

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS



MODELO MATEMATICO PARA LA  
CARACTERIZACION DEL VIENTO  
EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
M A T E M A T I C A  
P R E S E N T A

ROSARIO DE LOURDES ROMERO CENTENO

DIRECTOR DE TESIS: DR. ARTEMIO GALLEGOS G.



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNAM

288321

2 0 0 1



FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCION ESCOLAR



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

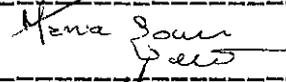
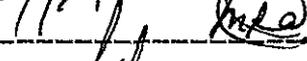
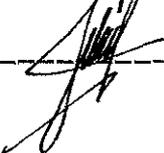


REPUBLICA NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MEXICO

**MAT. MARGARITA ELVIRA CHÁVEZ CANO**  
**Jefa de la División de Estudios Profesionales de la**  
**Facultad de Ciencias**  
**Presente**

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis:  
 Modelo matemático para la caracterización del viento en el  
 Istmo de Tehuantepec.  
 realizado por Rosario de Lourdes Romero Centeno  
 con número de cuenta 7230391-1 , pasante de la carrera de Matemáticas.  
 Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis	Dr. Artemio Gallegos García	
Propietario	M.C. Lourdes Velasco Arregui	
Propietario	Dr. Alejandro López Yáñez.	
Suplente	Dra. Ma. de la Paz Álvarez Scherer	
Suplente	Dr. Jesús López Estrada	

Consejo Departamental de Matemáticas



Dr. Héctor Méndez Lango

## **DEDICATORIA**

A la memoria de mi madre

Ma. Isabel Centeno Trillo

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Artemio Gallegos García, director de este trabajo de tesis, por su constante apoyo y colaboración.

A los sinodales M.C. Lourdes Velasco Arregui, Dr. Alejandro López Yáñez, Dra. Ma. De la Paz Álvarez Sherer y Dr. Jesús López Estrada por sus sugerencias y correcciones al texto.

A mi esposo Dr. Jorge Zavala Hidalgo por sus acertados comentarios y su invaluable ayuda en la realización de este trabajo.

A Ingeniería, Geofísica y Sistemas, S.A. de C.V., a todo el personal que ahí labora por el apoyo proporcionado en la captura y procesamiento de los datos y en el desarrollo de la investigación.

# ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	i
<b>ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS</b> .....	iii
<b>CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN</b> .....	1
I.1 INTRODUCCIÓN.....	1
I.2 LOCALIZACIÓN DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC.....	1
I.3 LOS VIENTOS EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC.....	2
I.3.1 <i>Influencias del terreno sobre el campo de viento</i> .....	4
I.3.2 <i>Variación estacional del viento en la región del Istmo</i> .....	8
<b>CAPÍTULO II – DESCRIPCIÓN DE LAS SERIES DE DATOS</b> .....	9
II.1 EXTENSIÓN DE LAS SERIES DE DATOS.....	9
II.2 DATOS DEL OBSERVATORIO DE COATZACOALCOS.....	10
II.3 DATOS DEL OBSERVATORIO DE SALINA CRUZ (fuente: SMN).....	10
II.4 DATOS DEL OBSERVATORIO DE SALINA CRUZ (fuente: CICESE).....	10
II.5 DATOS DE VIENTO DE LA MATA Y LA VENTA.....	11
II.6 DATOS DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA DEL NCDC.....	11
II.7 OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN.....	12
<b>CAPÍTULO III – METODOLOGÍA</b> .....	13
III.1 VARIABILIDAD ANUAL, MENSUAL, ESTACIONAL Y DIARIA DEL VIENTO... 13	
III.1.1 <i>Velocidad media del viento y velocidad del viento resultante</i> .....	13
III.1.2 <i>Variabilidad anual y mensual de la rapidez del viento</i> .....	14
III.1.3 <i>Variabilidad estacional de la rapidez del viento</i> .....	15
III.1.4 <i>Variaciones diurnas de la rapidez del viento</i> .....	17
III.1.5 <i>Distribuciones de dirección y rapidez del viento</i> .....	17
III.2 LA DISTRIBUCIÓN WEIBULL.....	19
III.3 DIFERENCIAS DE PRESIÓN.....	20
III.4 DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN Y COEFICIENTES DE CORRELACIÓN.....	21
III.4.1 <i>Diagramas de dispersión</i> .....	21
III.4.2 <i>Coefficiente de correlación</i> .....	21
III.5 ANÁLISIS DE REGRESIÓN.....	22
<b>CAPÍTULO IV – ANÁLISIS DE LOS DATOS</b> .....	23
IV.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE SALINA CRUZ (fuente: SMN).....	23
IV.1.1 <i>Dirección del viento</i> .....	23
IV.1.2 <i>Rapidez del viento</i> .....	25

IV.2	ANÁLISIS DE LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE SALINA CRUZ (fuente: CICESE).....	30
	<i>IV.2.1 Dirección del viento</i> .....	30
	<i>IV.2.2 Rapidez del viento</i> .....	32
IV.3	ANÁLISIS DE LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE COATZACOALCOS.....	35
	<i>IV.3.1 Dirección del viento</i> .....	35
	<i>IV.3.2 Rapidez del viento</i> .....	37
IV.4	ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LA VENTA Y LA MATA.....	38
	<i>IV.4.1 Dirección del viento</i> .....	38
	<i>IV.4.2 Rapidez del viento</i> .....	39
IV.5	ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PRESIÓN Y SU CORRELACIÓN CON EL VIENTO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC.....	43
	<i>IV.5.1 Los sistemas de presión en el Golfo de México</i> .....	43
	<i>IV.5.2 El viento en La Venta y las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC</i> ..	47
	<i>IV.5.3 El viento en La Venta y las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos</i> ..	50
	<i>IV.5.4 El viento en Salina Cruz y las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC</i> .....	53
	<i>IV.5.5 El viento en Salina Cruz y las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos</i> .....	56
<b>CAPÍTULO V – ESTIMACIÓN DE LOS VIENTOS EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC</b> .....		61
V.1	ESTIMACIÓN DEL VIENTO EN LA VENTA A PARTIR DE LOS DATOS DE PRESIÓN REGISTRADOS EN LOS OBSERVATORIOS DE SALINA CRUZ Y COATZACOALCOS.....	61
V.2	CLIMATOLOGÍA DEL VIENTO EN LA VENTA.....	66
	<i>V.2.1 Comparación entre los datos de presión registrados en Salina Cruz y Coatzacoalcos y los datos de presión del NCDC</i> .....	66
	<i>V.2.2 Vientos estimados en La Venta para el periodo de 1964 a 1995</i> .....	68
	<i>V.2.2.1 Promedios mensuales y anuales del viento estimado en La Venta</i> .....	71
	<i>V.2.3 Variabilidad interanual</i> .....	72
	<i>V.2.3.1 El Niño y La Niña</i> .....	72
<b>CAPÍTULO VI – DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b> .....		75
VI.1	DISCUSIÓN.....	75
VI.2	CONCLUSIONES.....	76
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....		78
<b>APÉNDICE</b> .....		A-1

# ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

## TABLAS

Tabla 3.1: Promedios y desviaciones estándar mensuales globales de rapidez del viento en Coatzacoalcos y Salina Cruz considerando los datos del período 1984-1988.....	16
Tabla 4.1: Promedios y desviaciones estándar mensuales y anuales de rapidez del viento (m/s) en Salina Cruz para el período 1983-1988.....	26
Tabla 4.2: Promedios, desviaciones estándar y valores de los parámetros de las distribuciones Weibull ajustadas para los datos de rapidez del viento en Salina Cruz considerando las observaciones del período 1983-1988.....	29
Tabla 4.3: Promedios y desviaciones estándar de rapidez del viento (m/s) para los datos agrupados En abanicos norte y sur durante los inviernos y veranos de 1983 a 1988 en Salina Cruz.....	30
Tabla 4.4: Promedios y desviaciones estándar anuales de la rapidez del viento medio y rapidez máxima en Salina Cruz para el período 1953-1988 de la base de datos del CICESE.....	32
Tabla 4.5: Promedios mensuales y anuales de rapidez del viento (m/s) en Salina Cruz para los períodos 1964-1979 y 1986-1988 obtenidos con los datos del CICESE y del CLICOM.....	33
Tabla 4.6: Promedios, desviaciones estándar y parámetros de las distribuciones Weibull ajustadas a los datos de rapidez del viento en Salina Cruz considerando el conjunto de todos los vientos y los vientos agrupados en abanicos norte y sur para las observaciones del período 1964-1988.....	33
Tabla 4.7: Promedios y desviaciones estándar mensuales y anuales de rapidez del viento (m/s) en Coatzacoalcos para los períodos 1984-1988 y 1994-1995.....	37
Tabla 4.8: Promedios mensuales, anuales y por estación (invierno-verano) para los datos de rapidez del viento en La Venta durante 1994 y 1995.....	40
Tabla 4.9: Valores de los parámetros de las distribuciones Weibull ajustadas a las observaciones de rapidez del viento en La Venta durante 1994 y 1995.....	42
Tabla 4.10: Proporción anual de diferencias de presión positivas y negativas entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec para los años de 1964 a 1994.....	44
Tabla 4.11: Coeficientes de correlación entre las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC y la rapidez del viento en La Venta considerando: el viento observado a las 0 Z y 12 Z (Rap V); el viento del abanico norte o del abanico sur registrado a las 0 Z y 12 Z (Ab. Norte, Ab. Sur); las componentes u y v del viento observado a las 0 Z y 12 Z, y los valores de las componentes promediados en 12 horas ( $u_{\pm 6}$ y $v_{\pm 6}$ ).....	49
Tabla 4.12: Coeficientes de correlación entre las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos y la rapidez del viento observado en La Venta, considerando: el conjunto de todos los vientos (Rap V); los vientos del abanico norte o del abanico sur (Ab. Norte, Ab. Sur), y los valores de las componentes u y v.....	53

Tabla 4.13:	Coefficientes de correlación entre las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC y la rapidez del viento en Salina Cruz, considerando: el viento observado a las 0 Z y 12 Z (Rap V); el viento del abanico norte o del abanico sur registrado a las 0 Z y 12 Z (Ab. Nte., Ab. Sur); las componentes u y v del viento registrado a las 0 Z y 12 Z, y los valores de las componentes promediados en 12 horas ( $u_{\pm 6}$ , $v_{\pm 6}$ ).....	56
Tabla 4.14:	Coefficientes de correlación entre las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos y la rapidez del viento observado en Salina Cruz, considerando: el conjunto de todos los vientos (Rap V); los vientos del abanico norte o del abanico sur (Ab. Norte, Ab. Sur), y los valores de las componentes u y v.....	60
Tabla 5.1:	Parámetros de las rectas ajustadas por mínimos cuadrados a los datos de rapidez de los vientos del abanico norte y del abanico sur en La Venta con respecto a las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	63
Tabla 5.2:	Coefficientes de correlación entre los valores de la presión observada en los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos y los valores de la presión registrados en los vértices $P_{GT}$ y $P_{GM}$ del NCDC, y entre los conjuntos de diferencias de presión $\Delta P_{NCDC}$ y $\Delta P_{SC-C}$ .....	67
Tabla 5.3:	Coefficientes de correlación entre la rapidez del viento estimado en La Venta para el periodo 1964-1995 y la rapidez de los vientos observados en Salina Cruz y La Venta.....	71
Tabla 5.4:	Promedios y desviaciones estándar mensuales globales y anual global para la rapidez del viento estimado en La Venta durante el periodo 1964-1994.....	72
Tabla 5.5:	Años en los cuales ocurrió un evento de El Niño o La Niña durante el periodo de 1964 a 1995 según el índice de la Japan Meteorological Agency.....	73
Tabla 5.6:	Promedios mensuales y anuales globales de rapidez del viento (m/s) en La Venta considerando los años en los que ocurrió un evento de El Niño o de La Niña.....	73
Tabla A.1:	Escalas espacial y temporal de los movimientos de la atmósfera.....	A-1
Tabla A.2:	Años en los que se ha determinado la ocurrencia de los fenómenos de El Niño y La Niña a partir de 1900 (según el índice de la Japan Meteorological Agency).....	A-4

## FIGURAS

Figura 1.1:	Localización del Istmo de Tehuantepec.....	2
Figura 1.2:	Vientos en la superficie del mar medidos con el satélite QuikSCAT (figura obtenida de <a href="http://www.coaps.fsu.edu/qscat/anim">http://www.coaps.fsu.edu/qscat/anim</a> ).....	2
Figura 1.3:	Temperatura superficial del mar en el Golfo de Tehuantepec durante un evento de vientos intensos (28 de noviembre de 1999).....	3
Figura 1.4:	Características topográficas de la región del Istmo de Tehuantepec.....	5
Figura 1.5:	Localización de sitios de interés y ubicación de los cortes verticales representados en la Figura 1.6.....	6
Figura 1.6:	Cortes verticales en la región del Istmo de Tehuantepec.....	7
Figura 2.1:	Resumen de las series de datos utilizadas en el estudio.....	9
Figura 2.2:	Localización de los vértices $P_{GM}$ y $P_{GT}$ de la base de datos del NCDC.....	12
Figura 3.1:	Promedios mensuales y anuales de rapidez del viento para los datos del observatorio de Salina Cruz durante el período 1964-1988.....	15
Figura 3.2:	Promedios mensuales globales de rapidez del viento en Coatzacoalcos y Salina Cruz para el período 1984-1988.....	16
Figura 3.3:	Promedios mensuales globales de rapidez del viento en Salina Cruz obtenidos a partir de dos conjuntos de datos distintos: para el período 1928-1947 y para el período 1984-1988...	17
Figura 3.4:	Rosas de los vientos para Coatzacoalcos y Salina Cruz considerando los datos del período 1984-1988.....	18
Figura 3.5:	Curvas de duración de la rapidez del viento en La Venta (1994 y 1995) y Salina Cruz (1988).....	19
Figura 4.1:	Distribución de frecuencias de la dirección del viento observado en Salina Cruz durante el período 1983-1988.....	23
Figura 4.2:	Distribuciones anuales de dirección del viento en Salina Cruz para: a) 1984, b) 1985, c) 1986, d) 1987 y e) 1988.....	24
Figura 4.3:	Distribuciones de frecuencias de la dirección del viento observado en Salina Cruz durante: a) Invierno y b) Verano, considerando los datos del período 1983-1988.....	25
Figura 4.4:	Promedios horarios de rapidez del viento en Salina Cruz.....	26
Figura 4.5:	Distribución de frecuencias de la rapidez del viento en Salina Cruz para el período 1983-1988.....	27
Figura 4.6:	Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento en Salina Cruz durante: a) Invierno y b) Verano.....	27

Figura 4.7:	Distribuciones observadas de rapidez del viento en Salina Cruz y distribuciones de probabilidad Weibull ajustadas en los siguientes casos: a) Todos los vientos, b) Vientos del abanico norte y c) Vientos del abanico sur.....	28
Figura 4.8:	Comportamiento estacional (invierno-verano) de la rapidez del viento en Salina Cruz para los vientos agrupados en abanico norte y abanico sur.....	29
Figura 4.9:	Distribuciones de frecuencias de la dirección del viento en Salina Cruz para los datos del periodo 1964-1988 para: a) Todo el periodo, b) Invierno y c) Verano.....	31
Figura 4.10:	Distribuciones de probabilidad de la rapidez del viento observado en Salina Cruz para el periodo 1964-1988 y distribuciones de probabilidad Weibull ajustadas para: a) Todos los vientos, b) Vientos del abanico norte y c) Vientos del abanico sur.....	34
Figura 4.11:	Curvas de duración de la rapidez del viento en Salina Cruz para los vientos agrupados en abanicos norte y sur.....	35
Figura 4.12:	Distribuciones de frecuencias de la dirección del viento en Coatzacoalcos para: a) 1984, b) 1985, c) 1986, d) 1987, e) 1988, f) 1994 y g) 1995.....	36
Figura 4.13:	Distribución de frecuencias de la dirección del viento en Coatzacoalcos para todo el conjunto de datos.....	37
Figura 4.14:	Distribución de frecuencias de la rapidez del viento observado y distribución de probabilidad Weibull ajustada para los datos de Coatzacoalcos correspondientes a 1984-1988 y 1994-1995. ....	38
Figura 4.15:	Rosas de los vientos para los datos de La Venta en 1994 y 1995.....	39
Figura 4.16:	Distribuciones anuales de rapidez del viento en La Venta para: a) 1994 y b) 1995.....	41
Figura 4.17:	Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento observado en La Venta, y distribuciones de probabilidad Weibull ajustadas, para los vientos separados en abanicos norte y sur durante: a) 1994 y b) 1995.....	42
Figura 4.18:	Mapa de presión promedio para el mes de mayo de 1975.....	45
Figura 4.19:	Mapa de presión promedio para el mes de mayo de 1992.....	45
Figura 4.20:	Mapa de presión promedio para el mes de octubre de 1987.....	46
Figura 4.21:	Mapa de presión promedio para el mes de octubre de 1985.....	46
Figura 4.22:	Diagrama de dispersión entre la rapidez del viento en La Venta y las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC.....	47
Figura 4.23:	Diagrama de dispersión entre las componentes u (cuadros) y v (puntos) del viento en La Venta y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.....	48
Figura 4.24:	Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico norte en La Venta y las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC.....	48

Figura 4.25:	Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico sur en La Venta y las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC.....	49
Figura 4.26:	Diagrama de dispersión entre la rapidez del viento en La Venta y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	50
Figura 4.27:	Diagrama de dispersión entre la componente u del viento en La Venta y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	51
Figura 4.28:	Diagrama de dispersión entre la componente v del viento en La Venta y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	51
Figura 4.29:	Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico norte en La Venta y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	52
Figura 4.30:	Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico sur en La Venta y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	52
Figura 4.31:	Diagrama de dispersión entre la rapidez del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.....	53
Figura 4.32:	Diagrama de dispersión entre la componente u del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.....	54
Figura 4.33:	Diagrama de dispersión entre la componente v del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.....	54
Figura 4.34:	Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico norte en Salina Cruz y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.....	55
Figura 4.35:	Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico sur en Salina Cruz y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.....	55
Figura 4.36:	Diagrama de dispersión entre la rapidez del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	57
Figura 4.37:	Diagrama de dispersión entre la componente u del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	57
Figura 4.38:	Diagrama de dispersión entre la componente v del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	58
Figura 4.39:	Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico norte en Salina Cruz y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	59
Figura 4.40:	Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico sur en Salina Cruz y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	59
Figura 5.1:	Distribución de frecuencias de las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	61

Figura 5.2:	Distribución de frecuencias de la rapidez del viento en La Venta para el período 1994-1995 considerando el conjunto de todos los vientos y los vientos separados en abanicos norte y sur.....	62
Figura 5.3:	Ajustes lineales entre la rapidez del viento en La Venta y las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos para: a) los vientos del abanico norte, y b) los vientos del abanico sur.....	62
Figura 5.4:	Distribuciones de frecuencias de las diferencias entre la rapidez del viento observado y del viento estimado para los vientos del abanico norte y del abanico sur en La Venta.....	63
Figura 5.5:	Rapidez del viento estimado en La Venta a partir de las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos con base en el modelo representado por la ecuación 5.2.....	64
Figura 5.6:	Probabilidad de ocurrencia de vientos del abanico norte (línea continua) o del resto de las direcciones (línea segmentada) en La Venta como función de las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	64
Figura 5.7:	Rapidez del viento estimado en La Venta con base en el modelo representado por la ecuación 5.2 y utilizando la probabilidad de tener vientos del abanico norte (o del resto de las direcciones) dado un valor de diferencia de presiones entre Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	65
Figura 5.8:	Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento observado (barras) y del viento estimado (línea continua) en La Venta a partir de las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.....	66
Figura 5.9:	Distribución de frecuencias para $\Delta P_{\text{NCDC}}$ (línea segmentada) y $\Delta P_{\text{SC-C}}$ (línea continua).....	67
Figura 5.10:	Comparación entre la distribución de frecuencias de las diferencias de presión observadas entre Salina Cruz y Coatzacoalcos (línea continua) y la distribución de frecuencias obtenida a partir de los datos del NCDC (línea segmentada), para el período de octubre de 1983 a diciembre de 1988 y de enero a abril de 1994.....	68
Figura 5.11:	Promedios mensuales de la rapidez del viento observado y estimado en La Venta y promedios mensuales de la rapidez del viento observado en Salina Cruz durante: a) 1964-1970, b) 1971-1977, c) 1978-1982, d) 1983-1989 y e) 1990-1995 (Nota: 'La Venta estimado 2' corresponde a la rapidez del viento estimado en La Venta a partir de las diferencias de presión observadas entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos).....	69-70
Figura 5.12:	Promedios mensuales y anuales de la rapidez del viento estimado en La Venta para el período 1964-1994.....	71
Figura 5.13:	Promedios y desviaciones estándar mensuales globales de la rapidez del viento estimado en La Venta para el período 1964-1994.....	72
Figura 5.14:	Promedios mensuales globales de la rapidez del viento estimado en La Venta y promedios mensuales globales obtenidos considerando los años en los cuales ocurrió un evento de El Niño (círculos) o de La Niña (cuadrados).....	73

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### I.1 INTRODUCCIÓN

El Istmo de Tehuantepec es una región localizada al sureste de la República Mexicana que se caracteriza por presentar una interrupción en la cordillera montañosa de la Sierra Madre del Sur. Esta característica topográfica, aunada a las condiciones meteorológicas que establecen una diferencia de presión atmosférica entre un extremo y otro del Istmo, propician la generación de vientos muy intensos en la región.

El objetivo principal del presente trabajo es estudiar la variabilidad estacional e interanual del campo de viento en el Istmo de Tehuantepec. Para lograr este objetivo, se analizaron datos de dirección y rapidez del viento para estudiar su comportamiento y variabilidad en distintas escalas de tiempo. Asimismo, y con el fin de obtener el grado de dependencia del viento con respecto a los sistemas de presión que inciden sobre la zona de estudio, se analizaron datos de presión reducida al nivel medio del mar y se calculó su correlación con los vientos en la región.

Con base en el análisis de los datos, se diseñó un modelo matemático para estimar la intensidad del viento como función del campo de presión en un período de poco más de 30 años. Esta estimación está basada en un modelo de regresión lineal que incluye un término aleatorio que posee la misma estadística de las observaciones para poder generar una aproximación al comportamiento estadístico y a la distribución de frecuencias del viento observado.

El presente trabajo está dividido en seis capítulos. En el Capítulo I, el cual incluye esta introducción, se describen las particularidades geográficas, topográficas y meteorológicas del Istmo de Tehuantepec; el Capítulo II incluye una descripción de las series de datos utilizadas en el estudio; en el Capítulo III se resume la metodología utilizada para llevar a cabo el análisis estadístico de los datos y en el Capítulo IV se presenta el análisis de las diferentes series de datos. El Capítulo V incluye el modelo utilizado para estimar los vientos en el Istmo de Tehuantepec y los resultados obtenidos y en el Capítulo VI se presenta la discusión y las conclusiones del trabajo.

También se incluye un Apéndice que contiene una breve descripción de los fenómenos meteorológicos y climáticos a los cuales se hace referencia en el trabajo, con particular énfasis en aquellos que afectan el Istmo de Tehuantepec.

### I.2 LOCALIZACIÓN DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC

El Istmo de Tehuantepec, localizado al sureste de la República Mexicana, es una región angosta que separa al Golfo de México del Océano Pacífico. La cadena montañosa de la Sierra Madre del Sur, la cual tiene una elevación media de 2,000 metros sobre el nivel del mar, se interrumpe en la parte central del Istmo en una franja de aproximadamente 40 kilómetros de ancho, en donde la altura media de la sierra desciende a 250 metros sobre el nivel del mar formando un paso natural o vertedero de aire de un océano al otro (Figura 1.1).

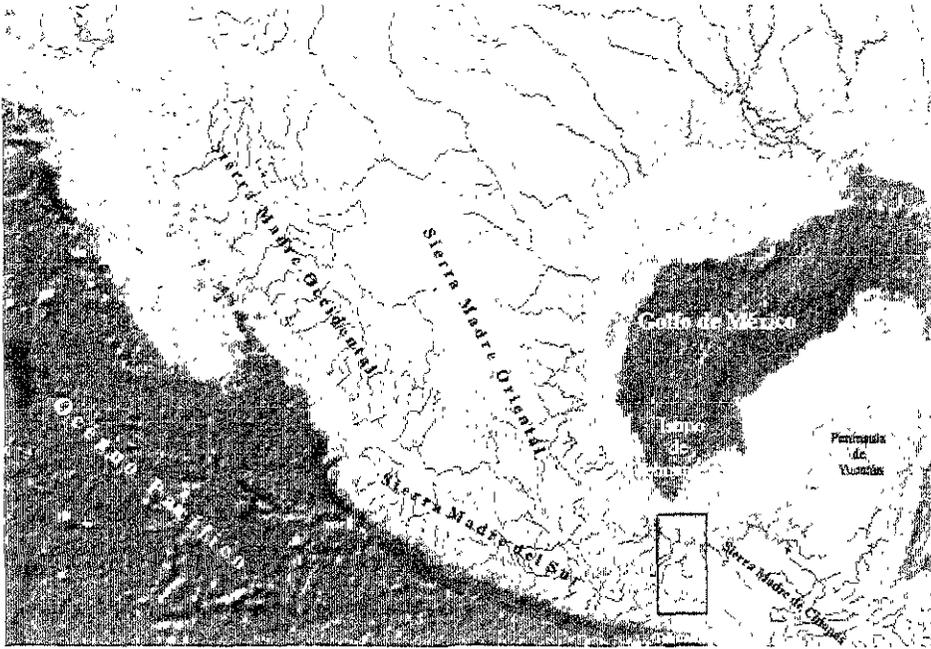


Figura 1.1: Localización del Istmo de Tehuantepec.

