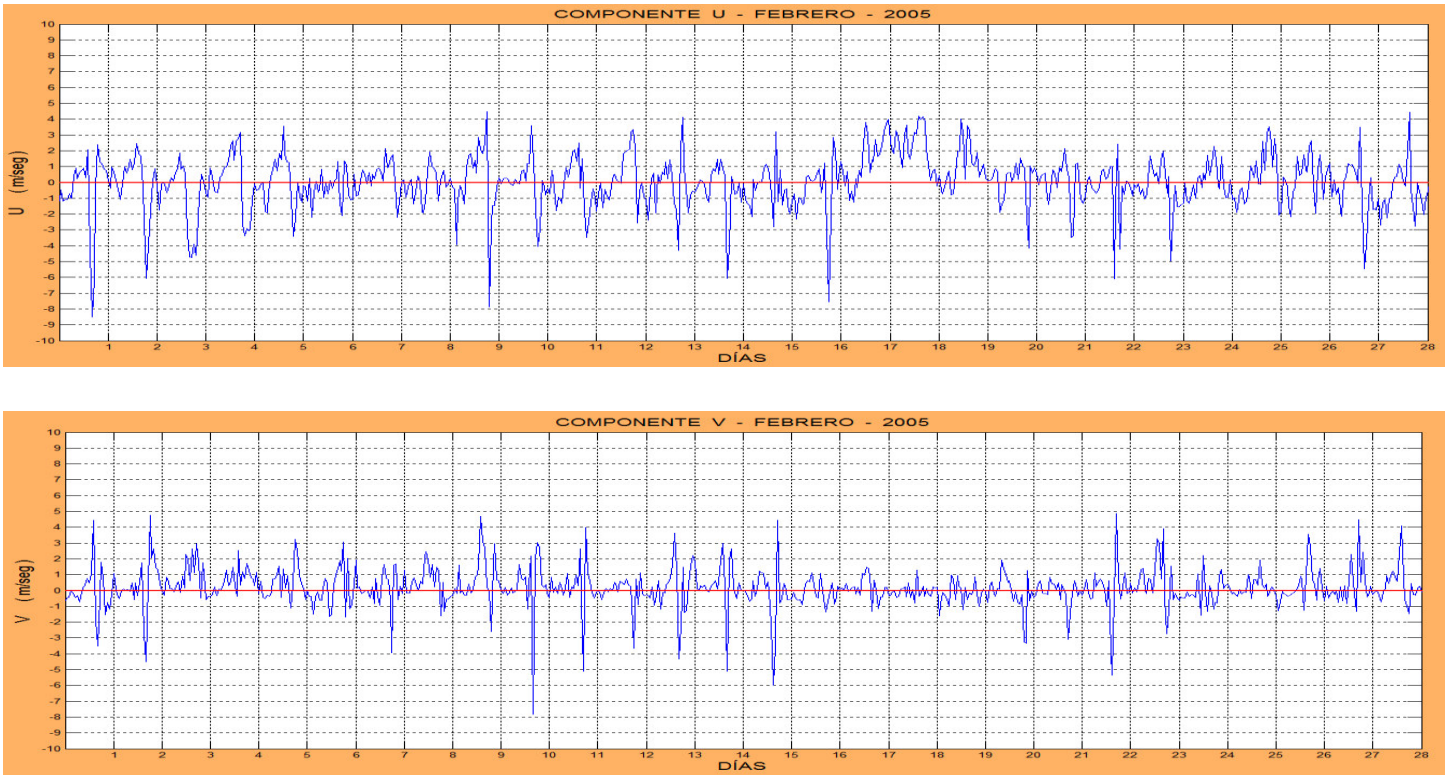

Figura A.25 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Febrero del año 2005.

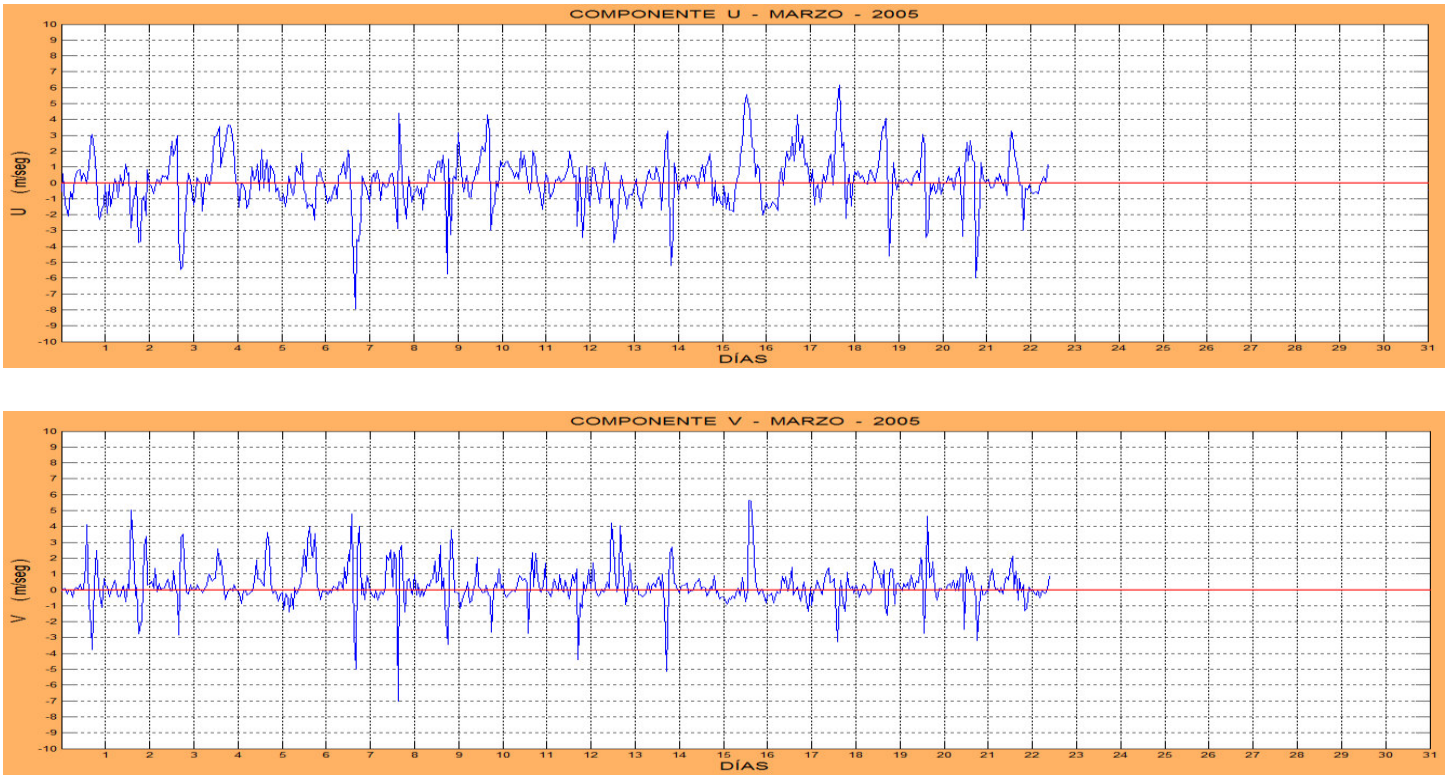

Figura A.26 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Marzo del año 2005.