### 1.3 LOS VIENTOS EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

Los sistemas de alta presión provenientes del norte y que llegan al Golfo de México, producen vientos muy intensos a través del Istmo. Estos vientos, conocidos comúnmente como “nortes”, “Tehuantepequeros” o “Tehuanos”, son más frecuentes en invierno y se propagan varios cientos de kilómetros hacia el sur, produciendo un abatimiento considerable de la temperatura superficial del Golfo de Tehuantepec que puede ser varios grados más baja que la observada en los alrededores. La Figura 1.2 muestra los vientos sobre la superficie del mar medidos con el satélite QuikSCAT en la que se observan los vientos intensos en el Golfo de Tehuantepec durante un *norte*.

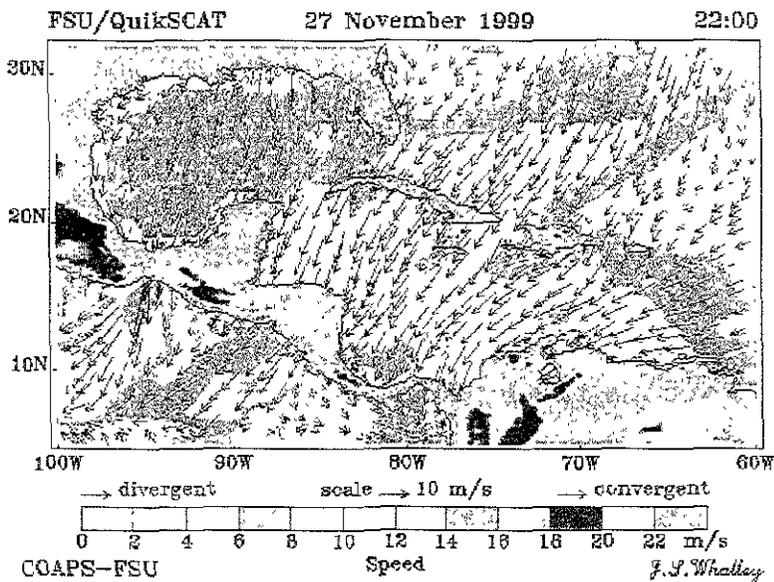
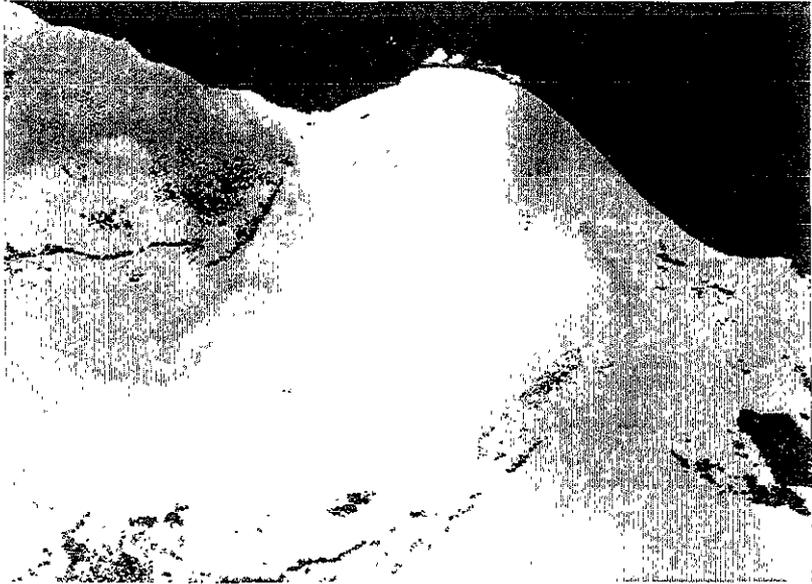


Figura 1.2: Vientos en la superficie del mar medidos con el satélite QuickSCAT (figura obtenida de <http://www.coaps.fsu.edu/qscat/anim>).

La Figura 1.3 muestra la temperatura superficial del mar durante un evento de vientos intensos en la que se observa la formación de un remolino anticiclónico en el Golfo de Tehuantepec por el efecto de este fenómeno.



**Figura 1.3:** Temperatura superficial del mar en el Golfo de Tehuantepec durante un evento de vientos intensos (28 de noviembre de 1999). *Nota:* El color rojo indica las temperaturas más elevadas y el azul las más bajas. (Imagen cortesía del Dr. Artemio Gallegos del Laboratorio de Oceanografía Física del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM).

Las causas que producen vientos cerca del suelo son las siguientes [Linacre, 1992]:

1. Los vientos gradiente, que soplan a unos pocos cientos de metros arriba del suelo y son el resultado de los patrones de presión atmosférica a escala sinóptica.
2. Las diferencias horizontales de temperatura sobre la superficie terrestre, que producen, por ejemplo, las brisas marinas.
3. La inclinación del terreno, que explica el escurrimiento cuesta abajo del aire frío durante la noche y el ascenso del viento durante el día por las laderas que están de frente al sol.
4. La inestabilidad de la atmósfera, que causa, por ejemplo, los ciclones tropicales y las tormentas.

Los *Tehuano*s resultan de una combinación de condiciones meteorológicas de gran escala y características topográficas locales y dependen completamente, para su desarrollo y permanencia, de la presencia de un sistema de alta presión sobre las regiones adyacentes hacia el norte. Estos sistemas de alta presión, que se forman durante el invierno sobre Alaska y el noroeste de Canadá, son llamados “anticiclones polares” y se desplazan hacia el sureste atravesando los Estados Unidos y llegando, algunos de ellos, hasta el Golfo de México y la Bahía de Campeche en donde se disipan en pocos días. Esta masa de aire frío continental es desviada hacia el sur y el oeste por la Sierra Madre Oriental, pero en la parte central del Istmo de Tehuantepec la interrupción de la cadena montañosa forma un embudo y se establece una diferencia de presión atmosférica entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec [Hurd, 1929; Lavín et al., 1992].

Analizando los promedios mensuales de presión atmosférica a nivel del mar a partir de observaciones hechas en barcos, Elliot (1987) determinó que las presiones son significativamente mayores sobre el Mar Caribe occidental y el Golfo de México que sobre el Pacífico, observándose diferencias medias de presión entre un sitio y otro de aproximadamente 4 hectopascales<sup>1</sup>. Estos intensos gradientes de presión causan el corredor de viento a través del paso montañoso. Asimismo, la intensidad de los vientos en la región del Istmo y Golfo de Tehuantepec se debe, en parte, a la tendencia que tienen las corrientes de aire de fluir alrededor de las montañas y amontonarse a través de sus interrupciones y, por otra parte, a la energía liberada cuando el aire frío fluye sobre el aire caliente más allá de la interrupción en la montaña [Roden, 1961].

Aunque el *Tehuano* es un norte, debe reconocerse que existe una diferencia entre éste y el norte de las planicies de los Estados Unidos y del Golfo de México. El norte que ocurre al este del gran sistema montañoso de Norte América es un viento anticiclónico verdadero y puede, en consecuencia, ser clasificado como un viento gradiente<sup>2</sup>. El *Tehuano*, por el contrario, es un viento del lado opuesto de la cordillera y es principalmente un derrame de aire acumulado a través del paso montañoso, producido por un gradiente de presión pero cuya dirección, sin embargo, está determinada por la topografía. Por lo tanto, puede ser clasificado como un norte orográfico [Hurd, 1929].

### 1.3.1 Influencias del terreno sobre el campo de viento

La topografía en la región del Istmo de Tehuantepec juega un papel predominante en la producción de vientos que, por su intensidad, tienen un considerable potencial energético. Por ello, es importante establecer las posibles influencias del terreno sobre el flujo atmosférico de gran escala y los efectos de éste sobre las velocidades medias del viento. En este sentido, se pueden considerar tres grupos topográficos principales para definir el comportamiento del viento en el Istmo: terreno plano, terreno de pequeña escala y terreno de gran escala.

Entre las influencias del terreno plano sobre el flujo de gran escala están los efectos de las brisas de mar y los ciclos diurnos de calentamiento y enfriamiento del aire en la capa límite cercana a la superficie (ver el Apéndice). Estos efectos, que generan vientos locales de intensidad ligera a moderada, se establecen en ocasiones en contra del flujo de gran escala y en contra del gradiente de presión.

Las características elevadas del terreno, tales como colinas o cerros que tienen de 100 a 300 m de altura, son considerados de pequeña escala ya que no representan un obstáculo mayor al flujo de gran escala de los vientos alisios. Sin embargo, estas características de pequeña escala son importantes desde una perspectiva de la energía del viento, ya que el viento sobre los terrenos elevados es generalmente más intenso que sobre terrenos casi planos. Además, un montículo en el terreno puede producir una considerable aceleración del flujo que lo rodea, dependiendo de la forma, pendiente y orientación de éste con respecto a los vientos predominantes productores de potencia [Elliot, 1987].

Las características topográficas de gran escala tienen dimensiones verticales que son una fracción significativa de, o exceden, la profundidad del flujo en la capa límite planetaria. Estas incluyen características elevadas tales como grandes montañas, cimas y cordilleras que bloquean o desvían el flujo de gran escala. Las zonas con viento intensificado se localizan usualmente donde el flujo es desviado alrededor de las esquinas de una barrera montañosa o donde el flujo es encañonado sobre una abertura o paso en la barrera montañosa [Elliot, 1987].

Los pequeños valles y cañones pueden encauzar o concentrar los vientos prevalecientes solamente si el valle o cañón está restringido en algún punto. Entonces estos sitios, llamados corredores, se vuelven favorables

---

1. 1 hectopascal (hPa) = 1 milibar (mb). Unidad de presión de 1000 dinas por cm<sup>2</sup>, conveniente para el reporte de presiones atmosféricas.

2. El viento gradiente es un flujo horizontal sin fricción paralelo a las isobaras (ver el Apéndice).

para el uso de la potencia del viento. Las características deseables para los corredores de viento son: que el viento prevaleciente sea paralelo al corredor; que el corredor esté bordeado por colinas o montañas altas en ambos lados, y la superficie de éstas sea suave. El núcleo de máxima rapidez del viento estará en el centro del corredor. Sin embargo, los corredores que son extremadamente angostos pueden causar turbulencia excesiva. En un sentido estricto es razonable esperar que cualquier irregularidad de la superficie terrestre, al no ser plana y homogénea, modificará el flujo del viento. El gran número de parámetros que afectan las características del viento en un valle, junto con la variabilidad de esos parámetros de un valle a otro, hacen casi imposible inferir conclusiones generales válidas para la caracterización del flujo [Rohatgi, 1994].

Las Figuras 1.4, 1.5 y 1.6 muestran las características topográficas sobresalientes en la región del Istmo de Tehuantepec. En ellas se observa que en la Sierra Madre Oriental predominan los terrenos de gran escala, los cuales canalizan los vientos hacia el sur hasta llegar al paso montañoso en el Istmo de Tehuantepec. En la Figura 1.4 se observa que este paso está flanqueado por cimas de hasta 2,000 metros de altitud que forman un corredor orográfico orientado en la dirección norte-sur, con aproximadamente 50 kilómetros de separación entre las cotas de 1,000 metros a ambos lados del corredor. En su mayor parte, el recorrido hacia el sur posee una pendiente suave que culmina con una altura máxima de 240 metros y una caída de la topografía a la salida del corredor sobre la planicie costera del Golfo de Tehuantepec.

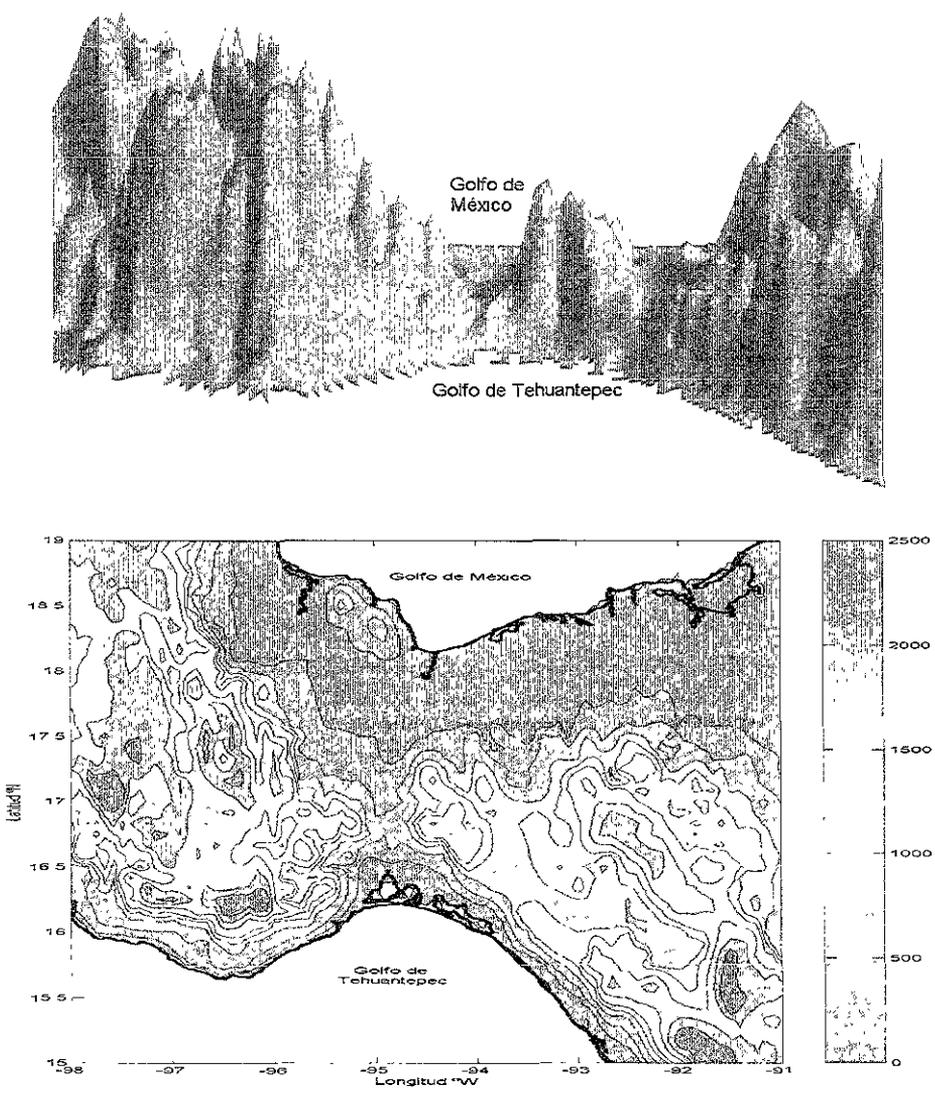


Figura 1.4: Características topográficas de la región del Istmo de Tehuantepec.

En la Figura 1.5 se muestra la localización de algunos sitios de interés y la ubicación de los cortes verticales representados en la Figura 1.6. En las gráficas de los cortes verticales podemos observar que el descenso abrupto del viento sobre la planicie costera del Golfo de Tehuantepec se ve obstaculizado por una serranía, conocida como sierra Tolistoque o Cordón La Cordillera, con alturas máximas de 760 metros, que divide la salida del corredor orográfico en dos bocas. Esta sierra forma, a su vez, un angosto cañón sobre el arroyo Paso del Morro con orientación norte-sur y un ancho máximo de 500 metros entre las cotas de 300 metros. Ya sobre la planicie costera y a unos diez kilómetros hacia el sur de la boca del corredor, existen algunos montículos de 100 a 200 metros de altura que pueden considerarse como obstáculos topográficos de pequeña escala al paso del chorro de vientos máximos.

Una vez que el viento se encuentra sobre la planicie ya no se ve afectado por la topografía, entrando en juego otras fuerzas que lo obligan a cambiar su comportamiento de una manera predecible, generalmente siguiendo una trayectoria inercial debido a la fuerza de Coriolis que obliga al chorro de vientos a desviarse hacia la derecha [Clarke, 1988; Bourassa et al., 1999] (ver el Apéndice y la Figura 1.2).

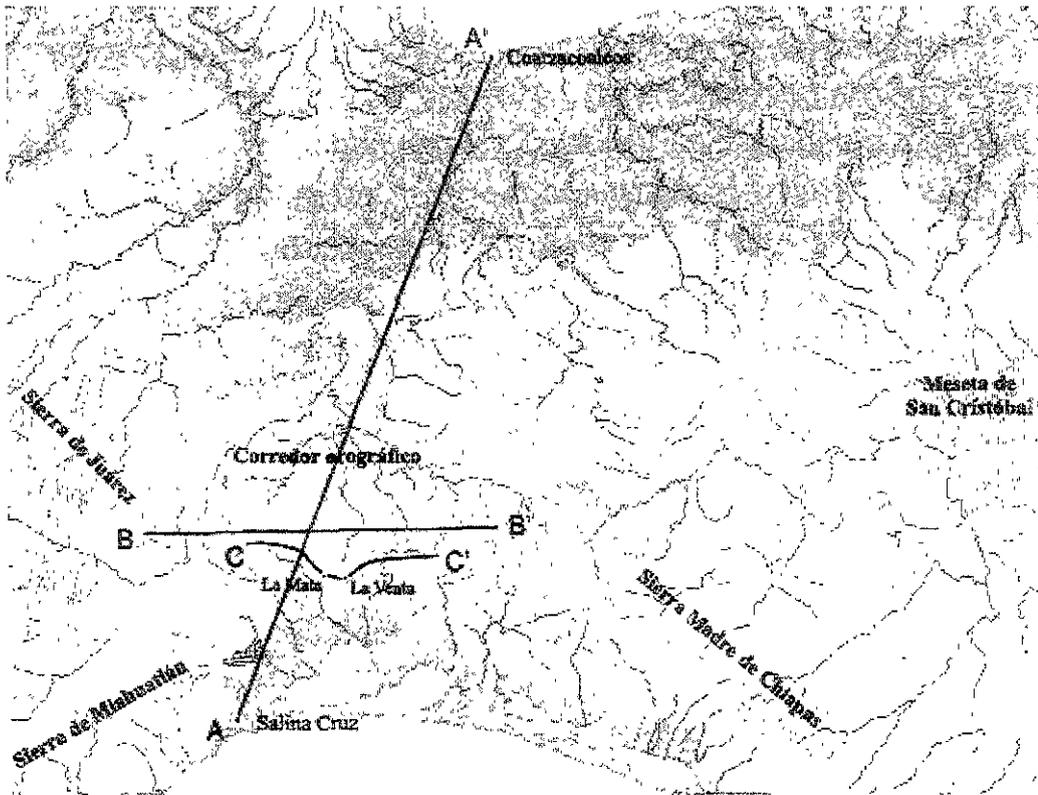


Figura 1.5: Localización de sitios de interés y ubicación de los cortes verticales representados en la Figura 1.6.

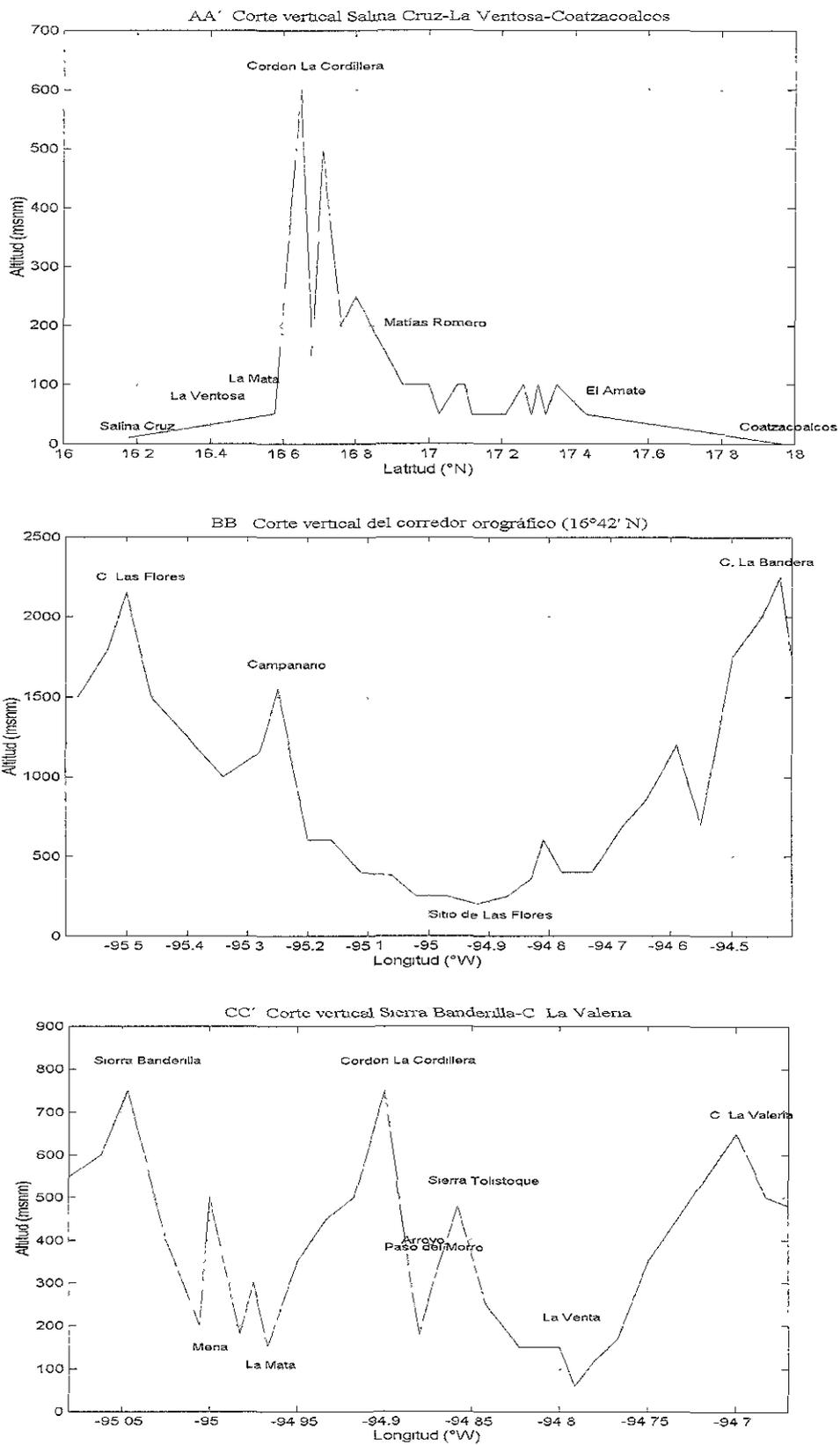


Figura 1.6: Cortes verticales en la región del Istmo de Tehuantepec.

### 1.3.2 Variación estacional del viento en la región del Istmo

El clima en el Golfo de Tehuantepec puede dividirse en dos estaciones: una seca y generalmente ventosa de noviembre a abril, y una lluviosa y usualmente en calma de mayo a octubre. Durante la temporada ventosa, una franja de vientos de alta velocidad se extiende desde el Istmo de Tehuantepec hasta unos 500 kilómetros hacia el sur; su anchura es de unos 200 kilómetros y las velocidades mayores ocurren en el extremo norte del Golfo de Tehuantepec, siendo del norte la dirección predominante del viento. Durante el verano los vientos son generalmente débiles y soplan del oriente; sin embargo, ocasionalmente se observan vientos de alta velocidad durante el paso de huracanes, los cuales ocurren con una frecuencia de alrededor de dos por mes en el punto culminante de la estación en septiembre [Roden, 1961].

Hurd (1929) menciona que en Salina Cruz, el puerto principal del Golfo de Tehuantepec, el viento dominante durante el año es del nor-noreste. En promedio, los vientos del nor-noreste se presentan el 46% del tiempo durante los meses de noviembre a febrero, y los vientos del norte el 31%. El porcentaje de ocurrencia disminuye hacia mayo y junio y la fuerza disminuye considerablemente. Durante el periodo de 1908 a 1916, de acuerdo con los registros del entonces Observatorio Central de Tacubaya, la fuerza del viento máximo medido en Salina Cruz fue de 9 en la escala de Beaufort (~22 m/s) del nor-noreste y ocurrió en febrero. En este mismo estudio se indica que durante el periodo de 1924 a 1928 se reportaron *Tehuano*s de fuerza entre 8 y 12 en la escala de Beaufort en 120 días. Estos ocurrieron el 23% de los días de noviembre y enero, 15% de los de febrero y 13% de los días de diciembre. Octubre, marzo y abril tienen un promedio de un día con norte intenso por mes.

Por lo arriba descrito, el Istmo de Tehuantepec es una región cuyos rasgos topográficos le confieren características meteorológicas particulares de considerable interés. El presente trabajo es un análisis detallado de la variabilidad de los campos de presión y viento que afectan la región del Istmo, obteniéndose como producto final un modelo matemático que relaciona ambas variables. Asimismo, se presenta una discusión sobre los fenómenos físicos que influyen en la producción de vientos intensos en el Istmo, así como un análisis acerca de la influencia del fenómeno de El Niño.

## CAPÍTULO II

### DESCRIPCIÓN DE LAS SERIES DE DATOS

#### II.1 EXTENSIÓN DE LAS SERIES DE DATOS

Los datos que se utilizaron en este estudio provienen de diversas fuentes, lo cual representa una diversidad en el tratamiento y calidad de los mismos. Lo anterior se debe a que el Servicio Meteorológico Nacional no cuenta actualmente con una base de datos sistematizada que incluya la información de los parámetros medidos en los observatorios y, en la mayoría de los casos, solamente se cuenta con los datos asentados en las libretas de registro. En total se analizaron 7 años de datos del observatorio meteorológico de Coatzacoalcos en Veracruz; 18 años de datos reportados por el observatorio meteorológico de Salina Cruz en Oaxaca; 2 años de datos obtenidos de anemómetros instalados en las localidades de La Mata y La Venta en Oaxaca, y 30 años de mapas digitalizados de presión reducida al nivel del mar elaborados por el Centro Nacional de Datos Climatológicos de los Estados Unidos (*National Climatic Data Center*, NCDC).

Un resumen de las series de datos utilizadas en este trabajo se presenta en la Figura 2.1.

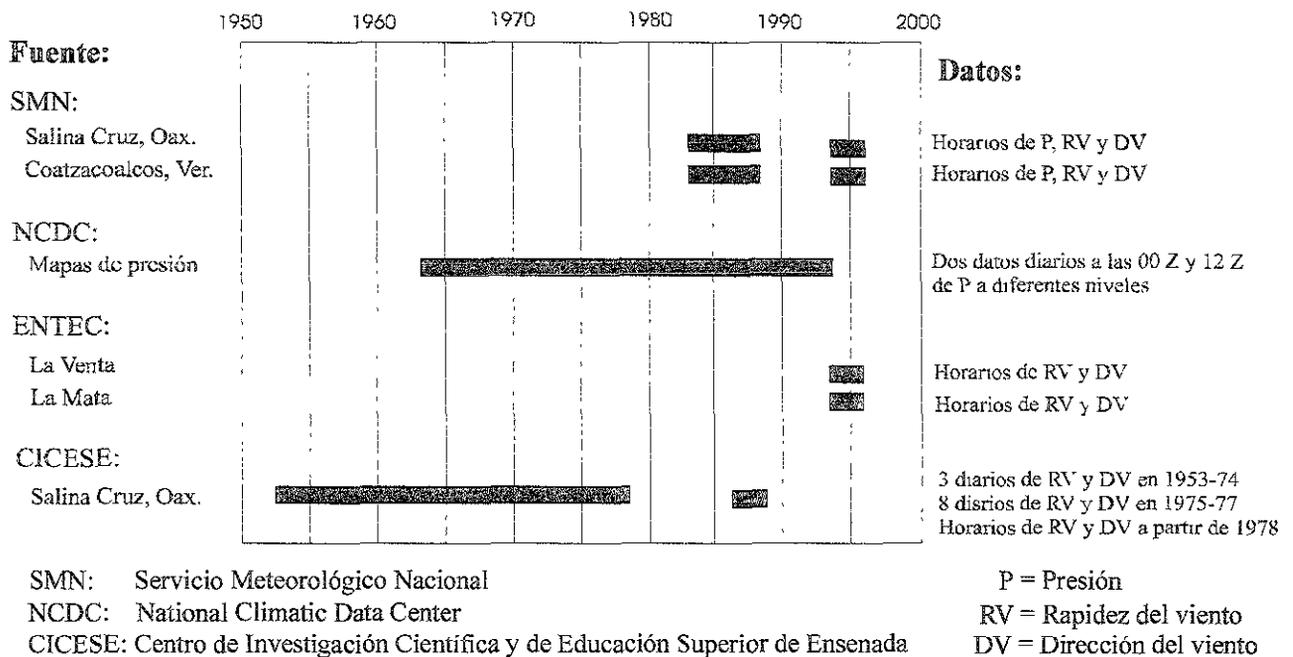


Figura 2.1: Resumen de las series de datos utilizadas en el estudio.

## II.2 DATOS DEL OBSERVATORIO DE COATZACOALCOS

El observatorio meteorológico de Coatzacoalcos en Veracruz se localiza en 18° 08' de latitud norte y 94° 24' de longitud oeste, y tiene una altitud de 14 metros sobre el nivel medio del mar (ver la Figura 1.5 del Capítulo I). Los datos horarios de presión y de dirección y rapidez del viento medio y máximo se capturaron directamente de las libretas del Servicio Meteorológico Nacional (forma SMN82/SI00) para los períodos comprendidos entre el 1° de octubre de 1983 y el 31 de diciembre de 1988 y del 1° de enero de 1994 al 31 de diciembre de 1995. Los datos de viento fueron medidos a 10 metros sobre la superficie.

Los registros de este observatorio muestran que, en general, la operación del mismo fue buena, habiendo reportado información horaria en un 86% del período de tiempo analizado. Los datos faltantes son, en su mayoría, los que corresponden al lapso comprendido entre las 0:00 y las 5:00 horas (hora local).

## II.3 DATOS DEL OBSERVATORIO DE SALINA CRUZ (fuente: SMN)

El observatorio meteorológico de Salina Cruz en Oaxaca se localiza en 16° 10' 15" de latitud norte y 95° 10' 45" de longitud oeste, a una distancia de 300 metros de la costa del Golfo de Tehuantepec y con una altitud de 6 metros sobre el nivel medio del mar. Este observatorio se encuentra aproximadamente 50 kilómetros al SSW de la salida del corredor de viento (ver la Figura 1.5 del Capítulo I).

Los datos horarios de presión y de dirección y rapidez del viento medio y máximo (medidos a 10 metros sobre la superficie), se capturaron directamente de las libretas del Servicio Meteorológico Nacional (forma SMN82/SI00) para el período comprendido entre el 1° de octubre de 1983 y el 31 de diciembre de 1988. En el período 1994-1995 los registros del observatorio de Salina Cruz no reportan datos de viento, por lo que se capturaron únicamente los datos horarios de presión.

Con base en el análisis de los datos recopilados, la operación del observatorio se puede calificar de regular a mala debido a diversas causas, como son la falta de mantenimiento a los equipos de medición y las variaciones apreciables en los registros de presión y de rapidez del viento durante los cambios de turno de los observadores. También se encontraron errores en los cálculos de la presión atmosférica y fallas de apreciación en la rapidez y dirección del viento; cabe mencionar que durante los períodos en los que no hay registro mecánico de las variables, se realiza una apreciación subjetiva de la intensidad del viento con ayuda de la escala de Beaufort.

El observatorio reportó información de viento en un 78% del total de horas entre octubre de 1983 y diciembre de 1988. En este período hay un lapso de seis meses sin datos, de mayo a octubre de 1987, debido, probablemente, a la reparación o sustitución del anemocinómetro, ya que se puede observar un cambio en la distribución de las direcciones del viento entre los años anteriores y los posteriores a esta laguna de datos.

## II.4 DATOS DEL OBSERVATORIO DE SALINA CRUZ (fuente: CICESE)

El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en Baja California, llevó a cabo en el año de 1990 el estudio "*El Efecto del Viento y Ondas Subinerciales sobre la Circulación Costera del Golfo de Tehuantepec*". Como parte del estudio, el CICESE integró una base de datos que se describe en Ramírez et al., (1990) en donde se reportan, en forma gráfica, las series anuales (de mayo a abril) de viento en superficie y presión atmosférica del observatorio de Salina Cruz del Servicio Meteorológico Nacional, junto con el residuo del nivel del mar de la estación mareográfica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Los datos de viento del CICESE abarcan el período de mayo de 1953 a diciembre de 1988. Los registros tienen un muestreo de tres datos diarios (7, 14 y 21 horas) de 1953 a 1975, ocho datos diarios (0, 3, 6, 9, 12,

15, 18 y 21 horas) de 1975 a 1977, y muestreos horarios de 1978 en adelante. A partir de 1978, la mayoría de las series climatológicas presentan interrupciones durante ciertos períodos del día debido a la falta de personal para realizar las observaciones durante las 24 horas. Debido a desperfectos en los aparatos de medición o a grupos de datos irre recuperables de la base digitalizada, hay períodos en los que faltan datos durante varios meses o años. De la serie original de datos se analizaron los correspondientes al período 1964-1988, del cual no fue posible recuperar en forma digitalizada la información para los años de 1979 a 1985.

Ya que estos datos fueron recopilados de los archivos del Servicio Meteorológico Nacional por una institución académica, se supone, aunque no se cuenta con tal información, que se aplicó algún tipo de control de calidad durante la integración de la base de datos. Sin embargo, en el presente estudio estos datos se utilizaron con precaución, eliminando aquellos claramente erróneos.

## II.5 DATOS DE VIENTO DE LA MATA Y LA VENTA

Para el análisis del campo de viento en la región del Istmo de Tehuantepec se contó con los datos de dos estaciones anemométricas instaladas cerca de las localidades de La Mata y La Venta en el Estado de Oaxaca (ver la Figura 1.5 del Capítulo I). Estos datos fueron proporcionados por ENTEC, S.A. de C.V., e incluyen las mediciones horarias completas de dirección y rapidez del viento, a 26.5 metros sobre la superficie del terreno, para el período comprendido del 1° de enero de 1994 al 31 de diciembre de 1995.

Las estaciones de La Venta y La Mata se encuentran localizadas sobre la planicie costera del Golfo de Tehuantepec a la salida del corredor de viento; ambas están situadas aproximadamente a un kilómetro de la cota de 100 metros frente al macizo montañoso denominado Sierra Tolistoque y separadas seis kilómetros entre sí. Las mediciones de rapidez y dirección del viento fueron recabadas mediante anemómetros electrónicos que proporcionan datos en forma digitalizada y cabe mencionar que en estas series no se detectaron datos anómalos o dudosos.

## II.6 DATOS DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA DEL NCDC

Se obtuvo del Centro Nacional de Datos Climatológicos de los Estados Unidos (NCDC, por sus siglas en inglés) la base de datos de mapas digitalizados de presión reducida al nivel del mar para América del Norte. Esta base de datos incluye los valores de presión en los vértices definidos por la intersección de los paralelos y meridianos cada 5° y permite imprimir el mapa meteorológico de presión para una fecha, hora y área determinadas. El período que abarca la base de datos es del 1° de enero de 1964 al 30 de abril de 1994 (poco más de 30 años), con los valores de presión correspondientes a las 00:00 y 12:00 horas Z (hora GMT).

Estos datos se utilizaron para calcular las diferencias de presión a través del Istmo de Tehuantepec considerando los valores de la presión atmosférica en los vértices correspondientes a 20°N-95°W, localizado en el Golfo de México ( $P_{GM}$ ), y a 15°N-95°W, localizado en el Golfo de Tehuantepec ( $P_{GT}$ ) (Figura 2.2). Las diferencias de presión se correlacionaron con los datos de viento de las distintas localidades y se utilizaron para construir el modelo matemático para la estimación de los vientos en la región. También se usaron para calcular los mapas de presión media mensual para los meses de mayor interés (ver la sección IV.5.1).

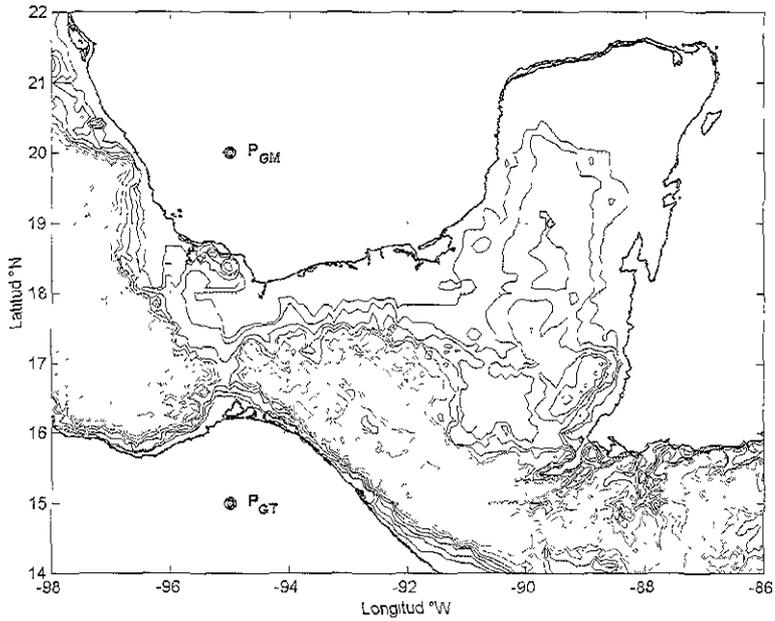


Figura 2.2: Localización de los vértices P<sub>GM</sub> y P<sub>GT</sub> de la base de datos del NCDC.

## II.7 OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

Se utilizó información que forma parte de la base de datos del proyecto CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional, que incluye datos diarios digitalizados de rapidez media del viento para el período de enero de 1968 a abril de 1979 del observatorio de Salina Cruz. Puesto que se desconoce si se realizó algún control de calidad a los datos, éstos fueron utilizados con precaución. Con estos datos se calcularon los promedios mensuales de rapidez del viento y se utilizaron para llenar algunos huecos en la serie de promedios mensuales de los datos proporcionados por el CICESE (mayo-octubre de 1973 y 1975, y enero-abril de 1979). Cabe señalar que estos valores mensuales muestran gran concordancia con los obtenidos a partir de los datos del CICESE.

# CAPÍTULO III

## METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología empleada para realizar el análisis estadístico de las series de datos. En la sección III.1 se analizan las distintas escalas de tiempo en las que varía el viento, describiendo los procedimientos utilizados para calcular los promedios anuales, mensuales y horarios y sus desviaciones estándar. Asimismo, se muestra el tipo de gráficas utilizadas para representar las distribuciones observadas de dirección y rapidez del viento en la región. En la sección III.2 se describe la función de distribución de probabilidad Weibull usada para aproximar las distribuciones observadas de la rapidez del viento. La sección III.3 describe los criterios utilizados para calcular las diferencias de presión a través del Istmo de Tehuantepec con las distintas bases de datos; en la sección III.4 se describe lo que es un diagrama de dispersión y se explica el procedimiento para el cálculo del coeficiente de correlación. La última sección, III.5, contiene la explicación del análisis de regresión lineal simple utilizado como base para la elaboración del modelo que estima los vientos en el Istmo de Tehuantepec.

El análisis detallado de los datos se presenta en el Capítulo IV.

### III.1 VARIABILIDAD ANUAL, MENSUAL, ESTACIONAL Y DIARIA DEL VIENTO

#### III.1.1 *Velocidad media del viento y velocidad del viento resultante*

En la presentación de una estadística de viento es importante distinguir entre la rapidez media del viento con una dirección dominante y la velocidad promedio del viento. La rapidez media del viento se calcula de la misma manera que la media de cualquier cantidad escalar y, generalmente, se presenta junto con la dirección dominante. La velocidad promedio del viento no puede ser obtenida a partir de medias aritméticas sencillas debido a que es una magnitud vectorial y no escalar, por lo que se calcula a partir de sus dos componentes horizontales [OMM No. 100].

El procedimiento que debe seguirse para calcular la velocidad promedio del viento es el siguiente [Douglas, 1992]:

1. Con los datos individuales de dirección ( $\phi$ ) y rapidez ( $|V|$ ) del viento reportados por la estación meteorológica, se calcula la componente zonal (este-oeste) y la componente meridional (norte-sur) del vector. Por convención, el signo de las componentes se rige de acuerdo con el eje de coordenadas cartesianas, o sea, el norte y el este son positivos. Entonces:

$$\begin{aligned}\text{Componente zonal} &= u = -|V| \sin \phi \\ \text{Componente meridional} &= v = -|V| \cos \phi\end{aligned}$$

donde:

$|V|$  = rapidez del viento,

$\phi$  = dirección de donde proviene el viento, con  $\phi=0$  para viento del norte y  $\phi$  crece en el sentido de las manecillas del reloj.

2. Una vez calculadas las componentes para cada dato, se promedian los valores de cada componente por separado.

3. La rapidez promedio es:

$$|\bar{V}| = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$$

donde  $\bar{u}$  representa el promedio de las componentes zonales y  $\bar{v}$  el promedio de las componentes meridionales.

4. El ángulo que forman el viento promedio y la componente zonal promedio del viento ( $\bar{u}$ ) se calcula como:

$$\alpha = \tan^{-1}(\bar{v}/\bar{u}),$$

y el ángulo que forman el viento promedio y la componente meridional promedio del viento ( $\bar{v}$ ) se calcula como:

$$\beta = \tan^{-1}(\bar{u}/\bar{v}).$$

5. Para calcular la dirección promedio gráficamente, se utiliza cualquiera de los ángulos calculados en el punto 4 y con la ayuda de los cuadrantes de las coordenadas cartesianas. Otra manera de calcular la dirección promedio ( $\bar{\phi}$ ) es utilizando los siguientes criterios:

- i) Si  $\bar{u} = 0$  y  $\bar{v} > 0$ ,  $\bar{\phi} = 180^\circ$
- ii) Si  $\bar{u} = 0$  y  $\bar{v} < 0$ ,  $\bar{\phi} = 360^\circ$
- iii) Si  $\bar{u} > 0$  y  $\bar{v} > 0$ ,  $\bar{\phi} = 270^\circ - \alpha$
- iv) Si  $\bar{u} > 0$  y  $\bar{v} < 0$ ,  $\bar{\phi} = 270^\circ + |\alpha|$
- v) Si  $\bar{u} < 0$  y  $\bar{v} > 0$ ,  $\bar{\phi} = 90^\circ + |\alpha|$
- vi) Si  $\bar{u} < 0$  y  $\bar{v} < 0$ ,  $\bar{\phi} = 90^\circ - \alpha$

En este estudio se calcularon únicamente las componentes horizontales de la velocidad del viento (u, v) para llevar a cabo el análisis estadístico de los datos.

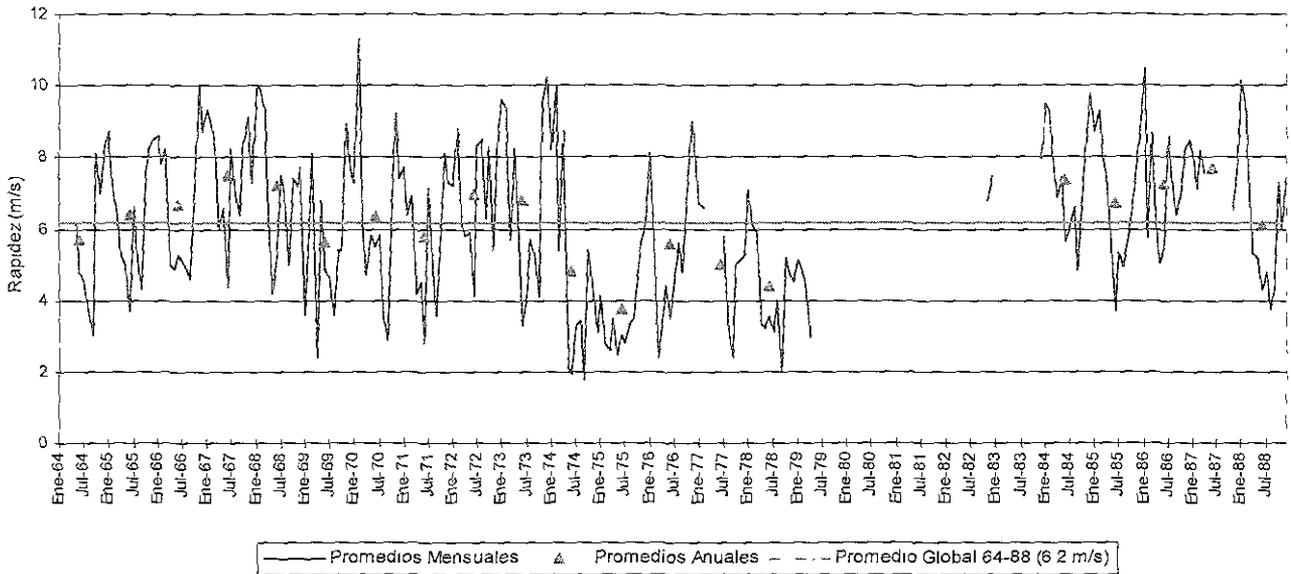
### III.1.2 Variabilidad anual y mensual de la rapidez del viento

Puesto que las variaciones mensuales y anuales son un factor importante para el análisis del campo de viento, se calcularon los promedios y las desviaciones estándar mensuales y anuales de la rapidez del viento en todas las localidades para los periodos de tiempo en los que hay datos. Las fórmulas utilizadas para calcular los promedios y las desviaciones estándar de la rapidez del viento son las siguientes:

	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Anual (A)	$\bar{RV}_A = \sum_{i=1}^N RV_i$	$s_A = \sqrt{\frac{\sum (RV_i - \bar{RV}_A)^2}{N-1}}$
Mensual (M)	$\bar{RV}_M = \sum_{i=1}^n RV_i$	$s_M = \sqrt{\frac{\sum (RV_i - \bar{RV}_M)^2}{n-1}}$

donde  $RV_i$  es el  $i$ -ésimo dato de rapidez del viento,  $n$  es el total de datos en el mes correspondiente y  $N$  es el total de datos en el año correspondiente.

En la Figura 3.1 se presentan los promedios mensuales y anuales de rapidez del viento en el observatorio de Salina Cruz para el período 1964-1988. El promedio global de la rapidez para el período fue de 6.2 m/s.



**Figura 3.1:** Promedios mensuales y anuales de rapidez del viento para los datos del observatorio de Salina Cruz durante el período 1964-1988.

### III.1.3 Variabilidad estacional de la rapidez del viento

El análisis de la variabilidad estacional del campo de viento en una región ofrece una mejor perspectiva de su comportamiento a lo largo del año, ya que el promedio anual no es suficiente para caracterizarlo. Para analizar la variabilidad estacional de la rapidez del viento se calcularon los promedios de la rapidez considerando los datos correspondientes a todos los enero, febrero, marzo, etc., es decir, los promedios mensuales globales.

En la Figura 3.2 se muestra la gráfica de los promedios mensuales globales de la rapidez del viento en Salina Cruz y Coatzacoalcos con base en los datos del período 1984-1988 y en la Tabla 3.1 se presentan los valores correspondientes. En esta figura se observa que la rapidez media mensual es mayor en Salina Cruz que en Coatzacoalcos durante todo el año, y que en Coatzacoalcos la variación estacional es casi nula mientras que en Salina Cruz es bastante marcada, presentando valores máximos de rapidez del viento durante el invierno y mínimos durante el verano.

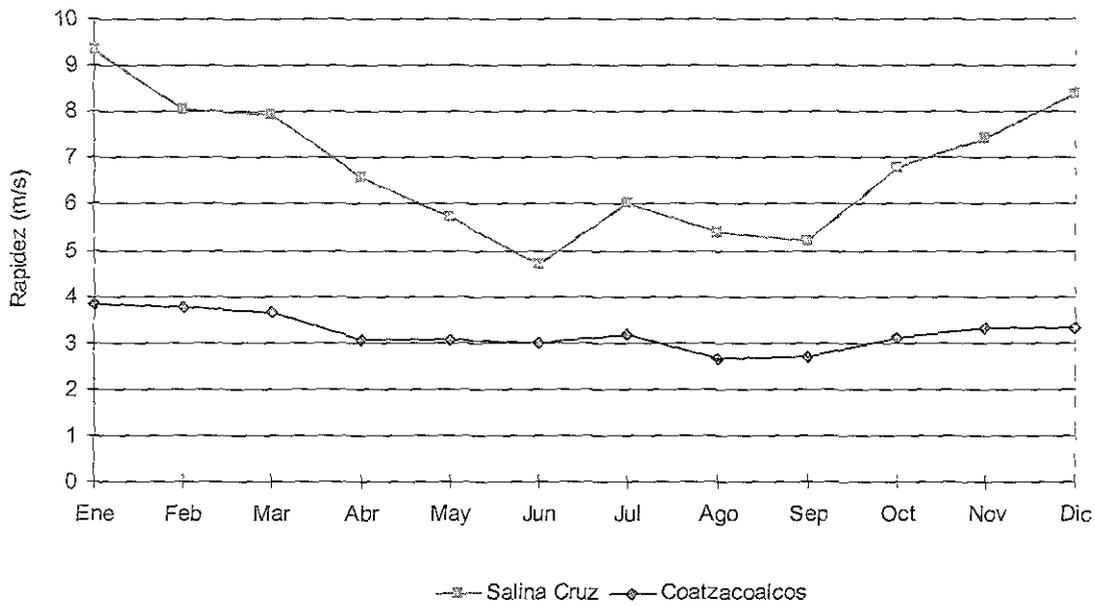
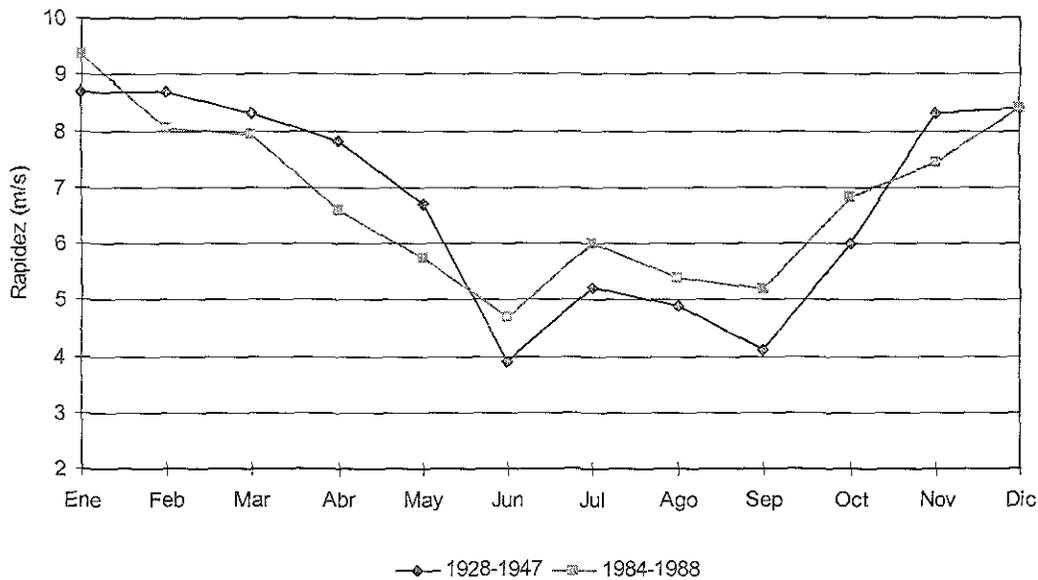


Figura 3.2: Promedios mensuales globales de rapidez del viento en Coatzacoalcos y Salina Cruz para el periodo 1984-1988.

Tabla 3.1: Promedios y desviaciones estándar mensuales globales de rapidez del viento en Coatzacoalcos y Salina Cruz considerando los datos del periodo 1984-1988.

OBSERVATORIO	PARÁMETRO (m/s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Coatzacoalcos	<i>Promedio</i>	3.82	3.77	3.63	3.06	3.06	2.98	3.19	2.69	2.69	3.08	3.31	3.33
	<i>DesvEst</i>	2.95	2.71	2.38	1.89	1.62	1.38	1.49	1.36	1.60	2.03	2.54	2.73
Salina Cruz	<i>Promedio</i>	9.35	8.04	7.94	6.59	5.73	4.69	6.01	5.38	5.19	6.80	7.42	8.39
	<i>DesvEst</i>	4.5	4.4	4.3	3.9	3.4	2.9	3.3	3.1	3.0	3.4	3.8	4.3

Es interesante notar el máximo relativo de rapidez del viento en el mes de julio en Salina Cruz, el cual se observa con bastante frecuencia año con año. Este máximo relativo aparece también en los resultados obtenidos por Roden (1961) al analizar datos de este observatorio para el periodo 1928-1947. En la Figura 3.3 se comparan los promedios mensuales reportados por Roden con los obtenidos en este estudio, los cuales corresponden al periodo 1984-1988.