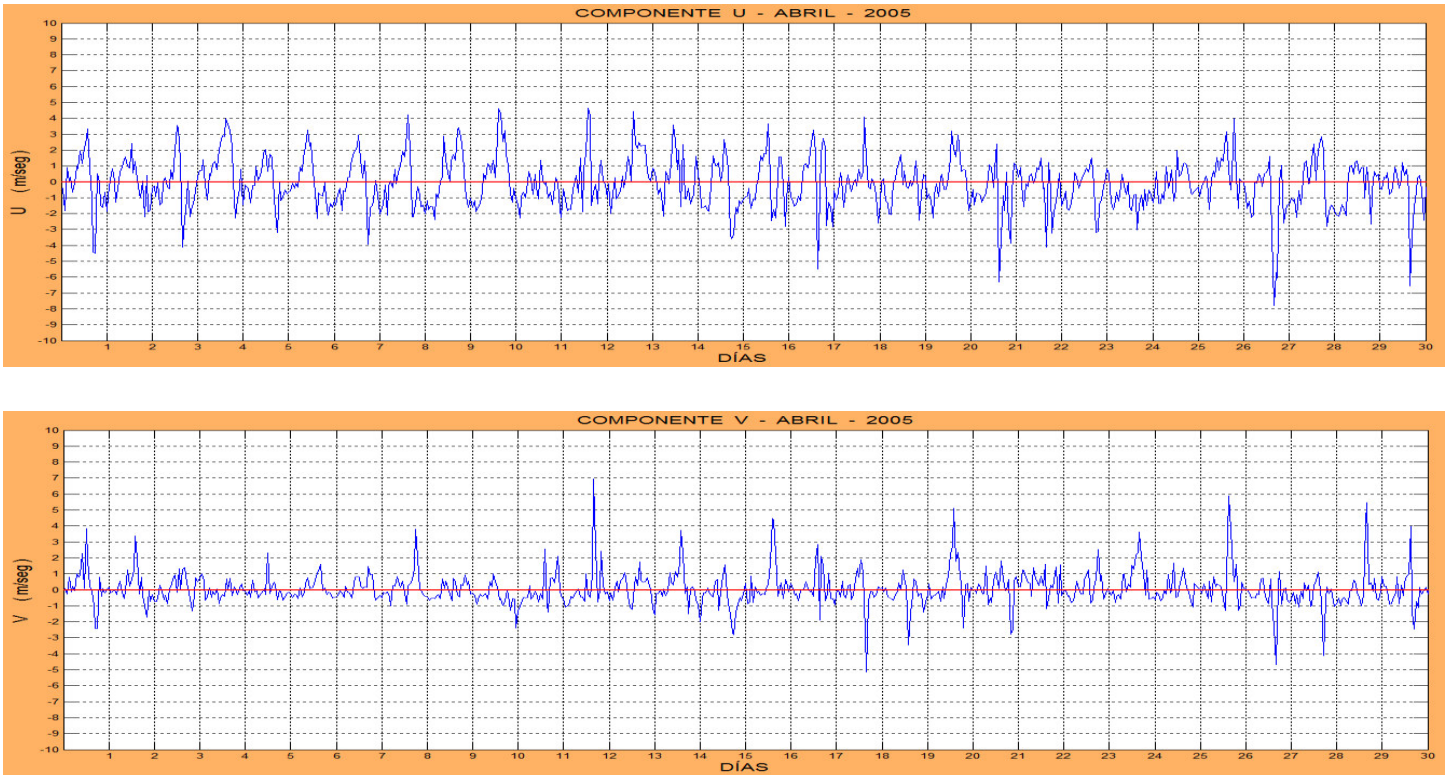

Figura A.27 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Abril del año 2005.



Figura A.28 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Mayo del año 2005.

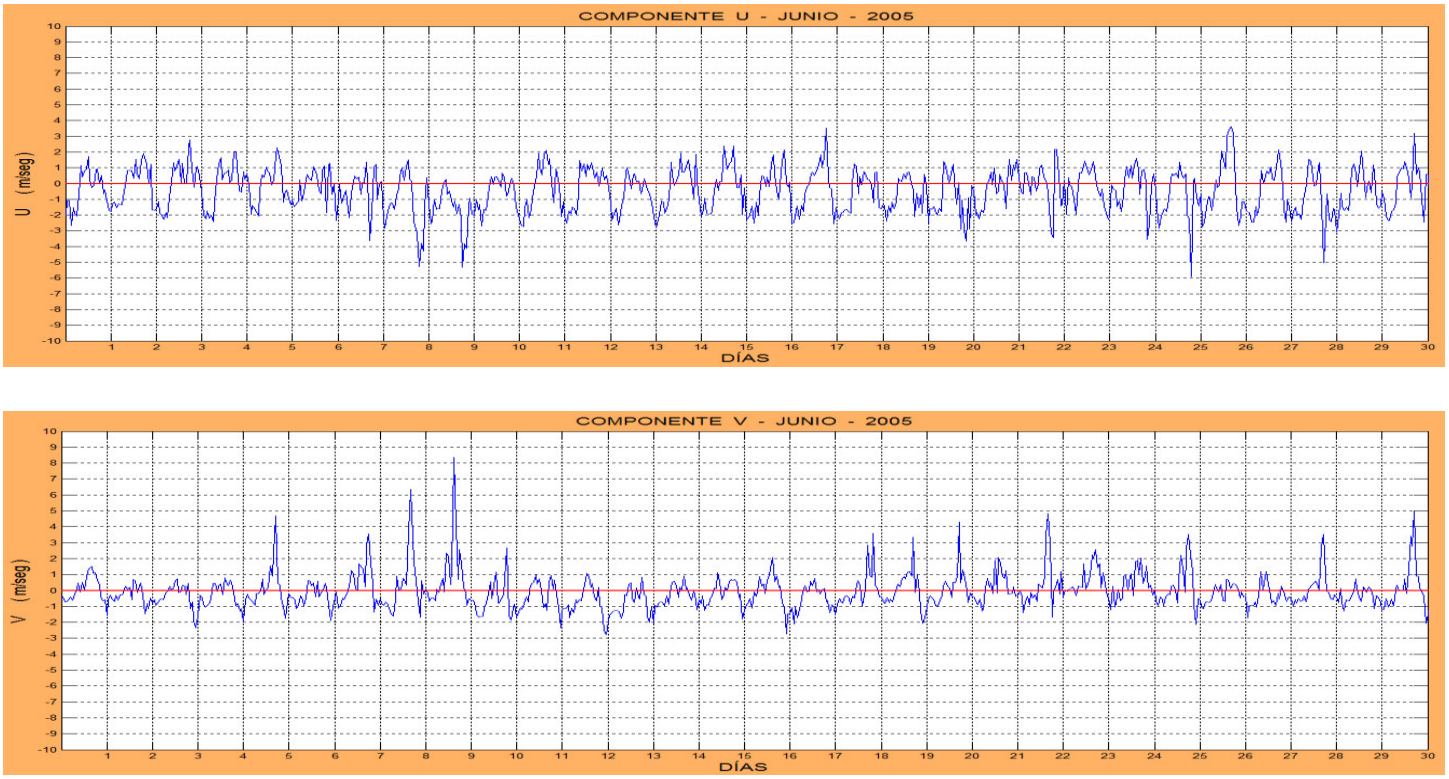

Figura A.29 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Junio del año 2005.

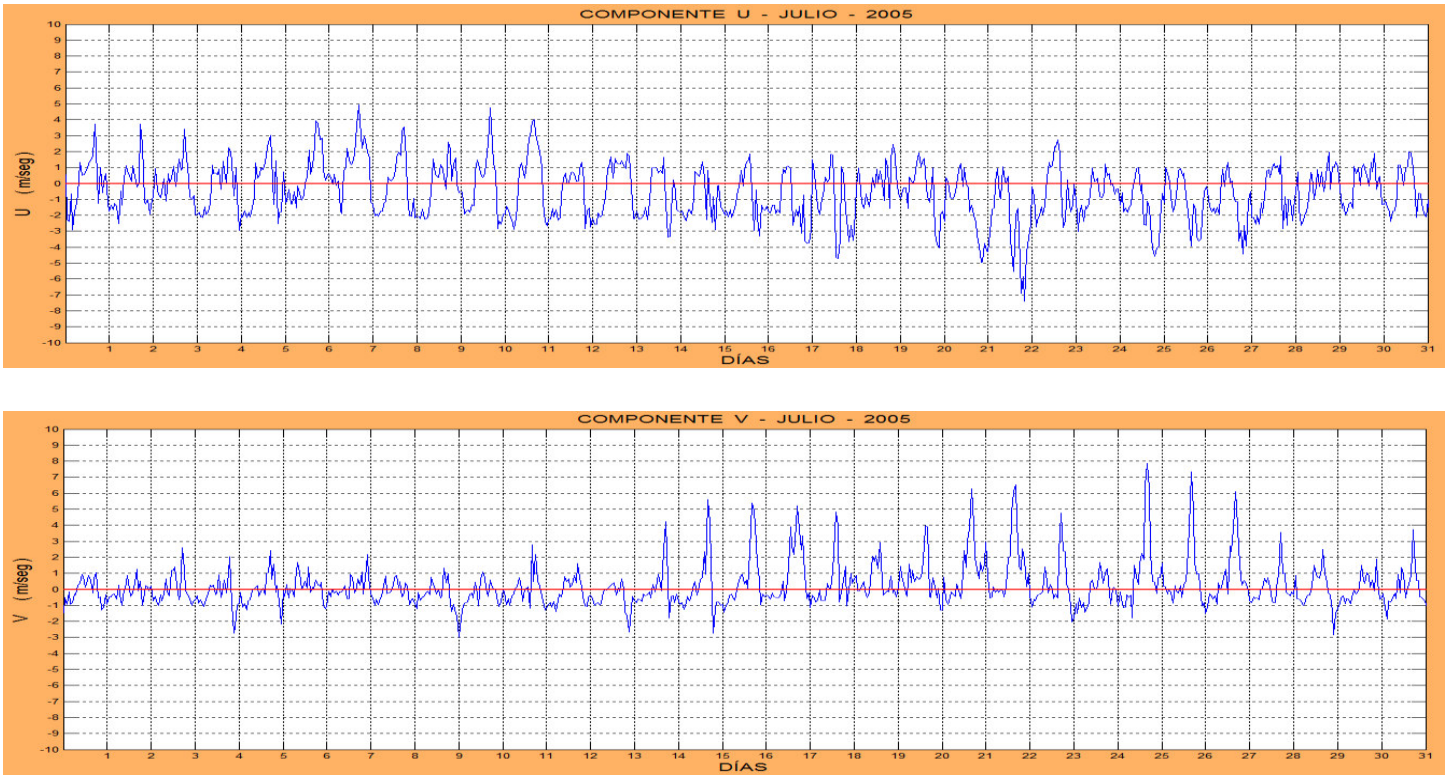

Figura A.30 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Julio del año 2005.