**Figura 3.3:** Promedios mensuales globales de rapidez del viento en Salina Cruz obtenidos a partir de dos conjuntos de datos distintos: para el periodo 1928-1947 y para el periodo 1984-1988.

### III.1.4 Variaciones diurnas de la rapidez del viento

La variación diurna del viento se debe principalmente al calentamiento diferencial de la superficie terrestre (ver el Apéndice). La variación diurna típica del viento está representada por un incremento de la rapidez conforme avanza el día y una disminución hacia el anochecer, con valores mínimos entre la medianoche y el alba. Esta variación puede ser diferente en los niveles superiores de la atmósfera y puede haber diferencias significativas en el comportamiento diario del viento de un año a otro, aún en lugares con fuertes vientos.

Aunque es posible establecer las características generales del ciclo diurno con un sólo año de datos, algunos detalles como la amplitud de la oscilación diurna y la hora del día en la que ocurren los vientos máximos no se pueden determinar con precisión [Rohatgi, et al., 1994].

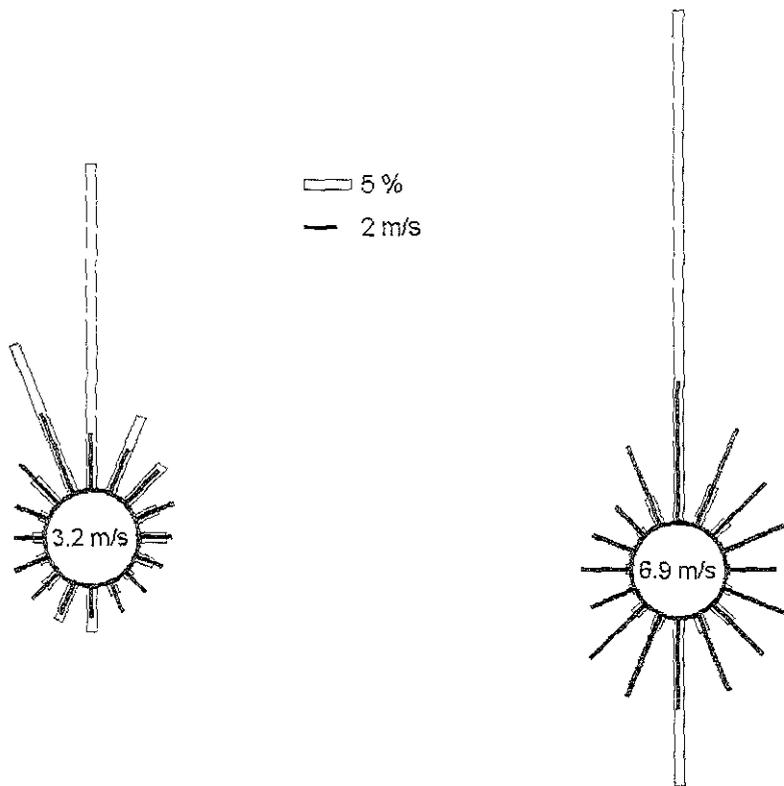
### III.1.5 Distribuciones de dirección y rapidez del viento

Tradicionalmente, las variaciones en la dirección del viento se representan mediante una rosa de los vientos o mediante gráficos de barras o histogramas que indican el porcentaje de vientos en una dirección determinada. En este estudio se utilizaron ambos tipos de gráficas para representar las distribuciones anuales y mensuales de dirección y rapidez del viento en las distintas localidades.

La Figura 3.4 muestra las distribuciones de dirección del viento en Coatzacoalcos y Salina Cruz para el periodo 1984-1988 mediante rosas de los vientos. Estas gráficas muestran el porcentaje anual de duración (proporcional a la altura de la barra) y la rapidez media (proporcional a la altura de la línea gruesa dentro de la barra) para cada una de las 16 direcciones en las que se dividió la rosa. Los valores correspondientes se presentan en la tabla que está en la parte inferior de la figura y en el interior de la rosa aparece un número que representa la rapidez promedio del viento en el período. Se observa que en ambas localidades el viento dominante es del norte, aunque en Salina Cruz el viento del sur también ocurre un porcentaje importante del tiempo, y que, en general, los vientos son más intensos en Salina Cruz que en Coatzacoalcos.

Coatzacoalcos

Salina Cruz



Dirección	Coatzacoalcos		Salina Cruz	
	Porcentaje de ocurrencia (%)	Rapidez promedio (m/s)	Porcentaje de ocurrencia (%)	Rapidez promedio (m/s)
N	34.2	3.6	53.7	8.9
NNE	8.7	3.0	4.5	6.6
NE	5.6	2.9	2.2	4.7
ENE	2.5	2.6	0.1	4.2
E	2.9	2.1	0.4	3.1
ESE	2.0	1.8	0.9	4.6
SE	0.8	1.8	2.7	4.5
SSE	1.4	2.0	2.0	5.2
S	4.9	2.0	17.6	5.7
SSW	4.4	2.2	1.8	5.6
SW	2.1	2.4	1.6	4.8
WSW	1.1	2.3	0.4	3.0
W	1.2	1.9	0.6	3.2
WNW	1.0	2.2	0.4	2.8
NW	3.6	3.5	0.8	2.6
NNW	16.9	5.4	3.1	5.4

Figura 3.4: Rosas de los vientos para Coatzacoalcos y Salina Cruz considerando los datos del período 1984-1988.

También podemos representar los datos de rapidez del viento mediante una curva de duración, la cual es una gráfica de la frecuencia acumulada comenzando en la rapidez del viento más alta. El porcentaje de duración del viento con una cierta rapidez es convertido usualmente a número de horas en un año (multiplicando por 8,760). La curva de duración nos proporciona una idea con respecto a la naturaleza del régimen de viento en un sitio determinado. Las curvas de duración para La Venta en 1994 y 1995 comparadas con la curva de duración para Salina Cruz en 1988 (Figura 3.5), muestran que el viento medido en La Venta es más intenso que en Salina Cruz. Por ejemplo, el porcentaje de tiempo que se presentaron vientos con rapidez mayor o igual a 8 m/s es de 65.4% en La Venta durante 1994, 56.2% durante 1995 y 28.3% en Salina Cruz durante 1988, que equivalen a 5730, 4921 y 2480 horas/año con vientos de esa magnitud, respectivamente. Cabe recordar que los vientos en La Venta fueron medidos a 26.5 metros sobre la superficie y los de Salina Cruz a 10 metros. El análisis detallado de las observaciones se presenta en el Capítulo IV.

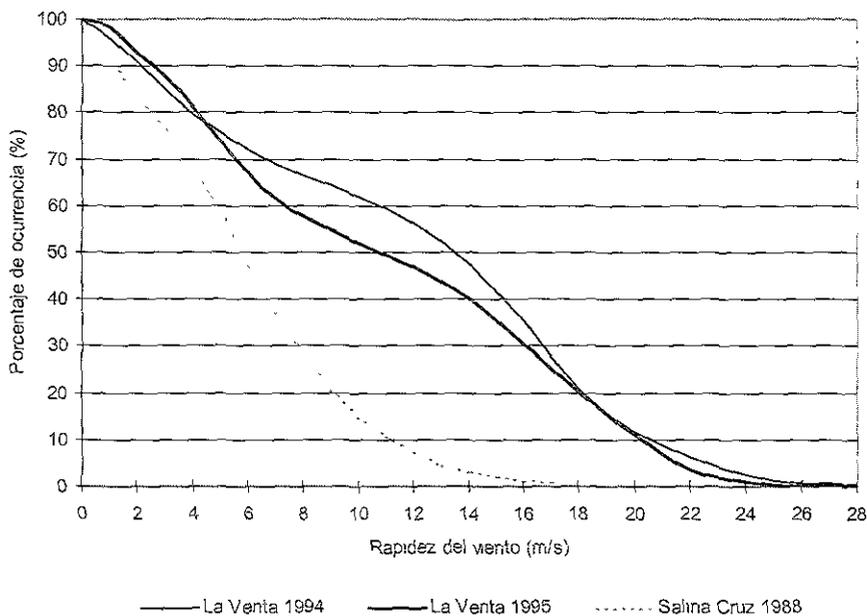


Figura 3.5: Curvas de duración de la rapidez del viento en La Venta (1994 y 1995) y Salina Cruz (1988).

### III.2 LA DISTRIBUCIÓN WEIBULL

Muchas distribuciones observadas de la rapidez del viento pueden ser ajustadas razonablemente mediante una aproximación analítica de la distribución. Uno de los modelos más usados para aproximar las distribuciones de probabilidad de la rapidez del viento es la función Weibull, que está definida como sigue:

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

donde  $V$  es la rapidez del viento,  $c$  es un factor de escala con unidades de rapidez del viento y  $k$  es un factor adimensional indicador del ancho de la distribución; mientras mayor sea el valor de  $k$ , más angosta será la distribución. Un valor de 3.6 para  $k$  representa una aproximación a una distribución Gaussiana [Elliot, 1987].

Cuando solamente se cuenta con la media ( $\bar{V}$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ) de la rapidez del viento, los parámetros de la distribución Weibull pueden estimarse de la siguiente manera:

$$k = \left( \frac{\sigma}{\bar{V}} \right)^{-1.086}$$

y

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1 + 1/k)}$$

donde  $\Gamma$  es la función Gamma<sup>3</sup>. Otros métodos para estimar los parámetros de la distribución Weibull se detallan en Justus et al., 1978.

### III.3 DIFERENCIAS DE PRESIÓN

Para llevar a cabo el análisis de los campos de presión en la región del Istmo de Tehuantepec se utilizaron dos conjuntos de datos: 1) los correspondientes a la base de datos digitalizados de presión reducida al nivel medio del mar del National Climatic Data Center (NCDC), y 2) los datos reportados por los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.

Con los datos del NCDC se calcularon las diferencias de presión atmosférica restando el valor de presión del vértice correspondiente a 20°N - 95°W ( $P_{GM}$ ), localizado en el Golfo de México aproximadamente 150 kilómetros al NNW de Coatzacoalcos, al valor de presión del vértice correspondiente a 15°N - 95°W ( $P_{GT}$ ), localizado en el Golfo de Tehuantepec aproximadamente 120 kilómetros al sur de Salina Cruz (ver la Figura 2.2 del Capítulo II):

$$\Delta P_{NCDC} = P_{GT} - P_{GM}$$

Esto implica que si la presión atmosférica es mayor en el Golfo de México que en el Golfo de Tehuantepec obtendremos una diferencia de presiones negativa y viceversa.

Asimismo, se calcularon las diferencias de presión a partir de los datos de los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos de la siguiente manera:

$$\Delta P_{SC-C} = P_{SC} - P_C$$

donde  $P_{SC}$  corresponde al valor de la presión reportado por el observatorio de Salina Cruz y  $P_C$  al reportado por el observatorio de Coatzacoalcos.

Estos conjuntos de datos se usaron para calcular los coeficientes de correlación entre las series de datos de presión y de viento en el Istmo durante los períodos de tiempo en los cuales hay simultaneidad de registros en las series, y para construir el modelo para estimar el viento a partir de los datos de presión. El análisis detallado se presenta en los Capítulos IV y V.

---

3. La función Gamma está definida como:  $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{x-1} du$

## III.4 DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN Y COEFICIENTES DE CORRELACIÓN

### III.4.1 Diagramas de dispersión

La práctica usual en la asociación de variables climatológicas por medios estadísticos comienza con el análisis gráfico del tipo de relación posible entre ellas. Un diagrama de dispersión o de puntos es útil para este propósito y puede ahorrar muchos cálculos innecesarios al indicar cuál modelo estadístico debería ser usado, si la relación es lineal o curvilínea, si algunos datos muy dispersos son demasiado extremos y requieren una investigación adicional, y si, verdaderamente, existe siquiera alguna relación útil entre ellas [OMM-No.100].

La disposición de los puntos indica algo acerca de la distribución de las dos variables. Una dispersión al azar revela que no existe una relación sistemática entre los elementos. Una disposición de los puntos en grupos puede mostrar una distribución multimodal. Si la tendencia común es que los valores se concentren dentro de una zona lineal, es posible describir la relación con una recta de mejor ajuste trazada a partir de los puntos y expresar a la misma mediante una ecuación de regresión.

### III.4.2 Coeficiente de correlación

En el sentido estadístico, la correlación denota una medida numérica del grado de concordancia entre dos o más variables. Un coeficiente de correlación es un número cuyo valor se encuentra comprendido entre +1 (correlación perfecta y positiva) y -1 (correlación perfecta y negativa). El significado de un coeficiente de correlación no está dado solamente por su magnitud; también depende del número de pares de valores a partir del cual ha sido obtenido. Si el número de pares es pequeño, el coeficiente de correlación muestral entre las dos series está sujeto a grandes errores fortuitos y, en estos casos, los coeficientes numéricamente grandes pueden no ser significativos [OMM-No.100].

El coeficiente de correlación ( $r$ ), en su forma más simple, es el usado para medir la relación lineal que existe entre dos variables aleatorias que están representadas por pares de valores numéricos. Una forma de la ecuación del coeficiente de correlación  $r$  es la siguiente:

$$r_{x,y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{s_x \cdot s_y}$$

donde  $n$  es el total de pares de datos,  $x$  e  $y$  representan las variables,  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son los promedios y  $s_x$  y  $s_y$  son las desviaciones estándar correspondientes a cada variable. Éstas últimas se calculan mediante las ecuaciones:

$$s_x = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad y \quad s_y = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

### III.5 ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Un área importante en la que se usan los métodos de correlación y regresión es la obtención, por síntesis, de series de datos originalmente incompletas. Una de las aplicaciones más interesantes del análisis multivariado ha sido su uso en la obtención de climatologías para aquellos lugares que no poseen registros climatológicos. Por supuesto, tal síntesis debe estar fundada en un sólido razonamiento físico y, además, debe indicar claramente el error probable involucrado.

La aplicación del análisis multivariado más ampliamente usada en climatología es la evaluación de la existencia de una relación funcional significativa. Los elementos climáticos son usados como variables aleatorias independientes en innumerables aplicaciones, para explicar variables físicas, económicas o sociales. Aunque la prueba estadística no puede proporcionar las razones físicas de ciertos cambios, a menudo puede suministrar indicaciones útiles o ayudar a discriminar entre las diversas explicaciones físicas posibles [OMM-No.100].

Como se mencionó en la sección III.4.1, un diagrama de dispersión nos puede mostrar que los valores graficados se concentran dentro de una zona lineal y, en consecuencia, es posible describir la relación entre las variables con una recta de mejor ajuste que se exprese mediante una ecuación de regresión.

Un modelo de regresión lineal simple es de la forma:

$$\hat{Y}_i = aX_i + b$$

donde  $\hat{Y}_i$  es el valor predicho de la variable dependiente  $Y$ ,  
 $X_i$  es el valor  $i$ -ésimo de la variable independiente  $X$ ;  
 $a$  es la pendiente de la regresión, y  
 $b$  es la ordenada al origen o intersección con el eje de la variable  $Y$ .

El principio en el que se basa el ajuste de la “mejor” línea es el de mínimos cuadrados, y establece que si  $Y$  es una función lineal de una variable independiente  $X$ , la posición más probable de una recta  $Y = aX + b$  es tal que la suma de los cuadrados de las desviaciones de todos los puntos  $(X, Y)$  respecto de la línea, es un mínimo; las desviaciones se miden en la dirección del eje  $Y$  [Kennedy, J. & A. Neville, 1982].

Las ecuaciones utilizadas para estimar el valor de los parámetros de la regresión lineal son las siguientes:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$
$$b = \frac{(\sum y_i)(\sum x_i^2) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE LOS DATOS

En este capítulo se presenta el análisis de los datos de dirección y rapidez del viento en las diferentes localidades; se analizan sus distribuciones de frecuencias y sus promedios mensuales y anuales con el fin de estudiar las particularidades del ciclo anual y la variabilidad interanual del viento en la región de interés. También se analizan los datos de presión atmosférica y se establece la correlación que existe entre las diferencias de presión observadas a un extremo y otro del Istmo de Tehuantepec y los datos de viento.

#### IV.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE SALINA CRUZ (fuente: SMN)

Los datos del observatorio de Salina Cruz, correspondientes al período de octubre de 1983 a diciembre de 1988, fueron capturados de las libretas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y presentaron una gran cantidad de errores de registro, lo cual implicó una ardua labor de identificación, eliminación y corrección.

##### IV.1.1 Dirección del viento

La distribución de frecuencias de la dirección del viento para todo el periodo (Figura 4.1) muestra una marcada preferencia, posiblemente anómala, de las direcciones norte y sur con respecto a todas las demás, presentándose en el 55.5% y en el 17.4% del total de horas registradas, respectivamente. Es decir, no se observa una dispersión de los vientos con respecto a la dirección norte-sur como podría esperarse debido a que el observatorio se encuentra relativamente alejado de la boca del corredor de viento. Cada una de las direcciones restantes ocurrió menos del 5% del tiempo; las calmas se registraron el 6.4% del tiempo, lo cual puede deberse a que los instrumentos de medición tienen un umbral de respuesta alto (~1m/s), es decir, todos los vientos menores de 1 m/s son registrados como calmas.

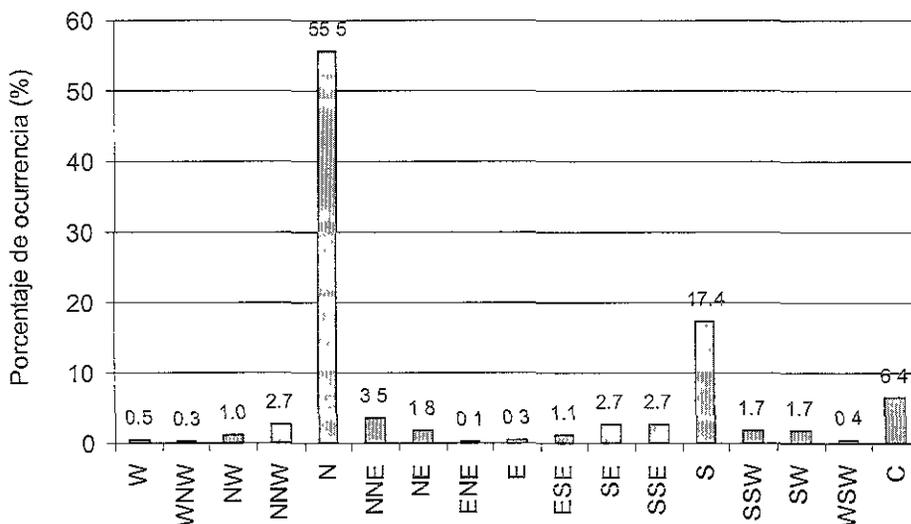
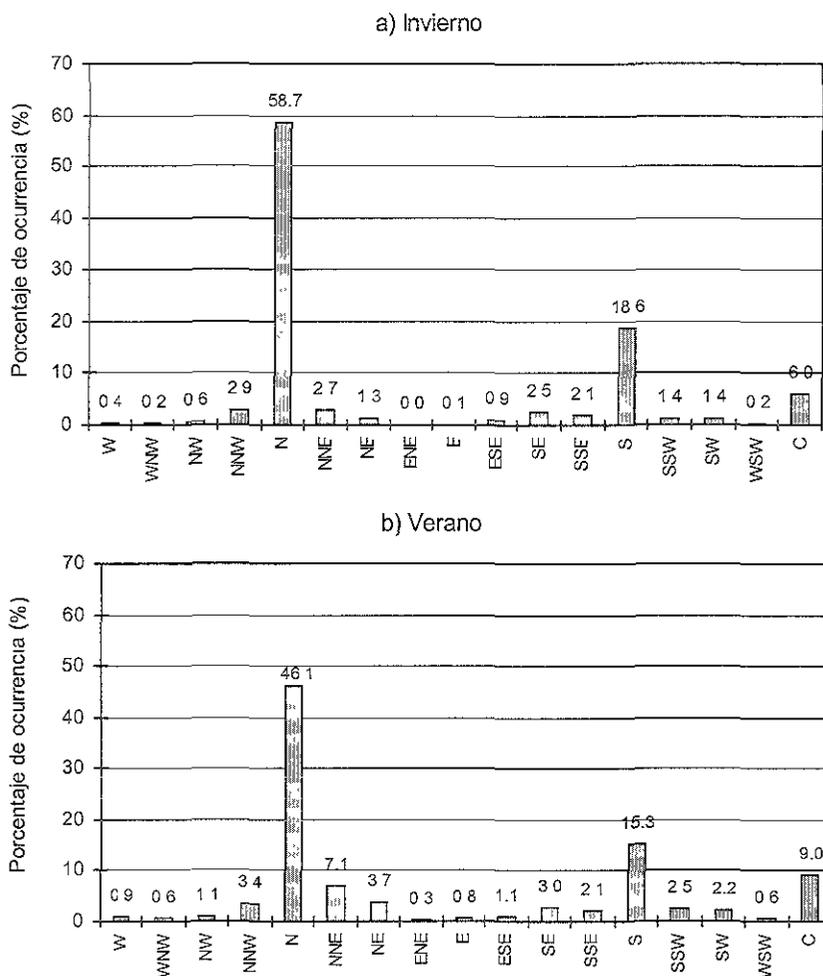


Figura 4.1: Distribución de frecuencias de la dirección del viento observado en Salina Cruz durante el período 1983-1988.

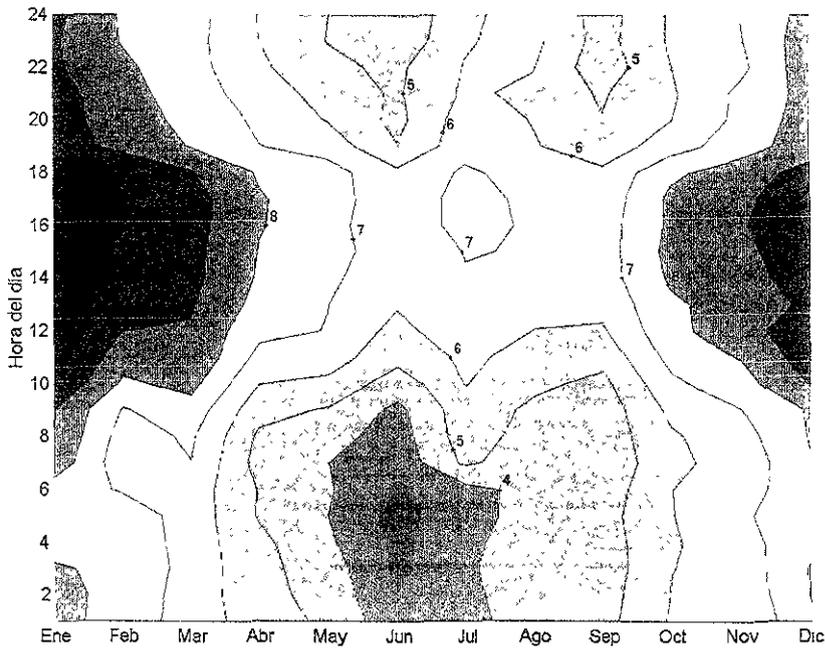
Para analizar el comportamiento estacional de la dirección del viento en Salina Cruz, se agruparon los datos en inviernos (octubre-abril) y veranos (mayo-septiembre) y se graficaron las distribuciones de frecuencias correspondientes. En los histogramas de la Figura 4.3 se observa el predominio de vientos del norte, los cuales representan el 58.7% del total de vientos durante el invierno y el 46.1% durante el verano. Los vientos del sur ocurren el 18.6% del tiempo durante el invierno y el 15.3% durante el verano, época en la que se observa una mayor dispersión del viento con respecto a las direcciones norte y sur.



**Figura 4.3:** Distribuciones de frecuencias de la dirección del viento observado en Salina Cruz durante: a) Invierno y b) Verano, considerando los datos del período 1983-1988.

#### IV.1.2 Rapidez del viento

Con el objeto de analizar las variaciones diurnas de la rapidez del viento en Salina Cruz, se calcularon los promedios horarios y se graficaron los contornos correspondientes al promedio de los años 1984, 1985, 1986 y 1988 (Figura 4.4). Esta gráfica muestra que, en general, el viento en Salina Cruz es más intenso entre las 11 y las 18 horas del día, debido a la influencia de las brisas de mar. La brisa de mar, viento con componente del sur, se establece alrededor de las 10 de la mañana y se dispersa alrededor de las 18 horas, y la brisa de tierra, viento con componente del norte, se establece alrededor de las 20 horas y comienza a dispersarse alrededor de las 6 horas del día siguiente. Asimismo, se observa que el viento es menos intenso en los meses de verano y más intenso durante el invierno, como lo habíamos mencionado anteriormente.



**Figura 4.4:** Promedios horarios de rapidez del viento en Salina Cruz.

Los promedios mensuales de la rapidez del viento en Salina Cruz durante el período 1983-1988 (Tabla 4.1) muestran una fuerte variación a lo largo del año, observándose vientos más intensos de noviembre a marzo. El promedio más bajo de rapidez se presentó tanto en junio de 1985 como en agosto de 1988 con un valor de 3.7 m/s, mientras que el promedio más alto fue de 10.5 m/s en enero de 1986. La distribución de frecuencias de la rapidez del viento en todo el período se muestra en la Figura 4.5, observándose el máximo de la distribución en 6 m/s. La rapidez promedio del viento en todo el período fue de 6.9 m/s con una desviación estándar de 4.0 m/s, aunque debemos tener presente que en 1987 hay un hueco importante de datos de mayo a octubre y que para 1983 sólo se tienen datos para los meses de octubre y diciembre.

**Tabla 4.1:** Promedios y desviaciones estándar mensuales y anuales de rapidez del viento (m/s) en Salina Cruz para el período 1983-1988.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1983										6.9		8.0	7.6
<i>Desv.Est.</i>										3.4		4.3	4.1
1984	9.5	9.3	8.0	6.9	7.4	5.6	6.0	6.6	4.9	6.7	8.6	9.8	7.4
<i>Desv.Est.</i>	4.3	4.4	3.7	3.3	3.7	2.5	2.7	2.3	2.7	3.2	4.4	4.4	3.9
1985	8.7	9.3	7.9	7.5	5.6	3.7	5.3	4.9	5.6	6.3	7.3	8.7	6.7
<i>Desv.Est.</i>	4.7	4.5	3.7	3.8	3.0	2.7	3.0	3.0	2.9	3.2	3.6	4.4	4.0
1986	10.5	5.7	8.6	6.0	5.1	5.5	8.5	7.5	6.4	6.9	8.2	8.5	7.2
<i>Desv.Est.</i>	4.1	3.0	5.3	4.2	3.7	3.1	3.3	3.0	3.4	3.8	3.7	4.2	4.2
1987	8.1	7.1	8.2	7.6							6.5	7.7	7.7
<i>Desv.Est.</i>	4.6	4.6	3.9	4.8							3.1	4.3	4.4
1988	10.1	9.4	7.0	5.3	5.2	4.3	4.8	3.7	4.3	7.3	6.0	7.4	6.1
<i>Desv.Est.</i>	4.5	4.5	3.9	3.0	3.0	2.9	2.8	2.4	2.6	3.3	3.1	3.8	3.8
<b>Promedio</b>	<b>9.4</b>	<b>8.0</b>	<b>7.9</b>	<b>6.6</b>	<b>5.7</b>	<b>4.7</b>	<b>6.0</b>	<b>5.4</b>	<b>5.2</b>	<b>6.8</b>	<b>7.4</b>	<b>8.3</b>	<b>6.9</b>
<i>Desv.Est.</i>	4.4	4.2	4.1	3.8	3.3	2.8	2.9	2.7	2.9	3.4	3.6	4.2	4.0

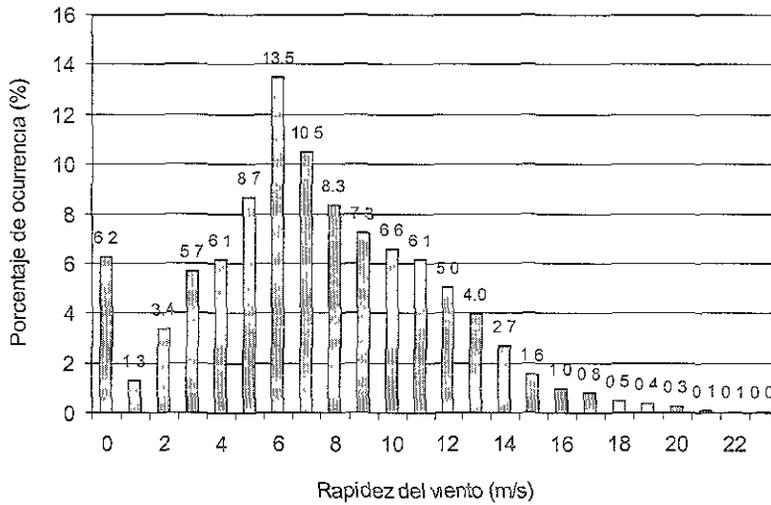


Figura 4.5: Distribución de frecuencias de la rapidez del viento en Salina Cruz para el período 1983-1988.

El comportamiento estacional de la rapidez del viento se muestra en la Figura 4.6 mediante histogramas que representan la distribución de frecuencias de la rapidez del viento durante las épocas de invierno y verano. La rapidez promedio del viento durante el invierno es de 7.7 m/s con una desviación estándar de 5.2 m/s, y durante el verano es de 5.7 m/s con una desviación estándar de 3.4 m/s.

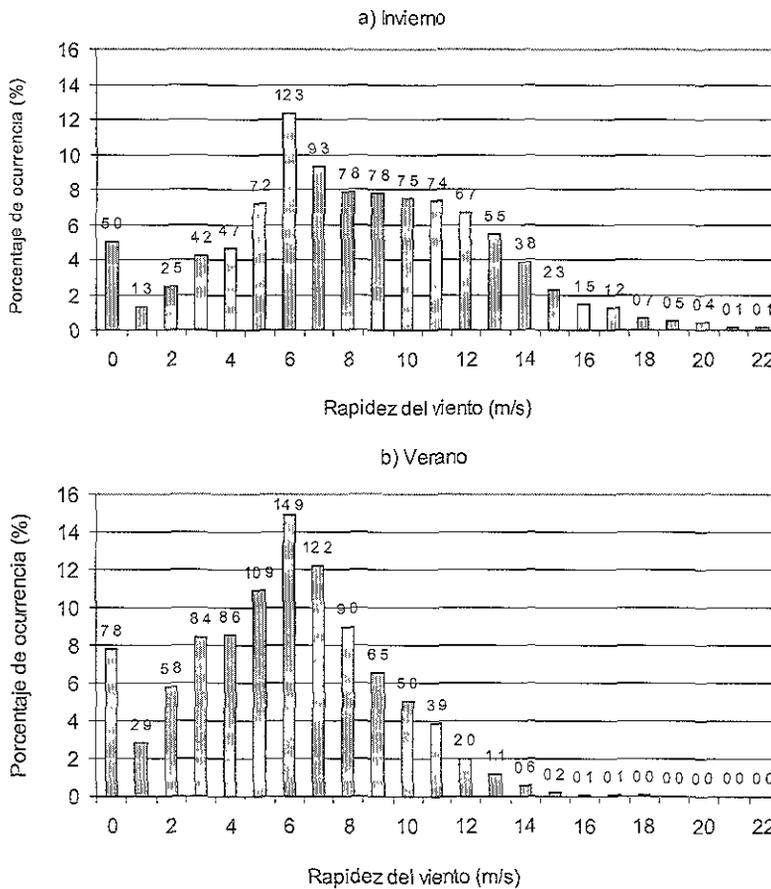
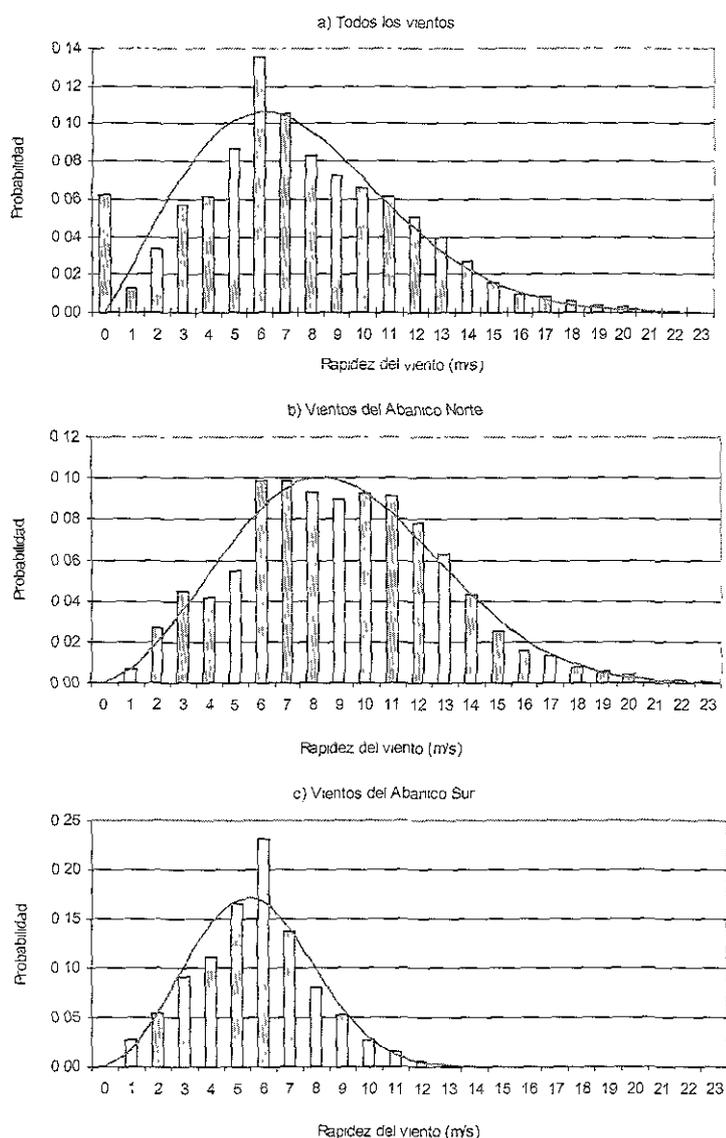


Figura 4.6: Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento en Salina Cruz durante: a) Invierno y b) Verano.

Dado el predominio de la componente meridional en las distribuciones de dirección del viento, se dividieron los datos en dos grupos: los vientos provenientes de las direcciones NNW, N y NNE, que llamaremos de aquí en adelante el abanico norte, y los vientos provenientes de las direcciones restantes, que llamaremos de aquí en adelante el abanico sur<sup>4</sup>. Para analizar el comportamiento de los vientos así agrupados, se ajustó la función de distribución de probabilidad Weibull a las distribuciones observadas de rapidez del viento en Salina Cruz: a) para la rapidez promedio considerando el conjunto de todos los vientos durante el período 1983-1988, y b) para la rapidez promedio considerando los vientos agrupados según la dirección de donde provienen, es decir, los del abanico norte y los del resto de las direcciones. Los promedios, desviaciones estándar y los valores de los parámetros de las distribuciones analíticas correspondientes se presentan en la Tabla 4.2 y las gráficas se muestran en la Figura 4.7. Cabe señalar que, en este caso, el valor de la distribución Weibull para un viento de 0 m/s es igual a 0, por lo que el porcentaje de calmas no se ve adecuadamente representado mediante esta distribución.



**Figura 4.7:** Distribuciones observadas de rapidez del viento en Salina Cruz y distribuciones de probabilidad Weibull ajustadas en los siguientes casos: a) Todos los vientos, b) Vientos del abanico norte y c) Vientos del abanico sur.

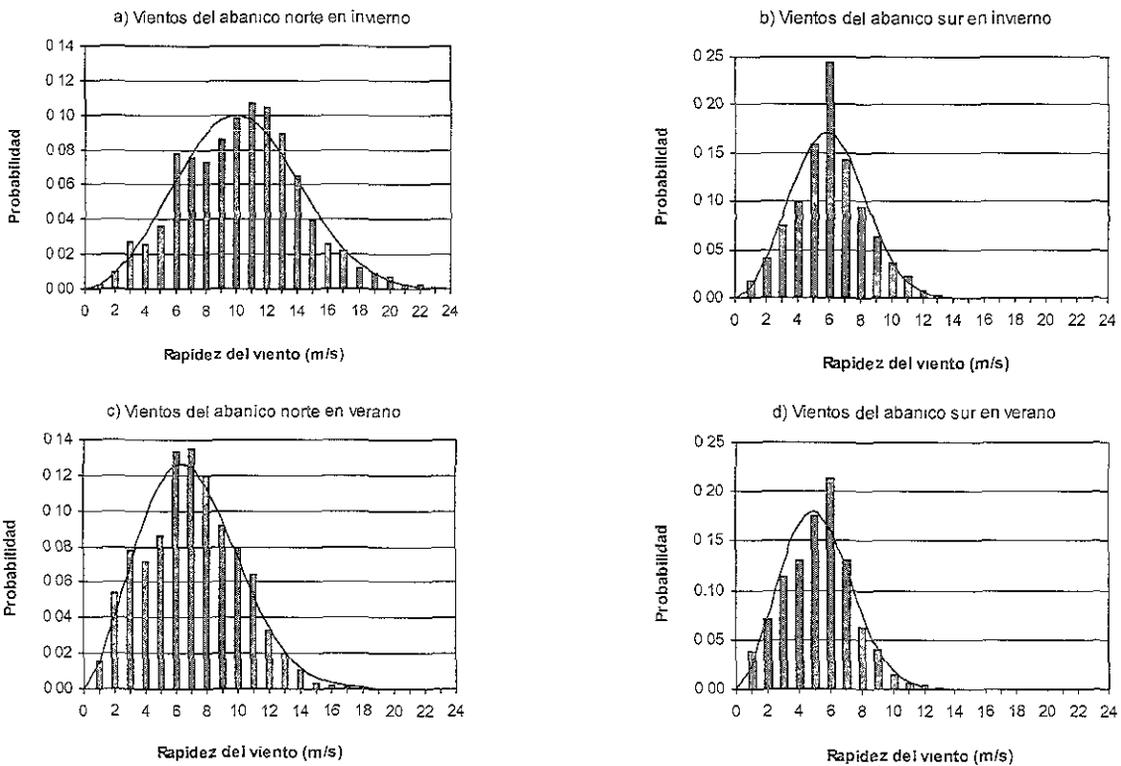
4. Debe tenerse claro que los vientos del abanico sur incluyen las direcciones NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW y NW. Lo llamamos abanico sur únicamente para facilitar la redacción del texto.

**Tabla 4.2:** Promedios, desviaciones estándar y valores de los parámetros de las distribuciones Weibull ajustadas para los datos de rapidez del viento en Salina Cruz considerando las observaciones del período 1983-1988.

Parámetro	Todos los vientos	Abanico Norte	Abanico Sur
Promedio (m/s)	6.9	8.6	5.2
Desv. Std. (m/s)	4.0	3.8	2.2
k	2.1	2.5	2.8
c (m/s)	8.4	10.2	6.4

Podemos observar que los vientos del abanico norte son más intensos que los del resto de las direcciones, presentando una rapidez promedio de 8.6 m/s y una desviación estándar de 3.8 m/s, comparada con una rapidez promedio de 5.2 m/s y una desviación estándar de 2.2 m/s para los vientos del abanico sur. En cuanto a los valores de los parámetros de la distribución Weibull, cabe recordar que mientras mayor sea el valor de  $k$ , más angosta será la distribución (ver la Secc. III.2), es decir, habrá menos dispersión de los datos con respecto al promedio.

El comportamiento estacional (invierno-verano) de la rapidez del viento para los vientos del abanico norte y del abanico sur se muestra en la Figura 4.8. En estas gráficas podemos observar que los vientos del abanico sur se comportan de manera similar durante el verano y el invierno, con una intensidad promedio en el invierno de 5.6 m/s y en el verano de 4.8 m/s, y desviaciones estándar de 2.2 m/s y 2.1 m/s respectivamente. En cambio, los vientos del abanico norte difieren más de una estación a otra, presentando una intensidad promedio de 9.8 m/s durante el invierno y de 6.6 m/s durante el verano, con desviaciones estándar de 3.8 m/s y 3.0 m/s respectivamente (ver Tabla 4.3).



**Figura 4.8:** Comportamiento estacional (invierno-verano) de la rapidez del viento en Salina Cruz para los vientos agrupados en abanico norte y abanico sur.

**Tabla 4.3:** Promedios y desviaciones estándar de rapidez del viento (m/s) para los datos agrupados en abanicos norte y sur durante los inviernos y veranos de 1983 a 1988 en Salina Cruz.

<i>Estación del año</i>	<b>Vientos del Abanico Norte</b>		<b>Vientos del Abanico Sur</b>	
	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>
Invierno 83-84	10.1	3.9	5.8	2.2
Invierno 84-85	9.9	3.8	5.8	2.2
Invierno 85-86	9.5	3.8	5.7	2.2
Invierno 86-87	10.2	3.4	5.3	1.8
Invierno 87-88	9.6	4.1	5.1	2.6
<b><i>Inviernos 83-88</i></b>	<b>9.8</b>	<b>3.8</b>	<b>5.6</b>	<b>2.2</b>
Verano 84	6.6	3.1	5.5	2.2
Verano 85	6.4	2.6	4.9	1.8
Verano 86	8.4	2.7	5.2	1.9
Verano 88	5.1	2.9	4.0	2.2
<b><i>Veranos 84-88</i></b>	<b>6.6</b>	<b>3.0</b>	<b>4.8</b>	<b>2.1</b>

## IV.2 ANÁLISIS DE LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE SALINA CRUZ (fuente: CICESE)

### IV.2.1 Dirección del viento

En el reporte de Ramírez et al., (1990) se sintetizan las características sobresalientes de algunas series de datos del observatorio de Salina Cruz correspondientes al período 1953-1988. En él se señala que: “Se observa, en general, el cambio estacional Verano-Invierno de las tres variables (viento en superficie, presión atmosférica y residuo del nivel del mar), la predominancia de la componente Norte del viento, y la respuesta del barómetro invertido en el nivel del mar. La componente *V* del viento es marcadamente más energética que la componente *U*. Existe un cambio drástico en la dirección del viento a partir del año 1959, y desafortunadamente no se cuenta con mayor información para documentar este cambio”.

En la Figura 4.9 se muestra la distribución de frecuencias de la dirección del viento en Salina Cruz para los datos del período 1964-1988 y las distribuciones de frecuencias de la dirección del viento durante el invierno y el verano para el mismo período. En las tres gráficas se observa claramente el predominio de los vientos del norte y, en menor grado pero con un porcentaje de ocurrencia importante, de los vientos del sur y de los datos registrados como calmas. Considerando los datos del período 1964-1988, el porcentaje de ocurrencia de vientos del norte fue de 60% y de vientos del sur fue de 14%. Durante el invierno el porcentaje de ocurrencia de vientos del norte es de 63.5% y de vientos del sur es de 15.4%, y durante el verano los porcentajes son de 54.2% y 13.8%, respectivamente. Estos valores son similares a los obtenidos en la sección anterior, aunque en este caso los porcentajes de vientos del norte y de calmas siempre son superiores y los de vientos del sur siempre son inferiores a los obtenidos con los datos del período 1983-1988.

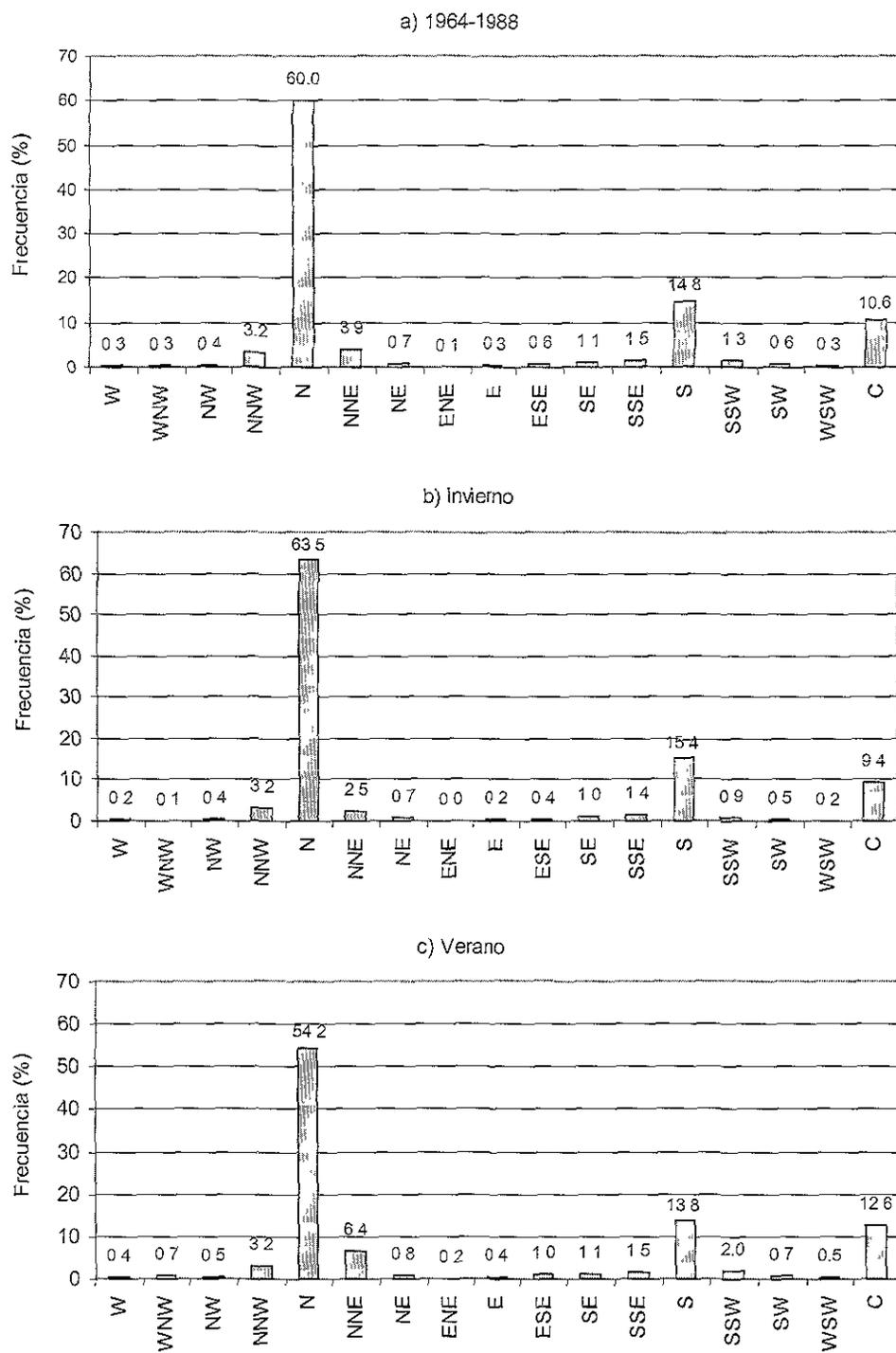


Figura 4.9: Distribuciones de frecuencias de la dirección del viento en Salina Cruz para los datos del período 1964-1988 para: a) Todo el período, b) Invierno y c) Verano.

#### IV.2.2 Rapidez del viento

En la Tabla 4.4 se resume la información de la rapidez del viento en Salina Cruz contenida en la base de datos del CICESE para el período 1953-1988. Se observa que, para el período analizado en este estudio, es decir, de 1964 a 1988, el año de 1974 presentó el promedio más bajo de rapidez del viento, con 3.2 m/s, mientras que el año de 1987 presentó el promedio más alto, con 7.9 m/s.

**Tabla 4.4:** Promedios y desviaciones estándar anuales de la rapidez del viento medio y rapidez máxima en Salina Cruz para el período 1953-1988 de la base de datos del CICESE.

Año	Número de datos	Rapidez promedio (m/s)	Desviación Estándar (m/s)	Rapidez Máxima (m/s)
1953	1095	2.2	3.8	25.0
1954	910	3.6	4.3	20.0
1955	1098	3.0	3.2	16.0
1956	1095	4.6	3.9	19.0
1957	1095	4.4	4.3	22.0
1958	1095	5.5	4.2	16.0
1959	1034	6.0	4.6	18.0
1960	612	5.1	4.4	16.0
1962	1086	5.9	4.0	16.0
1963	1098	5.9	3.5	14.0
1964	1089	6.1	3.9	18.0
1965	1095	6.6	3.8	18.0
1966	1095	6.9	4.2	16.0
1967	1098	7.7	4.1	18.0
1968	1095	5.9	4.0	18.0
1969	1095	6.3	4.5	18.0
1970	1095	6.0	4.7	22.0
1971	1098	6.0	4.3	22.0
1972	1095	7.4	4.7	30.0
1973	1095	7.1	5.5	25.0
1974	1095	3.2	2.5	13.5
1975	2528	4.6	4.1	28.0
1976	2432	6.0	4.8	23.0
1977	3422	5.2	5.0	26.0
1978	3312	3.8	3.0	18.2
1982	1158	6.9	3.7	27.6
1983	4534	7.2	3.6	22.9
1984	6840	7.5	4.0	25.0
1985	7662	6.4	4.0	23.5
1986	6091	7.2	4.0	21.6
1987	2908	7.9	4.2	21.0
1988	4795	5.7	3.2	19.1

La Tabla 4.5 muestra los promedios mensuales y anuales de rapidez del viento en Salina Cruz para los períodos de 1964 a 1979 y de 1986 a 1988, obtenidos a partir de los datos del CICESE y utilizando los datos del CLICOM (ver Sección II.7) para algunos meses faltantes. Cabe recordar que no se cuenta con la información digitalizada para el período de 1979 a 1985 de la base de datos del CICESE (ver Sección II.4).

Las diferencias entre los promedios anuales presentados en la Tabla 4.5 y los reportados en Ramírez et al. (1990) (Tabla 4.4), se deben a que, para los cálculos realizados en este trabajo, se eliminaron algunos valores dudosos de la serie de datos del CICESE.

**Tabla 4.5:** Promedios mensuales y anuales de rapidez del viento (m/s) en Salina Cruz para los períodos 1964-1979 y 1986-1988 obtenidos con los datos del CICESE y del CLICOM (*en negrita cursiva*).