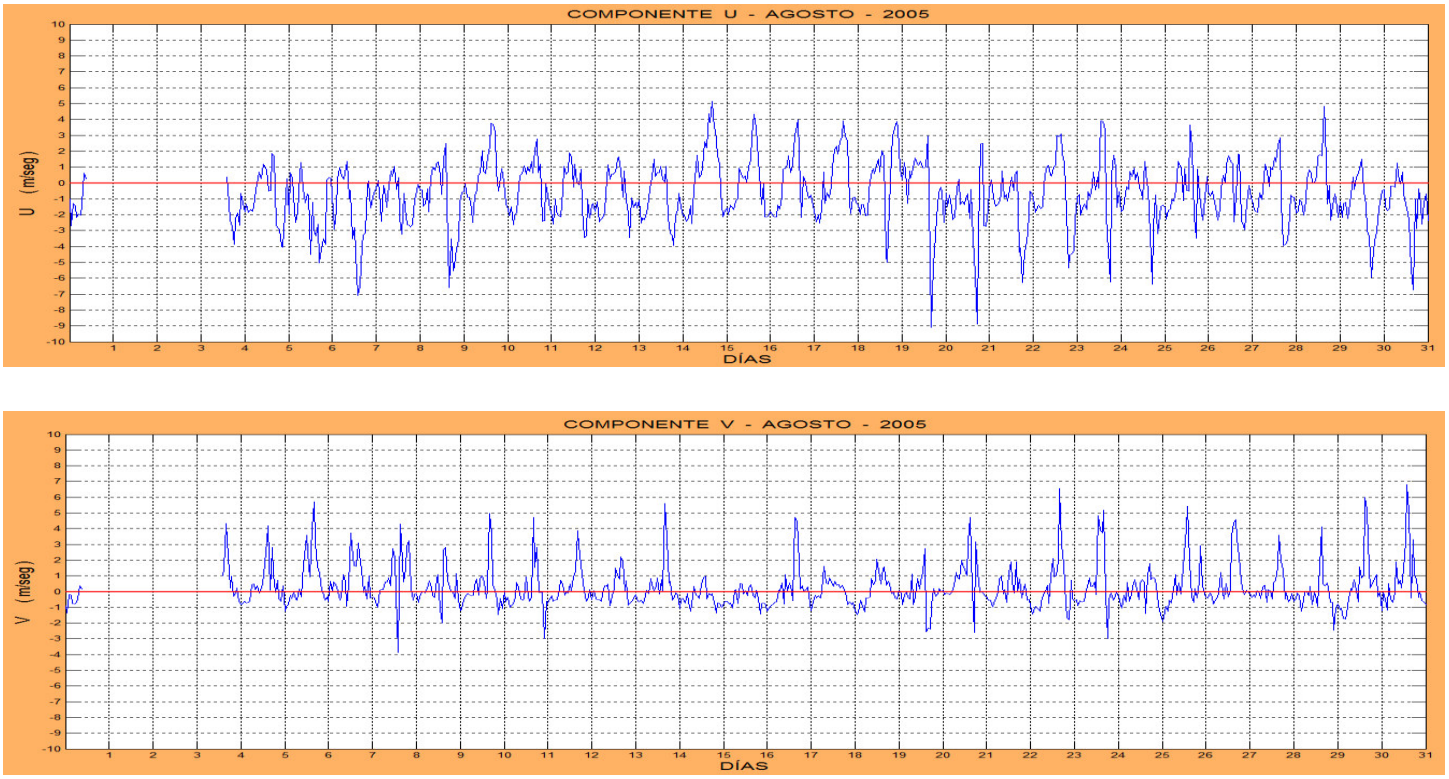

Figura A.31 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Agosto del año 2005.

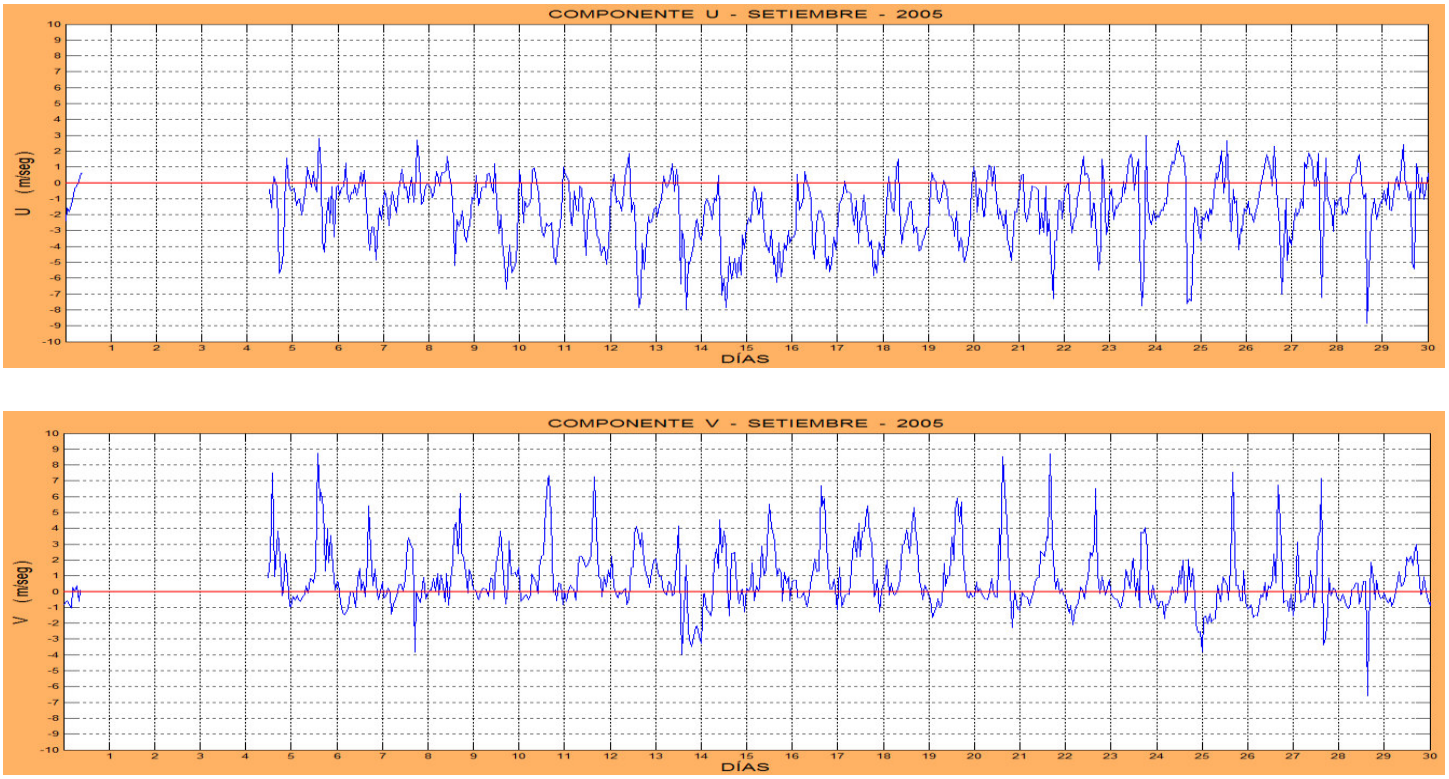

Figura A.32 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Setiembre del año 2005.