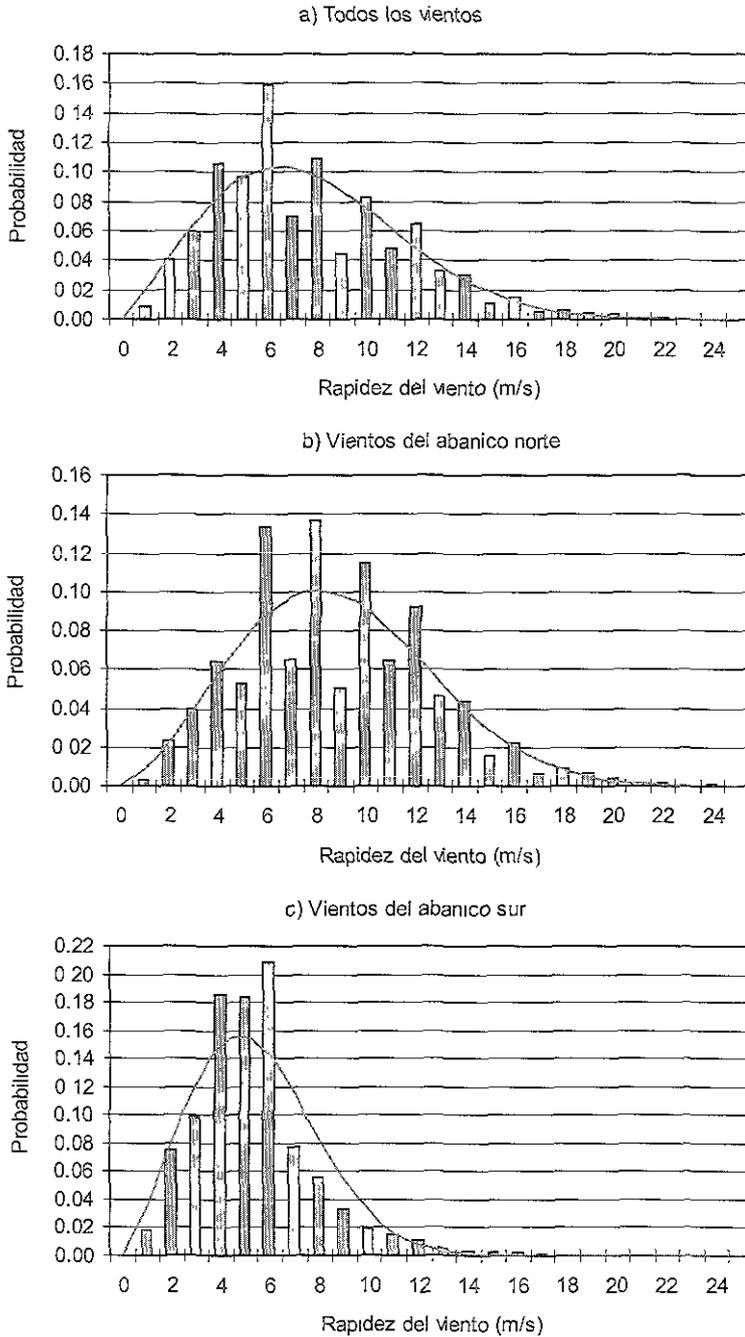
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1964					6.2	4.8	4.5	3.7	3.0	8.1	7.0	8.3	5.7
1965	8.7	7.2	6.4	5.3	5.0	3.7	6.6	5.2	4.3	7.6	8.2	8.5	6.4
1966	8.6	7.8	8.2	5.0	4.9	5.3	5.1	4.9	4.6	6.9	10.0	8.7	6.7
1967	9.3	8.9	8.2	6.0	6.6	4.4	8.2	7.0	6.4	8.4	9.1	7.3	7.5
1968	10.0	9.9	9.3	6.0	4.2	5.2	7.5	7.0	5.0	7.4	7.2	7.7	7.2
1969	3.6	6.0	8.1	2.4	6.8	4.9	4.6	3.6	5.4	5.4	8.9	7.7	5.6
1970	7.3	11.3	5.8	4.7	5.8	5.5	5.8	3.6	2.9	6.7	9.2	7.4	6.3
1971	7.7	6.4	6.9	4.2	4.5	2.8	7.1	4.7	3.6	5.9	8.1	7.3	5.8
1972	7.2	8.8	6.1	5.8	5.9	4.1	8.3	8.5	6.3	8.3	5.4	8.8	7.0
1973	9.6	9.4	5.7	8.2	6.4	3.3	4.2	5.7	5.3	4.1	9.5	10.2	6.8
1974	8.2	10.0	5.4	8.7	2.1	1.9	3.3	3.4	1.8	5.4	4.4	3.1	4.8
1975	4.1	2.8	2.6	3.5	2.5	3.0	2.8	3.3	3.5	4.9	5.6	6.1	3.7
1976	8.1	6.1	2.4	3.5	4.4	3.5	4.6	5.6	4.8	6.8	9.0	8.3	5.6
1977	6.7	6.6					5.8	3.2	2.4	5.0	5.1	5.3	5.0
1978	7.1	6.2	5.9	3.3	3.2	3.5	3.2	4.0	2.0	5.2	4.8	4.5	4.5
1979	5.1	4.9	4.3	3.0									
1986	10.1	5.7	8.6	6.0	5.0	5.4	8.4	7.4	6.4	6.8	8.1	8.4	7.1
1987	8.2	7.0	8.2	7.5								7.9	7.8
1988	10.4	9.7	7.4	5.6	5.5	4.5	5.1	4.1	4.6	7.6	6.1	8.1	6.4

En la Tabla 4.6 se presentan los promedios y desviaciones estándar de la rapidez del viento para todo el período tomando en cuenta el conjunto de todos los vientos y los vientos agrupados en abanicos norte y sur; asimismo, se presenta el valor de los parámetros de la distribución Weibull ajustada en cada caso. Las gráficas correspondientes se muestran en la Figura 4.10.

**Tabla 4.6:** Promedios, desviaciones estándar y parámetros de las distribuciones Weibull ajustadas a los datos de rapidez del viento en Salina Cruz considerando el conjunto de todos los vientos y los vientos separados en abanicos norte y sur para las observaciones del período 1964-1988.

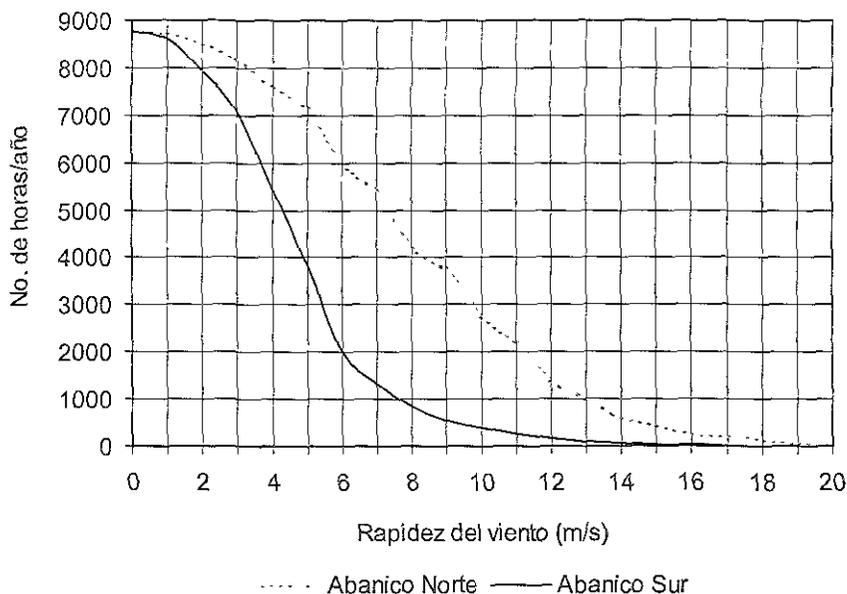
Parámetro	Todos los vientos	Abanico Norte	Abanico Sur
Promedio (m/s)	7.2	8.4	4.9
Desv. Estd. (m/s)	3.8	3.9	2.5
k	2.2	2.5	2.3
c (m/s)	8.7	10.0	6.1

Estos valores son muy similares a los obtenidos en la sección anterior con los datos capturados directamente de las libretas del SMN para el período 1983-1988, confirmandose que los vientos del abanico norte son más intensos que los del abanico sur y que presentan una mayor dispersión con respecto al promedio de rapidez. Los valores del parámetro  $k$  de las distribuciones Weibull ajustadas no difieren mucho entre sí; es el valor del parámetro  $c$  el que determina, en este caso, la forma de la curva ajustada a la distribución de la rapidez del viento observado.



**Figura 4.10:** Distribuciones de probabilidad de la rapidez del viento observado en Salina Cruz para el período 1964-1988 y distribuciones de probabilidad Weibull ajustadas para: a) Todos los vientos, b) Vientos del abanico norte y c) Vientos del abanico sur.

Para darnos una idea más clara del comportamiento de la rapidez del viento considerando los vientos agrupados en abanicos, se graficaron las curvas de duración correspondientes tomando en cuenta los datos de todo el período (Figura 4.11). Estas curvas muestran, por ejemplo, que los vientos del abanico norte tienen una rapidez mayor o igual a 8 m/s durante 4,209 horas/año (equivalentes al 48% de las horas registradas), mientras que los vientos del abanico sur solamente tienen esta rapidez durante 830 horas/año (equivalentes al 9.5% de las horas registradas).



**Figura 4.11:** Curvas de duración de la rapidez del viento en Salina Cruz para los vientos agrupados en abanicos norte y sur.

### IV.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE COATZACOALCOS

#### IV.3.1 Dirección del viento

Las distribuciones anuales de dirección del viento en Coatzacoalcos para los años de 1984 a 1988 y para 1994 y 1995 se presentan en la Figura 4.12. Estas gráficas muestran que, en general, las direcciones dominantes del viento son del NNW, N, NNE y NE, observándose vientos de estas direcciones entre el 59.8% del tiempo en 1995 y el 69.9% del tiempo en 1985. Nótese que en 1984 hay una falta de dispersión con respecto a la dirección norte; esta distribución, probablemente anómala, la podemos atribuir a desperfectos en el equipo de medición tal como sucedió en el caso del observatorio de Salina Cruz. Se observa también que durante 1995 hubo un aumento en el porcentaje de vientos con componente del sur.

La Figura 4.13 muestra la distribución de frecuencias de la dirección del viento en Coatzacoalcos para todo el conjunto de datos, es decir, para los períodos 1984-1988 y 1994-1995. Esta gráfica muestra que los vientos provenientes del norte se observan el 32.8% del tiempo y los vientos del NNW el 18.0% del tiempo. También se observa un porcentaje importante de calmas debido a que el instrumento de medición tiene un umbral de respuesta alto, como se comentó anteriormente. Asimismo, se observa una mayor dispersión de la dirección del viento comparada con la observada en Salina Cruz (ver la Figura 4.1) debido a que el observatorio de Coatzacoalcos está alejado de la influencia del corredor orográfico.

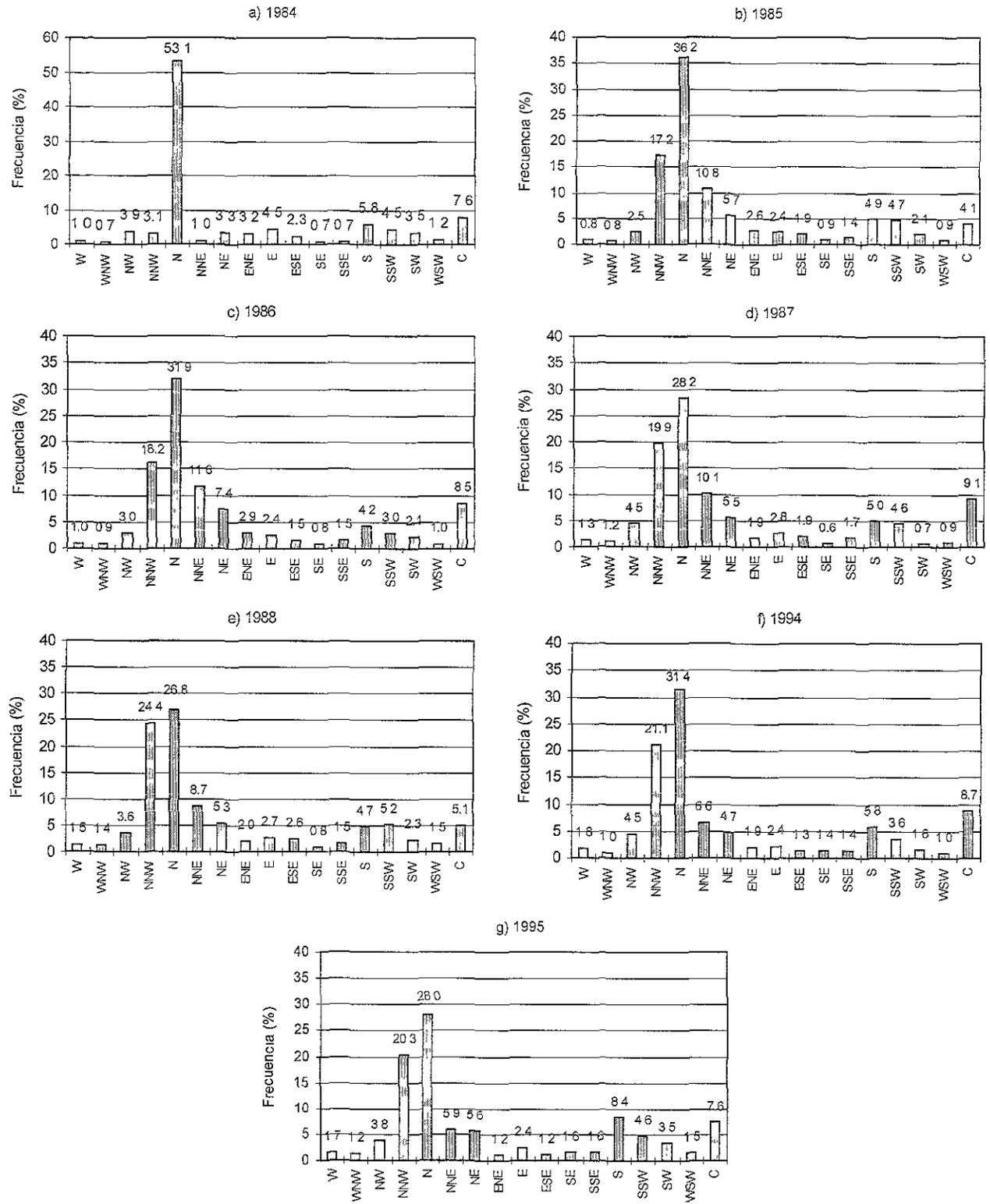


Figura 4.12: Distribuciones de frecuencias de la dirección del viento en Coatzacoalcos para: a) 1984, b) 1985, c) 1986, d) 1987, e) 1988, f) 1994 y g) 1995.

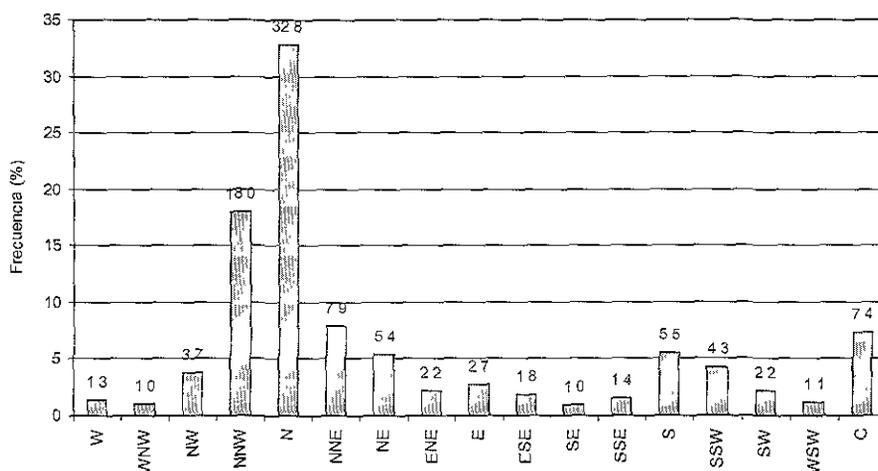


Figura 4.13: Distribución de frecuencias de la dirección del viento en Coatzacoalcos para todo el conjunto de datos.

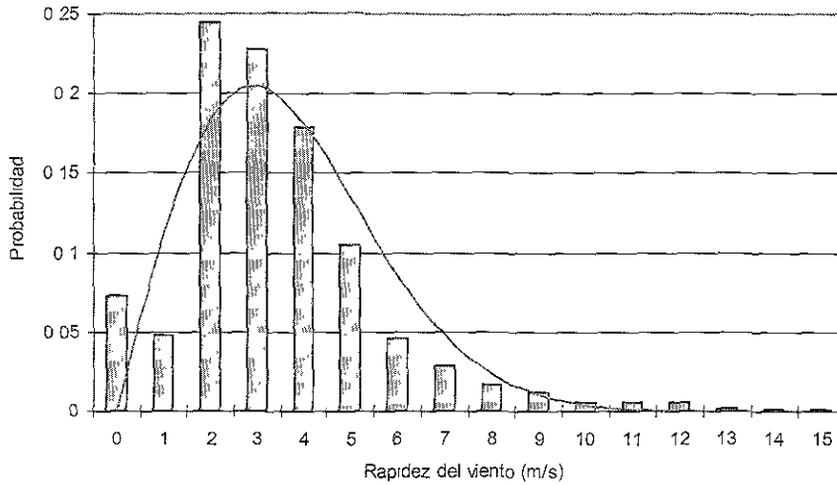
#### IV.3.2 Rapidez del viento

Los promedios y desviaciones estándar mensuales y anuales de rapidez del viento en Coatzacoalcos para los años de 1984 a 1988 y de 1994 y 1995 se presentan en la Tabla 4.7. Estos valores muestran que los vientos son menos intensos y que la variabilidad estacional de la rapidez del viento es mucho menor en Coatzacoalcos que en Salina Cruz (ver la Figura 3.2 en el Capítulo III). La rapidez promedio del viento en Coatzacoalcos considerando todos los años de datos fue de 3.4 m/s con una desviación estándar de 2.2 m/s.

Tabla 4.7: Promedios y desviaciones estándar mensuales y anuales de rapidez del viento (m/s) en Coatzacoalcos para los períodos 1984-1988 y 1994-1995.

Año	Parám.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1984	Prom.	3.0	3.1	2.7	2.6	2.9	2.6	2.7	2.4	2.9	2.4	3.1	3.1	2.8
	Dv.St.	2.3	2.0	1.9	1.6	1.7	1.2	1.3	1.3	1.7	1.3	2.7	2.3	1.8
1985	Prom.	4.3	4.6	4.6	4.0	3.2	3.2	3.0	3.1	2.4	3.4	3.1	3.9	3.6
	Dv.St.	3.5	2.6	2.5	2.2	1.6	1.3	1.5	1.3	1.3	2.1	1.7	3.1	2.3
1986	Prom.	4.2	3.0	3.4	2.6	2.7	2.7	3.5	2.7	2.9	2.9	3.4	4.1	3.2
	Dv.St.	3.4	2.5	2.4	1.6	1.9	1.3	1.7	1.5	1.4	2.0	2.9	3.3	2.3
1987	Prom.	3.8	4.2	3.6	3.3	2.7	3.0	3.2	2.6	2.5	3.2	3.2	2.6	3.2
	Dv.St.	2.8	3.0	2.8	2.2	1.4	1.5	1.5	1.4	1.9	2.5	2.9	2.7	2.3
1988	Prom.	3.8	4.0	3.8	3.0	3.7	3.4	3.3	2.6	2.8	3.4	3.7	3.0	3.4
	Dv.St.	2.7	3.4	2.4	2.0	1.6	1.5	1.6	1.3	1.7	2.3	2.5	2.3	2.2
1994	Prom.	3.0	3.1	2.7	2.6	2.3	2.0	2.3	1.9	2.0	2.2	2.0	2.6	2.4
	Dv.St.	2.5	2.6	2.2	1.9	1.2	1.1	1.2	1.3	1.3	1.8	1.6	1.9	1.8
1995	Prom.	2.7	2.7	2.5	3.0	2.3	2.3	2.2	1.7	2.2	3.0	2.3	2.4	2.4
	Dv.St.	2.0	2.0	1.9	2.1	1.3	1.3	1.2	1.0	1.4	2.5	1.6	2.4	1.8
Prom. Global	Prom.	3.5	3.5	3.4	3.0	2.8	2.7	2.9	2.4	2.5	2.9	3.0	3.1	3.4
	Dv.St.	2.7	2.6	2.3	1.9	1.5	1.3	1.4	1.3	1.5	2.1	2.3	2.6	2.2

La distribución observada de frecuencias de la rapidez del viento para todo el período así como la distribución Weibull ajustada, se muestran en la Figura 4.14. Los valores de los parámetros de la distribución Weibull, calculados a partir de los siete años de información, son:  $k = 2.0$  y  $c = 4.2$  m/s.



**Figura 4.14:** Distribución de frecuencias de la rapidez del viento observado y distribución de probabilidad Weibull ajustada para los datos de Coatzacoalcos correspondientes a 1984-1988 y 1994-1995.

#### IV.4 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LA VENTA Y LA MATA

El análisis de los datos de viento registrados en La Venta y La Mata muestra que esta variable tiene un comportamiento muy similar en ambas localidades. En cuanto a la dirección del viento, no se encontraron diferencias entre los valores registrados en las dos estaciones durante todo el período de medición (1994-1995). En cuanto a la rapidez del viento, se observaron pequeñas diferencias en los valores registrados que se explican por la localización relativa entre las estaciones y con respecto a las montañas (ver la Figura 1.4 del Capítulo I), presentando diferencias de 1% a 5% en los valores medios mensuales. Las mayores diferencias en los valores horarios aparecen cuando el viento cambia bruscamente de dirección o rapidez, en lapsos no mayores a 1 ó 2 horas después de los cuales se restablece la correspondencia en la lectura de ambos anemómetros.

Por lo anterior, se puede afirmar que los resultados y conclusiones que se obtengan mediante el análisis de los datos de una de las estaciones son aplicables a la estación vecina. En otras palabras, y para los efectos del presente estudio, consideraremos que el viento tiene el mismo comportamiento en La Mata que en La Venta.

##### IV.4.1 Dirección del viento

En la Figura 4.15 se presentan las rosas de los vientos para los datos de La Venta en 1994 y 1995. En estas gráficas se puede observar el marcado predominio de vientos con componente del norte y, como se muestra en las tablas de la parte inferior de la figura, que su intensidad es considerablemente mayor que la del viento proveniente de otras direcciones. Asimismo, se observa una dispersión más pronunciada de la componente zonal (E y SE) durante 1995. En estas gráficas la cifra dentro de la rosa de los vientos representa el promedio anual de la rapidez del viento, que fue de 11.5 m/s en 1994 y de 10.6 m/s en 1995.

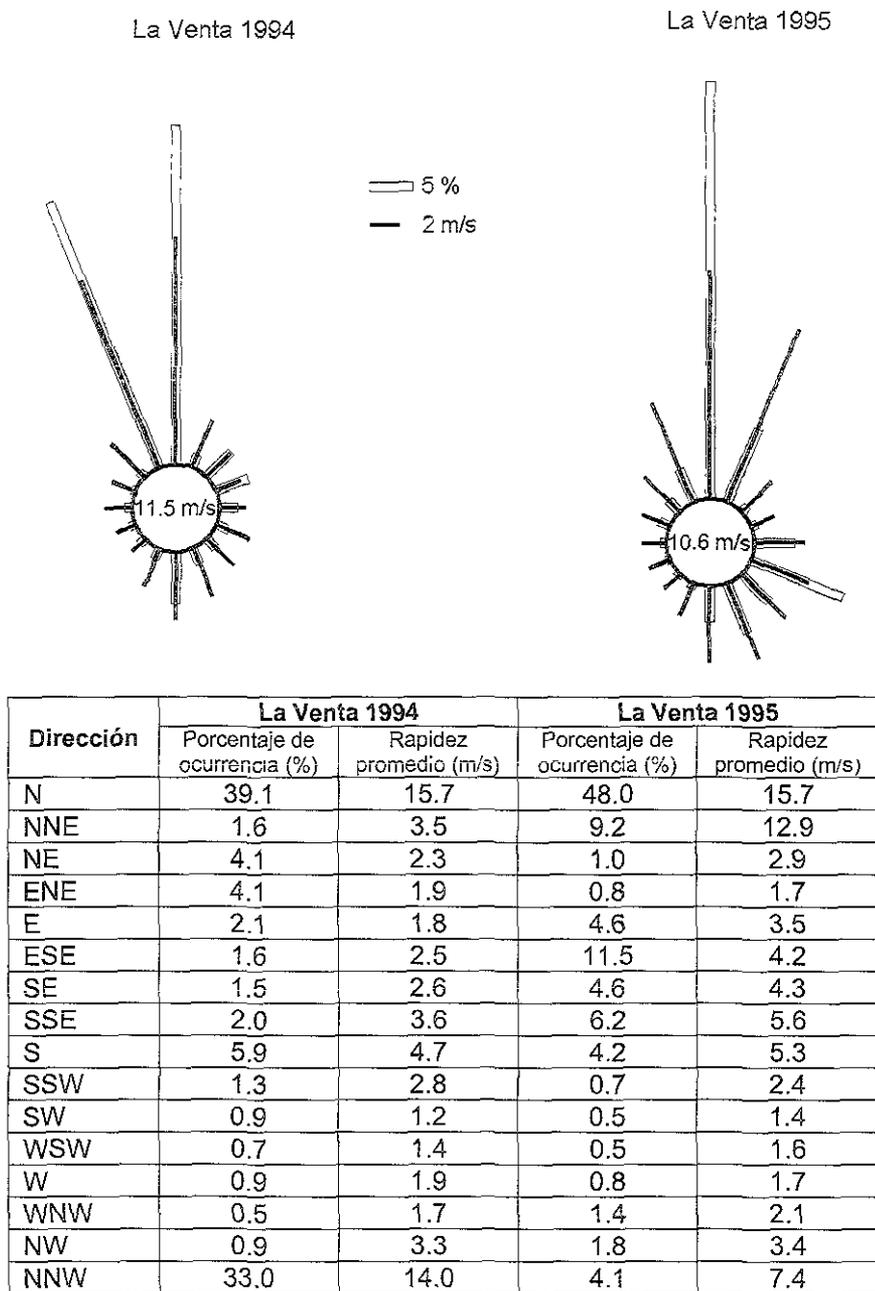


Figura 4.15: Rosas de los vientos para los datos de La Venta en 1994 y 1995.

#### IV.4.2 Rapidez del viento

El promedio anual de la rapidez del viento no es suficiente para caracterizar el campo de viento en una región; es el análisis estacional el que ofrece una mejor perspectiva de su comportamiento. Por ello, se analizó la variabilidad estacional del viento mediante los promedios mensuales de rapidez considerando los datos de mayo a septiembre como *Veranos* y de octubre a abril como *Inviernos*. De manera similar a lo que se hizo con los datos de Salina Cruz, se agruparon los datos de viento en La Venta por abanicos: los vientos del abanico norte, que incluye los vientos provenientes de las tres direcciones dominantes (NNW, N y NNE), y los vientos del abanico sur, que incluye aquellos provenientes de las direcciones restantes. En la Tabla 4.8 se presentan los promedios mensuales, anuales y por estación de la rapidez del viento, incluyendo los vientos de

todas las direcciones (**Promedio**), el porcentaje de ocurrencia de vientos del abanico norte y del abanico sur (**%N** y **%S**) y el promedio de rapidez de los vientos de cada abanico (**Prom N** y **Prom S**).