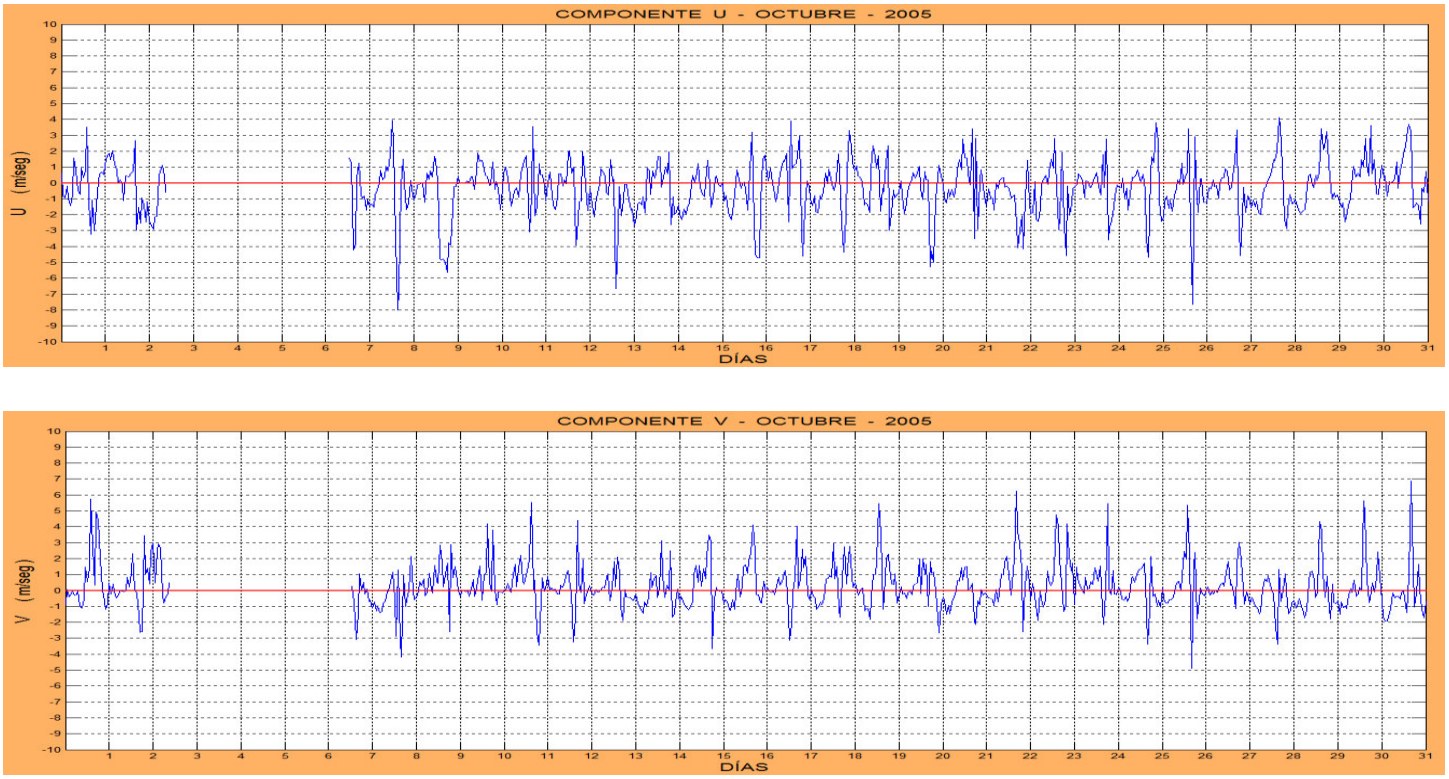

Figura A.33 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Octubre del año 2005.

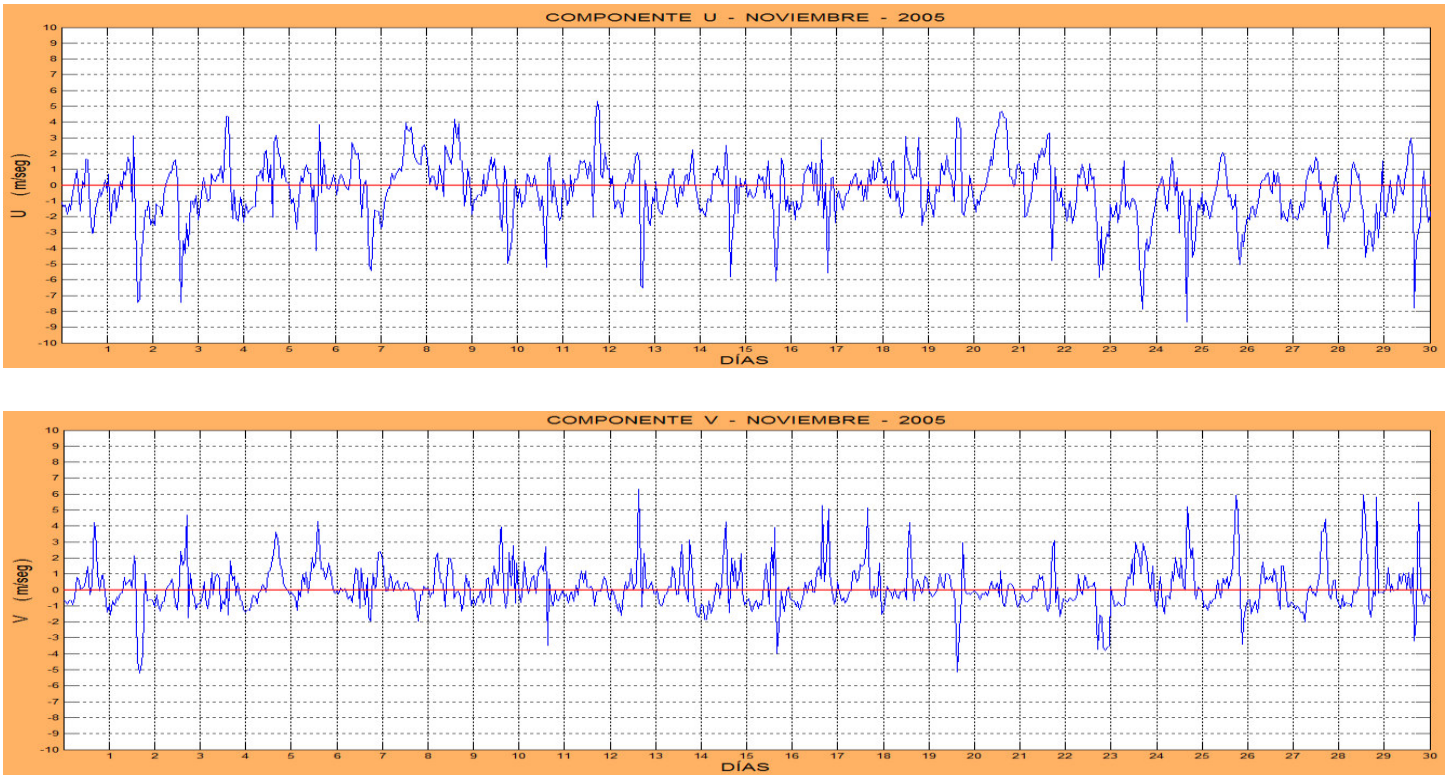

Figura A.34 Serie temporal de los datos horarios de la componente zonal (U) y meridional (V) del vector viento para el mes de Noviembre del año 2005.

Referencias

Barbero A. J., (2012). Curso de Física Ambiental. Universidad de Castilla - La Mancha. Recuperado de https://previa.uclm.es/profesorado/ajbarbero/faa/eeolica_febrero2012g9.pdf.

Bañuelos F., Ángeles C., Serrano J. y Muciño D. (2008). Análisis y Validación de metodología usada para la obtención de perfiles de velocidad de viento. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de https://es.scribd.com/doc/11545563/Analisis-de-perfiles-verticales-de-viento.

Buenestado P., (2003). Análisis y caracterización de la capa superficial atmosférica (Tesis de Doctorado). Universitat de Barcelona.

Dai A., (2001). Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part II: diurnal variations. Jour. Clim. Vol. 14, pp. 1112 – 1128.

Dai A., Deser C., (1999). Diurnal and semidiurnal variations in global surface wind and divergence field. Jour. Geophys. Res. Vol. 104, pp. 31109 – 31124.

Dai A., Wang J., (1999). Diurnal and semidiurnal tides in global surface pressure fields. Jour. Atmos. Sci. Vol. 56, pp. 3874 – 3891.

Dalma M., (2013). Simulación de la circulación atmosférica a nivel superficial para la cuenca del río del Mantaro usando el modelo atmosférico de mesoescala MM5 (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Deser C., (1994). Daily surface wind variations over the equatorial Pacific Ocean. Jour. Geophys. Res. Vol. 99, pp. 23071 – 23078.

Deser C., Smith C., (1997). Diurnal and semidiurnal variations of the surface wind field over the tropical Pacific Ocean. Jour. Climate. Vol. 11, pp. 1730 – 1748.

Egger J., (1987). Valley Winds and the Diurnal circulations Over Plateaus. Monthly weather Review. Vol. 115, pp. 2177 - 2184.

Espejo M. C., (2004). La energía eólica en España. Universidad de Alicante. Instituto Universitario de Geografía.

Ferris D., (2010). Regional vs. Local Impact of Wind on Glaciers in the Andes Mountains. The Undergraduate Review, vol. 6, pp. 72-76. Recuperado de http://vc.bridgew.edu/undergrad_rev/vol6/iss1/15.