**Tabla 4.8:** Promedios mensuales, anuales y por estación (invierno-verano) para los datos de rapidez del viento en La Venta durante 1994 y 1995.

Año	Mes/Estación	Promedio (m/s)	%N	Prom N (m/s)	%S	Prom S (m/s)
1994	Enero	16.0	79	19.4	21	3.5
	Febrero	14.1	80	17.2	20	3.5
	Marzo	10.8	53	17.9	47	3.3
	Abril	9.4	52	15.2	48	3.4
	Mayo	7.4	57	11.0	43	3.4
	Junio	6.3	45	11.6	55	2.6
	Julio	12.0	84	13.8	16	3.2
	Agosto	10.4	80	12.5	20	2.6
	Septiembre	12.5	87	13.9	13	3.1
	Octubre	9.8	65	13.6	35	3.2
	Noviembre	13.6	88	15.0	12	3.7
	Diciembre	16.2	94	16.9	6	4.3
	<b>Anual</b>	<b>11.5</b>	<b>71</b>	<b>15.0</b>	<b>29</b>	<b>3.1</b>
1995	Enero	14.8	76	18.4	24	3.6
	Febrero	14.1	78	16.9	22	4.2
	Marzo	11.8	57	16.7	43	5.1
	Abril	9.5	40	16.2	60	5.1
	Mayo	4.3	5	6.1	95	4.3
	Junio	7.4	51	10.4	49	4.2
	Julio	11.3	76	13.9	24	3.4
	Agosto	5.3	30	10.6	70	3.0
	Septiembre	9.9	77	11.7	23	3.7
	Octubre	10.5	62	13.8	38	5.1
	Noviembre	14.0	82	16.3	18	3.0
	Diciembre	15.0	82	17.2	18	5.2
	<b>Anual</b>	<b>10.6</b>	<b>59</b>	<b>15.0</b>	<b>41</b>	<b>4.2</b>
	<b>Verano 1994</b>	<b>9.4</b>	<b>71</b>	<b>12.8</b>	<b>29</b>	<b>3.0</b>
	<b>Invierno 94-95</b>	<b>12.5</b>	<b>71</b>	<b>16.3</b>	<b>29</b>	<b>4.4</b>
	<b>Verano 1995</b>	<b>7.5</b>	<b>47</b>	<b>11.9</b>	<b>53</b>	<b>3.8</b>

La intensidad promedio de los vientos del abanico sur fue menor a los 5.3 m/s en todos los meses, con un promedio anual de 3.1 m/s en 1994 y de 4.2 m/s en 1995. Con excepción del mes de mayo de 1995, los vientos del abanico norte tienen promedios mensuales superiores a los 10 m/s, presentando un promedio anual de 15.0 m/s en ambos años. Podemos observar que existe un marcado dominio de vientos del abanico norte de noviembre a febrero con una ocurrencia superior al 75%. Sin embargo, es interesante observar que el porcentaje de ocurrencia de vientos del abanico norte fue de 71% en 1994 mientras que en 1995 fue de 59%.

Durante el invierno los vientos son más intensos que durante el verano, presentando un promedio de rapidez de 12.5 m/s comparado con promedios de 9.4 m/s y de 7.5 m/s durante los veranos de 1994 y 1995, respectivamente. Durante el verano los vientos son más débiles pero se observa un máximo relativo de rapidez en el mes de julio, al igual que en Salina Cruz, que se caracteriza por tener una frecuencia alta de

vientos del abanico norte. Cabe señalar la notable diferencia que existe de un verano a otro en los porcentajes de viento del abanico norte: 71% en 1994 contra 47% en 1995. Esta diferencia es más notoria en mayo, pues el porcentaje de ocurrencia de vientos del abanico norte en mayo de 1995 fue de tan sólo el 5%, presentando una rapidez promedio de 6.1 m/s, mientras que en mayo de 1994 fue de 57%, presentando una rapidez promedio de 11.0 m/s. El análisis anterior sugiere que existen diversos fenómenos meteorológicos que afectan a la región y que determinan la variabilidad interanual en el campo de viento.

La Figura 4.16 muestra las distribuciones anuales de la rapidez del viento en La Venta para 1994 y 1995. Una característica sobresaliente en estas distribuciones es que presentan un comportamiento bimodal, es decir, tienen dos máximos relativos: alrededor de los 3 m/s y 17 m/s en 1994, y alrededor de los 5 m/s y 16.5 m/s en 1995. Esta característica impide que las distribuciones de rapidez del viento en La Venta puedan ser representadas mediante la función analítica de Weibull. Sin embargo, al separar los vientos del abanico norte de los del resto de las direcciones, se obtienen dos distribuciones unimodales que se ajustan bien mediante distribuciones analíticas (Figura 4.17).

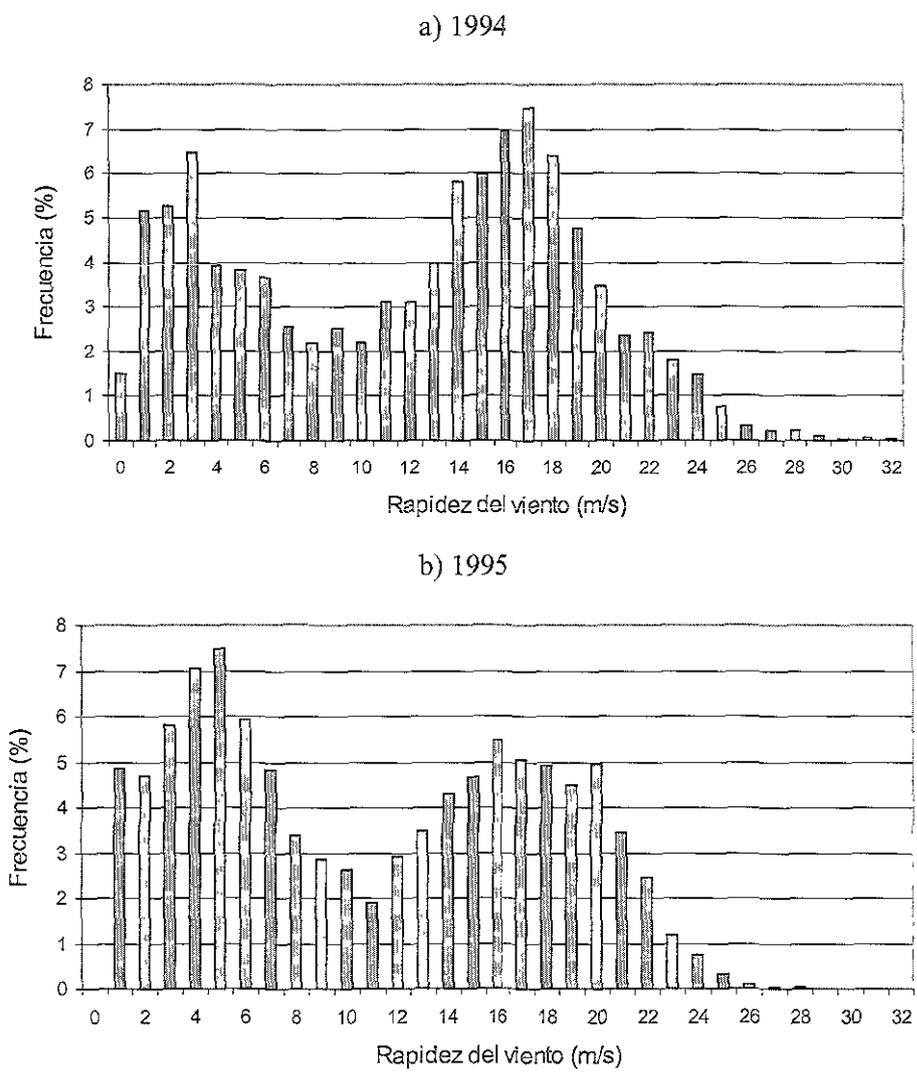
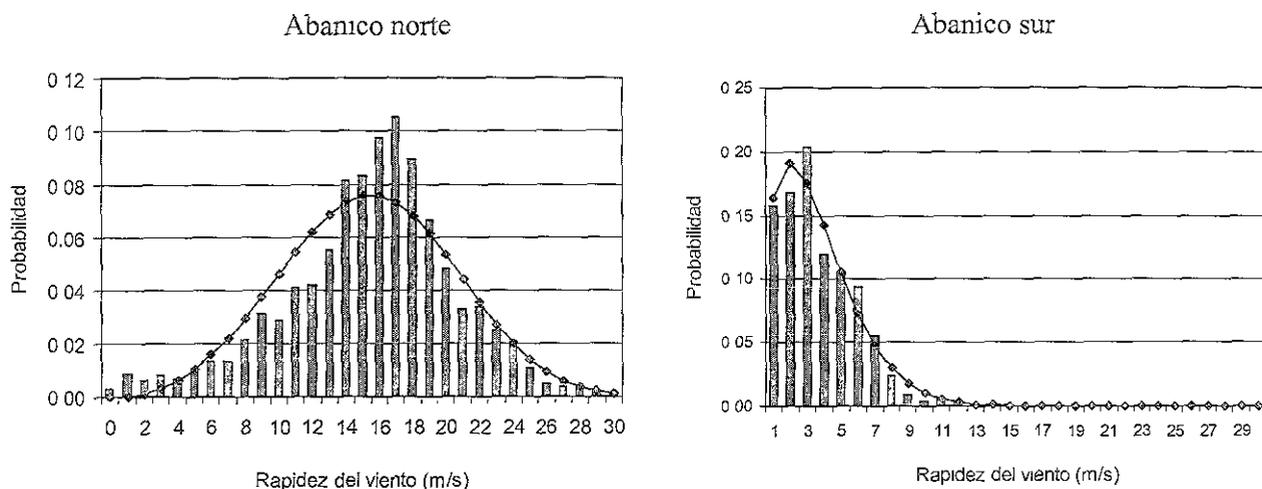


Figura 4.16: Distribuciones anuales de rapidez del viento en La Venta para: a) 1994 y b) 1995.

a) 1994



b) 1995

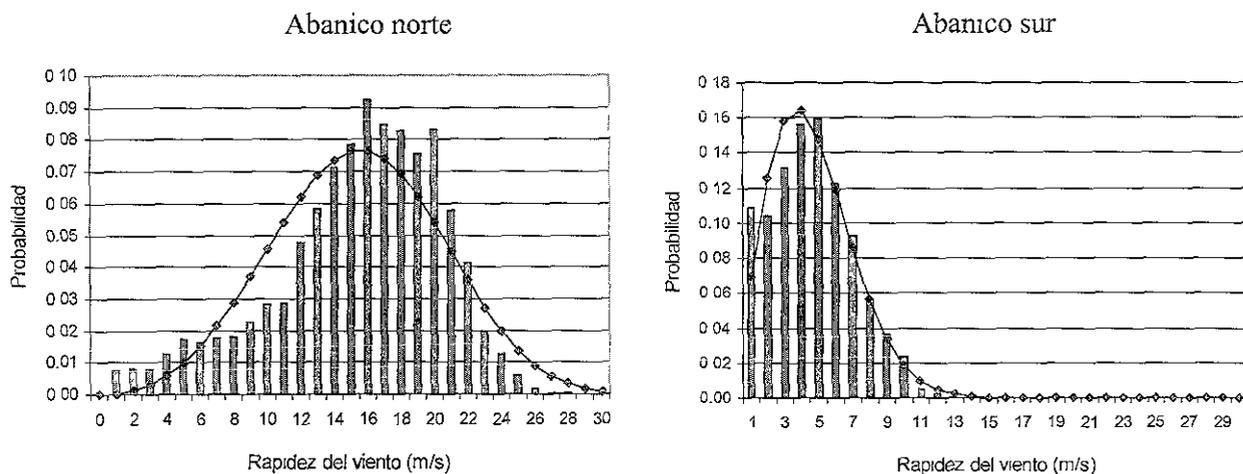


Figura 4.17: Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento observado en La Venta, y distribuciones de probabilidad Weibull ajustadas, para los vientos separados en abanicos norte y sur durante: a) 1994 y b) 1995.

Tabla 4.9: Valores de los parámetros de las distribuciones Weibull ajustadas a las observaciones de rapidez del viento en La Venta durante 1994 y 1995.

Parámetro	1994		1995	
	Vientos del abanico norte	Vientos del abanico sur	Vientos del abanico norte	Vientos del abanico sur
Promedio (m/s)	15.0	3.1	15.0	4.2
Desv. Estd. (m/s)	5.0	2.4	5.0	2.4
k	3.4	1.5	3.4	2.0
c (m/s)	17.2	4.0	17.2	5.2

En la Tabla 4.9 se presentan los valores de los parámetros de las distribuciones Weibull ajustadas a las observaciones de rapidez del viento en La Venta considerando los vientos separados en abanicos norte y sur. Se observa que los valores obtenidos para los vientos del abanico norte son iguales para ambos años; sin embargo, vimos anteriormente que el porcentaje de ocurrencia de vientos del abanico norte es significativamente distinto de un año a otro. Una discusión más detallada de este comportamiento se presenta en el Capítulo V.

## IV.5 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PRESIÓN Y SU CORRELACIÓN CON EL VIENTO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

En esta sección se analiza el campo de presión y su relación con los vientos en el Istmo de Tehuantepec. Primeramente, se discute cómo son los sistemas de presión más frecuentes en el Golfo de México y cómo afectan a los vientos en la vertiente del Golfo de Tehuantepec. Posteriormente, se analizan los datos de presión de los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos y los correspondientes al NCDC y se determina la correlación que existe entre éstos y las mediciones de viento en Salina Cruz y La Venta. Este análisis se utiliza en el siguiente capítulo para construir un modelo matemático con el cual podemos estimar los vientos en La Venta a partir de los datos de presión.

### IV.5.1 *Los sistemas de presión en el Golfo de México*

Las evidencias sugeridas por diversos estudios en relación con los *Tehuanos*, plantean una dependencia del viento en el Istmo con las intrusiones frontales asociadas a sistemas de alta presión que evolucionan sobre el Golfo de México [DiMego, 1976; McCreary, 1989; Schultz, 1996]. En el trabajo realizado por Elliott (1987), se indica que estos vientos intensos no son cuasi-permanentes, como los vientos alisios, sino muy esporádicos, es decir, que pueden ser muy fuertes durante varios días seguidos por períodos de vientos débiles. Con el objeto de definir con mayor precisión la dependencia de los vientos con respecto al campo de presión en la región del Istmo de Tehuantepec, se analizaron poco más de 30 años de datos de presión del NCDC con los cuales se calcularon las diferencias de presión entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec y se construyeron los mapas mensuales de presión promedio para algunos meses de interés.

En total, se calcularon 21,803 diferencias de presión correspondientes a las horas sinópticas 0 Z y 12 Z, que equivalen al 96.3% del total de cálculos posibles en el período considerado (de enero de 1964 a abril de 1994). De estas diferencias, el 82.2% son negativas, es decir, que la presión atmosférica en el Golfo de México es mayor que en el Golfo de Tehuantepec, y el 17.8% restante son positivas o iguales a cero; la proporción anual de diferencias de presión negativas varió entre el 65.8% en 1973 y el 92.8% en 1987 (ver Tabla 4.10). El promedio anual de diferencias de presión negativas fue de -3.7 hPa, con una intensidad máxima de -18.2 hPa en enero de 1979, mientras que el promedio anual de diferencias de presión positivas fue de 1.7 hPa, con un valor máximo de 12.5 hPa en marzo de 1968.

**Tabla 4.10:** Proporción anual de diferencias de presión positivas y negativas entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec para los años de 1964 a 1994.

Año	% de diferencias de presión negativas	% de diferencias de presión positivas	% de diferencias de presión < -2
1964	74.0	26.0	44.3
1965	83.3	16.7	58.6
1966	87.1	12.9	62.9
1967	81.6	18.4	60.2
1968	82.4	17.6	58.8
1969	73.5	26.5	48.1
1970	79.7	20.3	47.3
1971	75.3	24.7	45.9
1972	81.2	18.8	49.2
1973	65.8	34.2	30.3
1974	71.0	29.0	28.3
1975	74.4	25.6	32.7
1976	85.9	14.1	60.0
1977	85.6	14.4	61.7
1978	81.9	18.1	61.8
1979	79.2	20.8	61.1
1980	81.6	18.4	58.7
1981	85.9	14.1	64.8
1982	84.6	15.4	62.7
1983	85.2	14.8	67.5
1984	86.8	13.2	73.5
1985	91.7	8.3	68.8
1986	89.8	10.2	72.4
1987	92.8	7.2	81.7
1988	85.6	14.4	65.7
1989	84.2	15.8	61.0
1990	88.1	11.9	72.9
1991	81.9	18.1	59.2
1992	88.1	11.9	68.8
1993	87.2	12.8	63.5
1994	74.1	25.9	51.9
<i>Prom.</i>	<i>82.2</i>	<i>17.8</i>	<i>58.2</i>

A nivel mensual (no se presentan las tablas), se observó que la incidencia de diferencias de presión negativas menores de -2 hPa fue nula en el mes de mayo de 1975 y de 100% en el mes de octubre de 1987. Para comprender mejor estas situaciones extremas, se construyeron los mapas con los promedios mensuales de presión reducida al nivel del mar para estas dos fechas. En la Figura 4.18 se muestra el mapa de presión promedio para el mes de mayo de 1975 en el que se observa que los sistemas de baja presión invadieron la región sur del Golfo de México, extendiéndose, de manera poco usual en este mes, sobre el noreste de la República Mexicana. Esta situación generó, durante todo el mes, diferencias de presión positivas entre un extremo y otro del Istmo. Como comparación, se trazó el mapa de presión promedio para el mes de mayo de 1992 (Figura 4.19), el cual presentó el mayor número de diferencias de presión negativas, en donde se observa que los sistemas de baja presión, típicos del verano, se desplazaron sobre la costa oeste de la República Mexicana, penetrando al continente sobre Nayarit, Sinaloa y Sonora, y facilitando que el anticiclón del Atlántico se estableciera sobre el Golfo de México.

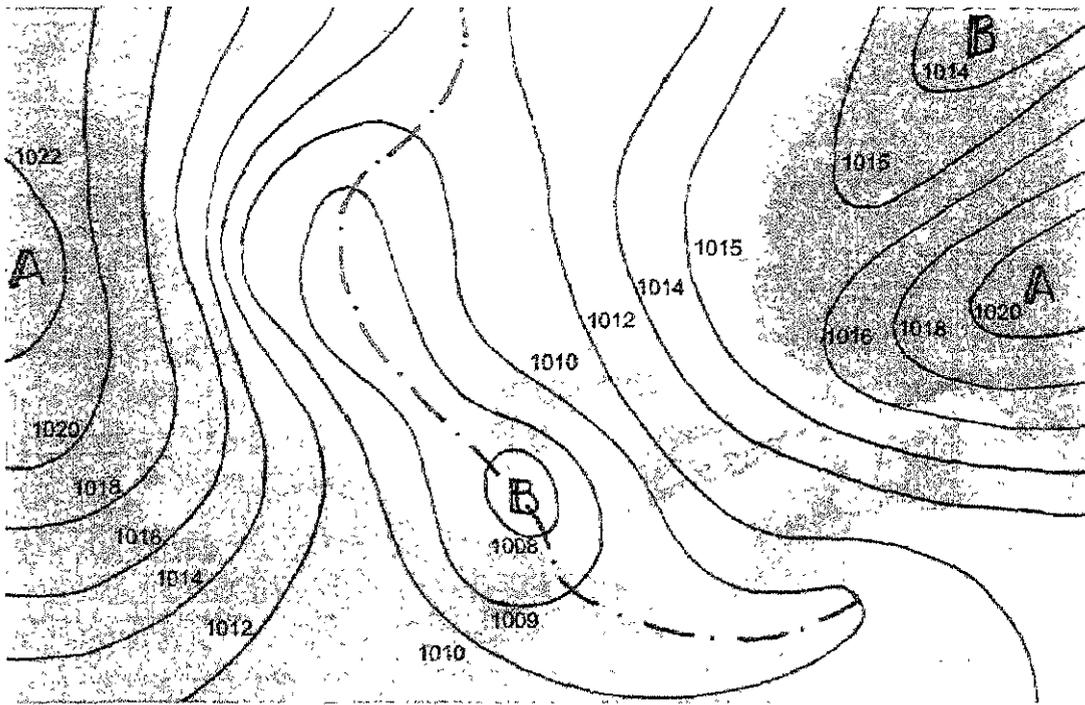


Figura 4.18: Mapa de presión promedio para el mes de mayo de 1975.

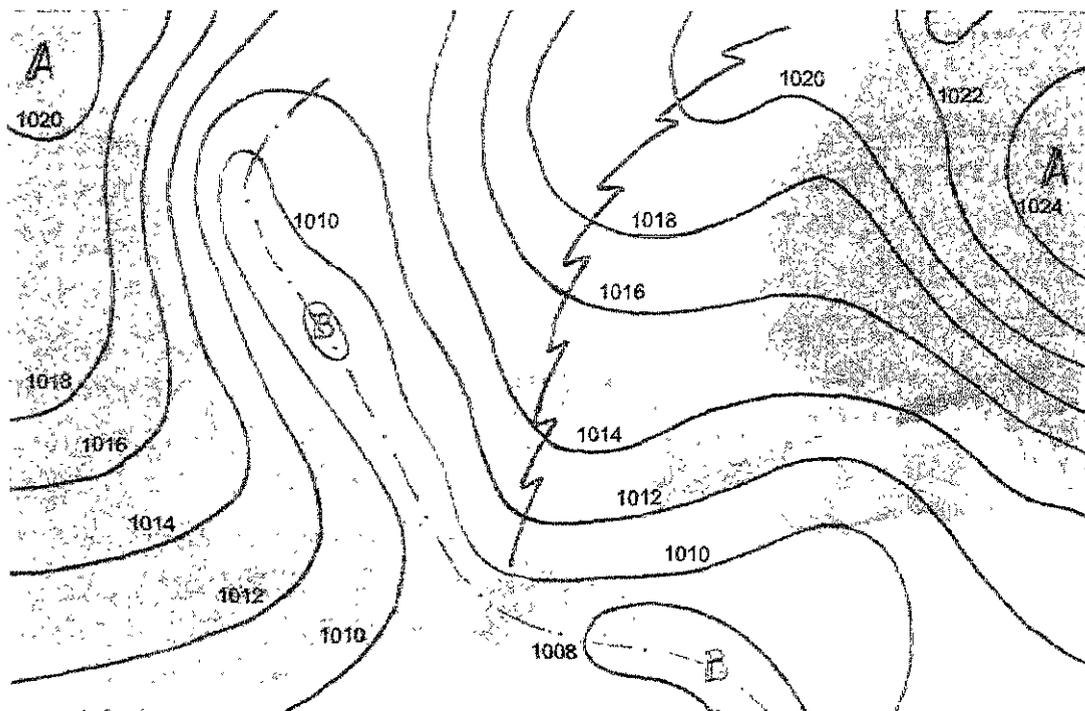


Figura 4.19: Mapa de presión promedio para el mes de mayo de 1992.

En la Figura 4.20 se muestra el mapa de presión promedio para el mes de octubre de 1987 en el cual se observa el anticiclón bien establecido sobre los Estados Unidos, formando una cuña profunda que penetra hasta el Istmo de Tehuantepec y que se ve flanqueada por vaguadas a ambos lados, provocando gradientes de presión intensos a través del Istmo. Como comparación, se trazó el mapa de presión promedio para el mes de octubre de 1985 (Figura 4.21), el cual presentó el menor número de diferencias de presión negativas, en

donde se observa que el anticiclón se encuentra desplazado al oriente y se confunde con la alta semipermanente de las Bermudas-Azores. Sin embargo, se aprecia su influencia generando al menos una línea isobárica a través del Istmo (que corresponde a una diferencia de presión negativa entre un extremo y otro del Istmo de por lo menos -1 hPa).

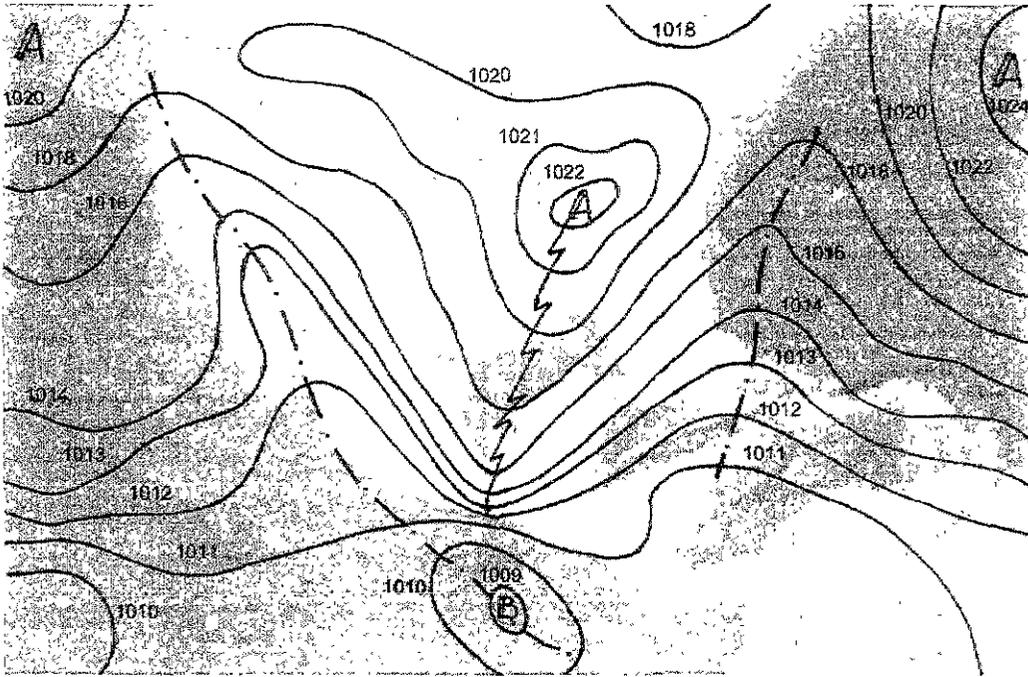


Figura 4.20: Mapa de presión promedio para el mes de octubre de 1987.