Figuerola S., Martínez S., Ochoa D., (2017). Generación de series temporales de velocidad de viento para su utilización en estudios de integración de generación eólica en la red eléctrica. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

Garreaud R., (2009). The Andes climate and weather. Adv. Geosci., vol. 22, pp. 3 - 11. Recuperado de https://doi.org/9.5194/adgeo-22-3-2009.

Hering, W. S., Borden T. R., (1962). Diurnal variations in the summer wind field over the central United States. Jour. Atmos. Sci. Vol. 19, pp. 81 – 86.

Hernández – Escobedo, Espinoza – Arenal, Saldaña - Flores, Rivera - Blanco, (2012). Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz, México. DYNA, vol. 79, pp. 215 – 221.

IPCC, (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1132.

Krishnamurti T., Kishtawal C., (2000). A pronounced continental-scale diurnal mode of the Asian summer monsoon. Mon. Weather Rev. Vol. 128, pp. 462 -473.

Lin X, Randall D, Fowler L (2000) Diurnal variability of the hydrologic cycle and radiative fluxes: comparisons between observations and a GCM. Jour. Clim. Vol. 13, pp. 4159–4179.

Mamani. D. (2013), Simulación de la circulación atmosférica a nivel superficial para la cuenca del río del Mantaro usando el modelo atmosférico de mesoescala MM5 (Tesis de Licenciatura). Facultad Ciencias Físicas. UNMSM.

Mamani D. y Silva Y., (2010). Vientos superficiales en el valle del Mantaro. Memoria del subproyecto "Pronóstico estacional de lluvias y temperaturas en la cuenca del río Mantaro para su aplicación en la agricultura" 2007 – 2010. Instituto Geofísico del Perú, Lima. Pp. 25 – 31.

Martín V., Ungerovich M., (2017). Componente geográfica del clima. Universidad de la República, Departamento de Ciencias de la Atmosfera.

Muñoz A. C. 2002. Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia. Top. Meteor. Oceanog. 9(1):1-12.

Muñoz R. C., (2008). Diurnal cycle of surface winds over the subtropical southeast Pacific. Jour. Geophys. Res. Vol. 113, D13107.

Nesbitt S., Zipser E., (2003). The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of TRMM measurements. Jour. Clim. Vol. 16, pp.1456–1475.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería – Osinerming (2018). Informe de Resultados Consumo y Usos de la Electricidad Encuesta Residencial de Uso y Consumo de Energía ERCUE 2018. Pp. 8 – 9.

Peralta J., López Á., Sosa I., Delgado E., Barriga A., (2013). Evaluación energética y análisis estadístico del régimen de vientos del perfil costero ecuatoriano. Recuperado de https: //www.researchgate.net/publication/269572365.

Picard A., Davis R. S., Gläser, M., Fujii, K., Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). Metrología, vol. 45 (2008), pp. 149 – 154.

Racero A. C., (2012). Viabilidad de un Parque Eólico con Sistema de Almacenamiento de Energía Mediante el uso de Modelos de Predicción. Trabajo fin de grado. Universidad de Sevilla. Departamento de Energía Eléctrica. Sevilla, España. Pp. 36.

Rodriguez VA., (2008). Wind power adapted to load hollow on the Canary Island-2014. DYNA, 83, pp. 157-163.

Savijarvi H., (1997). Diurnal winds around Lake Tanganyika. Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc. Vol. 123, pp. 901 – 918.

Scott C., (2004). Diurnal cycle of rainfall and surface winds and the mid-summer drought of Mexico/Central America. Climate Res. Vol. 27, pp. 1 - 8.

Serrano J., (2013). Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica. Scientia et Technica, 319.

Sierra L. G., (2015). Diseño de investigación de la estimación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en la finca la concha, ubicada en la aldea el Jocotillo, Villa Canales, Guatemala (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala.

Sivaramakrishnan T. R., Rama G. V., Prakash Rao P. S., (1993). Diurnal wind variation in the planetary boundary layer (PBL) over Sriharikota, India. Boundary - Layer Meteorology. Vol. 63, pp. 1 – 2.

Wang C., Chen G., Carbone R., (2004). A climatology of warm-season cloud patterns over East Asia based on GMS infrared brightness temperature observations. Mon. Weather Rev. Vol.132, pp.1606–1629.

Xie K., Billinton R., 2011. Energy and reliability of wind energy conversion systems. Renewable Energy, 36, pp. 1983-1988.

Yang G., Slingo J., (2001). The diurnal cycle in the tropics. Mon. Weather Rev. Vol. 129, pp.784–801.

Yu R. C., Li J., and Chen H. M., (2009). Diurnal variation of surface wind over central eastern China. Climate Dyn. Vol. 33, pp. 1089–1097.

Zardi, D., Whiteman C., (2012). Diurnal mountain wind systems. Chapter 2 in: Mountain Weather Research and Forecasting (Chow, F. K., S. F. J. DeWekker, and B. Snyder (Eds.)). Springer, Berlin. Pp. 35-119.

Zhang, Da-Lin, Wei-Zhong Zheng, (2004). Diurnal cycles of surface winds and temperatures as simulated by five boundary layer parameterizations. J. Appl. Meteor., vol. 43, pp. 157 –169.