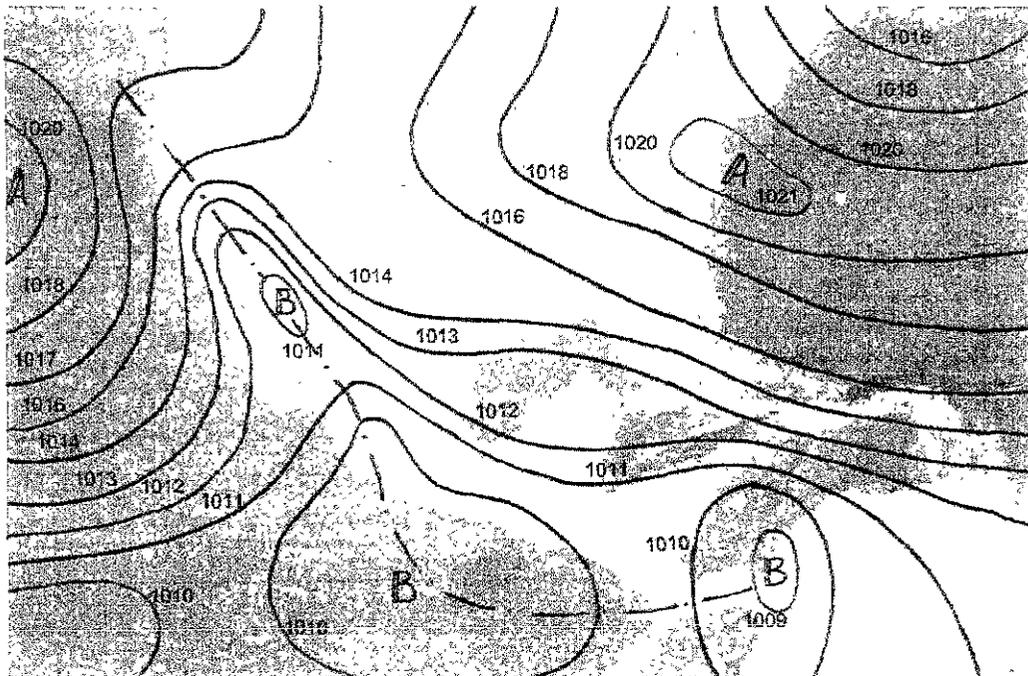


Figura 4.21: Mapa de presión promedio para el mes de octubre de 1985.

Una investigación de las causas que provocan estos desplazamientos poco usuales de los sistemas de presión involucra la realización de una climatología de la circulación general, que integre variables de orden sinóptico y global como las asociadas con el fenómeno de El Niño. Un ejemplo de este tipo de estudios es el de DiMego (1976), en el cual se analiza la frecuencia de las incursiones de las masas de aire polar en el Golfo de México y el Mar Caribe en el período de 1965 a 1972. Una de las conclusiones del trabajo de DiMego es que la frecuencia y grado de penetración de los frentes fríos hacia los trópicos está en función directa de la posición, intensidad y amplitud de la circulación general de latitudes medias.

Generalmente la dirección del viento es perpendicular al gradiente de presión. Cuando el viento cumple con esta característica se dice que es un viento geostrófico, que es característico de los casos en los que las fuerzas predominantes son el gradiente de presión y la fuerza de Coriolis (ver el Apéndice). Esto se da cuando la fricción es muy pequeña y la aceleración es despreciable. En el Istmo de Tehuantepec la dirección del viento está restringida por sus características orográficas, por lo cual no se espera que mantenga una dirección paralela a las isobaras. En las secciones siguientes se analiza la relación que guarda el viento con las diferencias de presión entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec.

#### IV.5.2 *El viento en La Venta y las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC*

Con el propósito de determinar la relación entre la intensidad del viento observado en La Venta y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC ( $\Delta P_{\text{NCDC}}$ ), se graficó el diagrama de dispersión para estas dos variables (Figura 4.22). La gráfica refleja exclusivamente la tendencia del comportamiento del viento durante el invierno debido a que el período de datos utilizado es del 1° de enero al 30 de abril de 1994, periodo en el cual se tiene simultaneidad de registros en ambas series de datos. En el diagrama se distinguen claramente dos concentraciones de puntos importantes: una de ellas corresponde a puntos con valores de rapidez del viento superiores a los 5 m/s y diferencias de presión negativas, y la otra corresponde a puntos con valores de rapidez del viento inferiores a los 5 m/s y diferencias de presión negativas, pero pequeñas, o positivas.

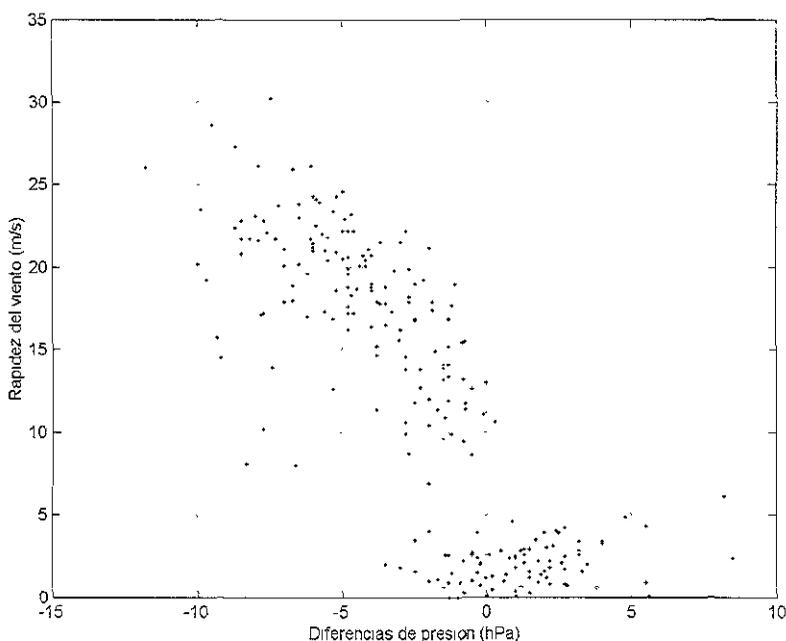
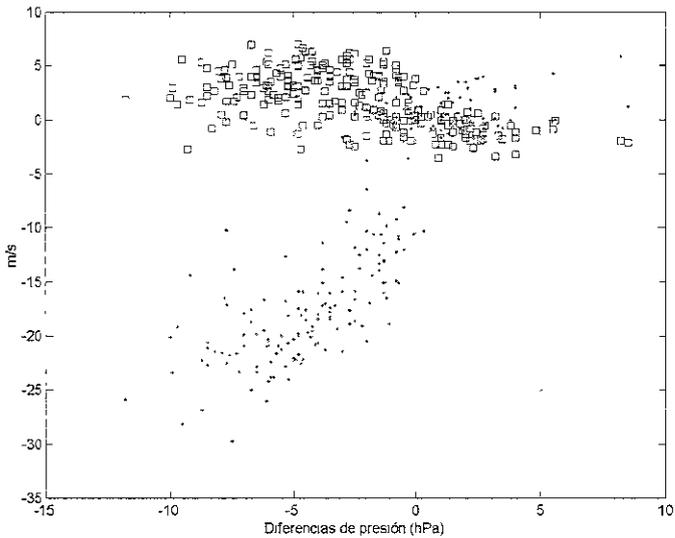


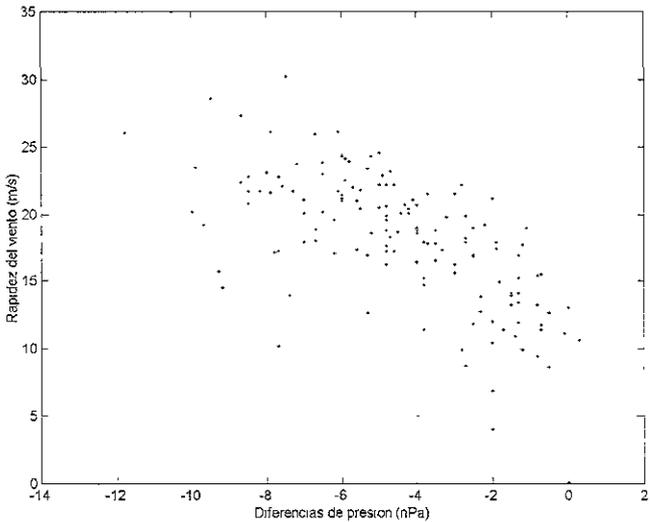
Figura 4.22: Diagrama de dispersión entre la rapidez del viento en La Venta y las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC.

Con el objeto de investigar el origen de esta doble acumulación, se graficó el diagrama de dispersión considerando los valores de las componentes zonal ( $u$ ) y meridional ( $v$ ) del viento contra las diferencias de presión  $\Delta P_{NCDC}$  (Figura 4.23). En esta gráfica se observa que los vientos intensos del norte (valores negativos y grandes de la componente  $v$ ) están asociados con valores negativos de  $\Delta P_{NCDC}$ , mientras que los vientos menos intensos del norte (valores negativos y pequeños de  $v$ ) y los vientos del sur (valores positivos de  $v$ ), están asociados con diferencias de presión positivas o con diferencias de presión negativas pero pequeñas. Se observa también que la componente  $u$  es menos intensa que la componente  $v$  y que presenta valores positivos asociados con diferencias de presión negativas y algunos valores negativos asociados con diferencias de presión positivas.

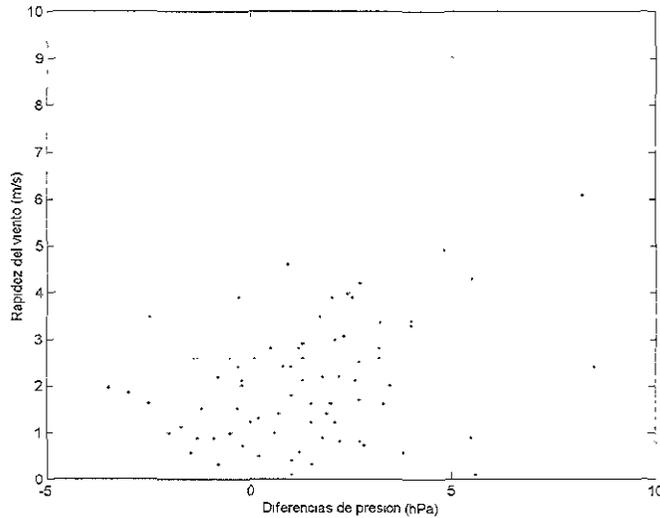


**Figura 4.23:** Diagrama de dispersión entre las componentes  $u$  (cuadros) y  $v$  (puntos) del viento en La Venta y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.

Con base en el análisis anterior, se graficaron los diagramas de dispersión entre  $\Delta P_{NCDC}$  y la rapidez de los vientos del abanico norte o del abanico sur registrado a las 0 Z y 12 Z (Figuras 4.24 y 4.25, respectivamente).



**Figura 4.24:** Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico norte en La Venta y las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC.



**Figura 4.25:** Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico sur en La Venta y las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC.

En estos diagramas no aparece la doble acumulación de puntos que se observó en la Figura 4.22 y se corrobora lo observado en la Figura 4.23, es decir, que los vientos del abanico norte están asociados casi en su totalidad con diferencias de presión negativas, las cuales varían entre 0 y  $-12$  hPa, y los vientos del abanico sur, significativamente menos intensos que los del abanico norte, están asociados con diferencias de presión que varían entre  $-4$  hPa y  $9$  hPa. En ambos diagramas podemos observar que, conforme se incrementa la rapidez del viento se incrementan las diferencias de presión, en sentido negativo en el caso del abanico norte y en sentido positivo en el caso del abanico sur, aunque en este último caso la tendencia es menos clara que la observada con los vientos del abanico norte.

En la Tabla 4.11 se presentan los coeficientes de correlación entre  $\Delta P_{\text{NCDC}}$  y la rapidez del viento en La Venta considerando: el conjunto de todos los vientos, los vientos agrupados en abanicos norte y sur, las componentes  $u$  y  $v$  del viento observado a las 0 Z y 12 Z, y los valores de las componentes promediados en 12 horas.

**Tabla 4.11:** Coeficientes de correlación entre las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC y la rapidez del viento en La Venta considerando: el viento observado a las 0 Z y 12 Z (**Rap V**); el viento del abanico norte o del abanico sur registrado a las 0 Z y 12 Z (**Ab. Norte**, **Ab. Sur**); las componentes  $u$  y  $v$  del viento observado a las 0 Z y 12 Z, y los valores de las componentes  $u$  y  $v$  promediados en 12 horas ( $u_{\pm 6}$  y  $v_{\pm 6}$ ).

$\Delta P_{\text{NCDC}}$ vs/	Rap V	Ab. Norte	Ab. Sur	$u$	$v$	$u_{\pm 6}$	$v_{\pm 6}$
Coefficiente de correlación	-0.80	-0.60	0.06	-0.53	0.83	-0.63	0.88

Se observa que los valores de las componentes del viento obtenidos al promediar los datos de 6 horas antes y 6 horas después de las 0 Z y 12 Z, tienen una correlación más alta con  $\Delta P_{\text{NCDC}}$  que el valor registrado a la misma hora que el dato de presión, debido a que al promediar se filtran las variaciones de alta frecuencia que afectan a los vientos. Los valores de los coeficientes de correlación corroboran lo que se observa en los diagramas de dispersión; por ejemplo, la componente meridional ( $v$ ) presenta una correlación alta y positiva con  $\Delta P_{\text{NCDC}}$ , es decir, que si la presión en el Golfo de México es considerablemente mayor que en el Golfo de Tehuantepec (valores muy negativos de  $\Delta P_{\text{NCDC}}$ ) vamos a observar vientos intensos del norte en la región (valores muy negativos de  $v$ ), y viceversa. Por el contrario, la componente zonal ( $u$ ) presenta una correlación

negativa con  $\Delta P_{\text{NCDC}}$ , lo cual significa que cuando las diferencias de presión son negativas, la componente zonal será positiva (viento con componente del oeste) y viceversa. Cabe mencionar que este comportamiento es contrario al esperado en un sitio que no está afectado por la topografía.

Con respecto a la correlación entre  $\Delta P_{\text{NCDC}}$  y la rapidez de los vientos del abanico norte, el valor del coeficiente es de  $-0.60$ , mientras que la correlación entre  $\Delta P_{\text{NCDC}}$  y la rapidez de los vientos del resto de las direcciones es prácticamente nula.

#### IV.5.3 El viento en La Venta y las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos

El siguiente análisis se llevó a cabo con el objeto de establecer si existe alguna diferencia significativa entre los resultados obtenidos al utilizar las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC ( $\Delta P_{\text{NCDC}}$ ) y las calculadas con los datos de los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos ( $\Delta P_{\text{SC-C}}$ ). Esta última serie de datos incluye los períodos del 1° de enero al 31 de diciembre de 1988, del 1° de enero al 30 de noviembre de 1994 y del 1° de julio al 31 de diciembre de 1995, y consta de un total de 41,829 valores horarios de diferencias de presión. En este caso, las series de datos de viento en La Venta y de diferencias de presión entre los observatorios coinciden en 9,659 horas entre el 1° de enero de 1994 y el 31 de diciembre de 1995, con un hueco importante de datos entre diciembre de 1994 y junio de 1995.

En la Figura 4.26 se muestra el diagrama de dispersión entre la rapidez del viento en La Venta y las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos, observándose una doble acumulación de puntos similar a la observada en la Figura 4.22: una acumulación de puntos con valores de rapidez del viento superiores a los 7 m/s y diferencias de presión mayormente negativas, y otra acumulación de puntos con valores de rapidez del viento inferiores a los 7 m/s y diferencias de presión mayormente positivas.

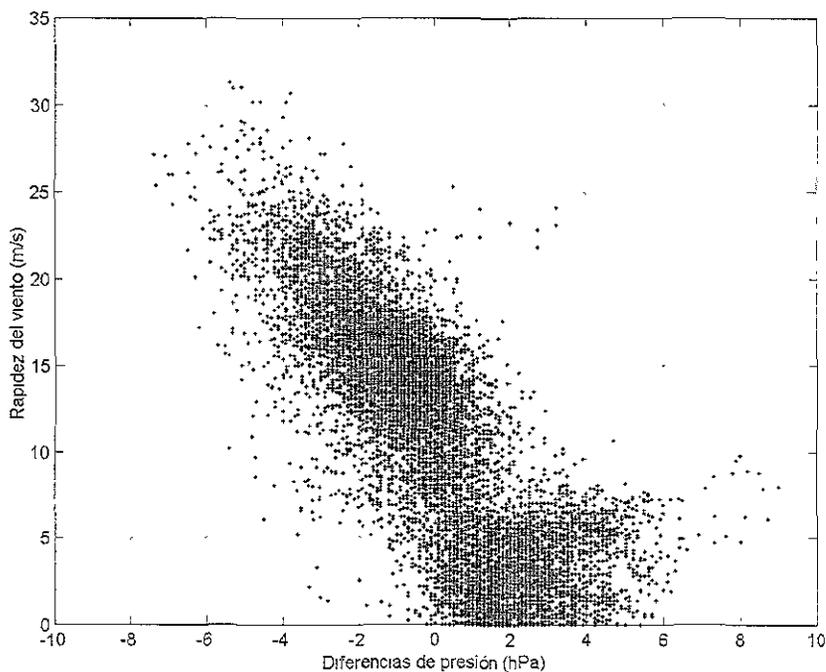
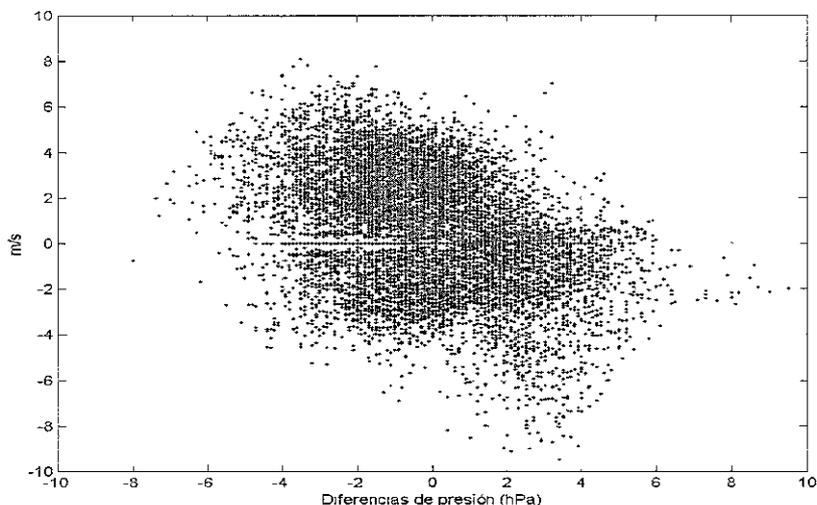
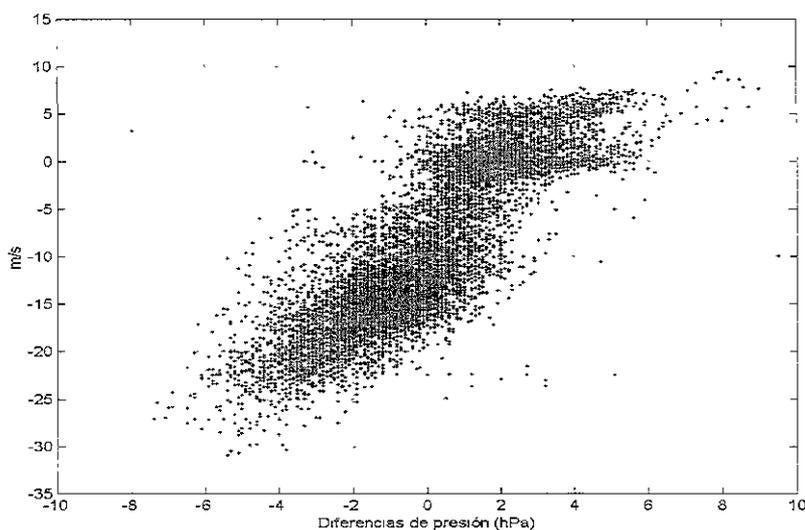


Figura 4.26: Diagrama de dispersión entre la rapidez del viento en La Venta y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.

Siguiendo el mismo criterio de la sección anterior, se graficaron los diagramas de dispersión entre  $\Delta P_{SC-C}$  y los valores de las componentes  $u$  y  $v$  del viento registrado en La Venta (Figuras 4.27 y 4.28, respectivamente). En la Figura 4.27 podemos observar que cuando las diferencias de presión son negativas, es decir, cuando la presión en Coatzacoalcos es mayor que en Salina Cruz, la componente  $u$  presenta valores positivos (vientos del oeste) con mayor frecuencia. Cuando las diferencias de presión son positivas, es decir, cuando la presión en Coatzacoalcos es menor que en Salina Cruz, se observan tanto valores positivos como negativos de la componente  $u$ , aunque en este caso se observa una cantidad importante de valores negativos de  $u$  (vientos del este) asociados con valores altos y positivos de  $\Delta P_{SC-C}$ .



**Figura 4.27:** Diagrama de dispersión entre la componente  $u$  del viento en La Venta y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.

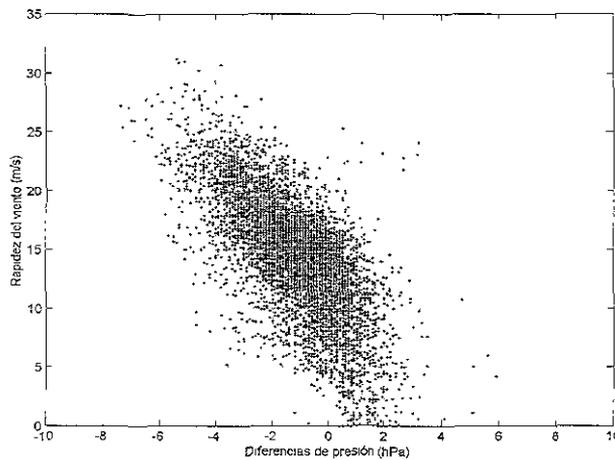


**Figura 4.28:** Diagrama de dispersión entre la componente  $v$  del viento en La Venta y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.

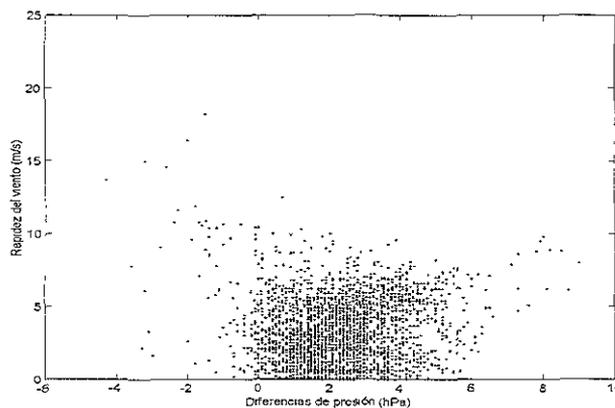
En el diagrama de la Figura 4.28, podemos observar que cuando las diferencias de presión son negativas los valores de la componente  $v$  son, casi en su totalidad, negativos (vientos del norte), mientras que para valores positivos de  $\Delta P_{SC-C}$  se observan tanto valores positivos como negativos de  $v$ . Sin embargo, podemos observar que los valores positivos de  $v$  (vientos del sur) están asociados, prácticamente en su totalidad, con valores positivos de  $\Delta P_{SC-C}$ . A diferencia de lo que se observa en la Figura 4.23, en este diagrama se observa una acumulación importante de puntos con valores negativos de  $v$  asociados con diferencias de presión positivas.

Las Figuras 4.29 y 4.30 muestran los diagramas de dispersión entre las diferencias de presión  $\Delta P_{SC-C}$  y la rapidez de los vientos de los abanicos norte y sur, respectivamente, en los cuales no se observa la doble acumulación de puntos de la Figura 4.26. A diferencia de lo observado en la Figura 4.24 con los datos de presión del NCDC, el diagrama de la Figura 4.29 muestra bastantes valores asociados con diferencias de presión positivas, es decir, que se observan vientos del norte cuando la presión en Coatzacoalcos es menor que en Salina Cruz. Esta diferencia puede explicarse por las siguientes razones:

- La ubicación de los observatorios no coincide con la de los vértices que se usaron para calcular las diferencias de presión con los datos del NCDC, estando estos últimos localizados más cerca de los centros de alta y baja presión.
- Los datos de presión de los observatorios no están reducidos al nivel medio del mar mientras que los del NCDC sí lo están. El observatorio de Coatzacoalcos se ubica 14 metros sobre el nivel del mar y el de Salina Cruz a 6 metros.



**Figura 4.29:** Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico norte en La Venta y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.



**Figura 4.30:** Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico sur en La Venta y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.

En el diagrama de la Figura 4.30 podemos observar que los vientos del abanico sur están asociados, en su gran mayoría, con diferencias de presión positivas, y que estos vientos son considerablemente menos intensos que los del abanico norte, similar a lo que se observa en la Figura 4.25.

En la Tabla 4.12 se presentan los coeficientes de correlación entre  $\Delta P_{SC-C}$  y la rapidez del viento observado a la hora correspondiente en La Venta, considerando: el conjunto de todos los vientos; los vientos del abanico norte o del abanico sur, y los valores de las componentes  $u$  y  $v$ .

**Tabla 4.12:** Coeficientes de correlación entre las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos y la rapidez del vientos en La Venta, considerando: el conjunto de todos los vientos (**Rap V**); los vientos del abanico norte o del abanico sur (**Ab. Norte, Ab. Sur**), y los valores de las componentes  $u$  y  $v$ .

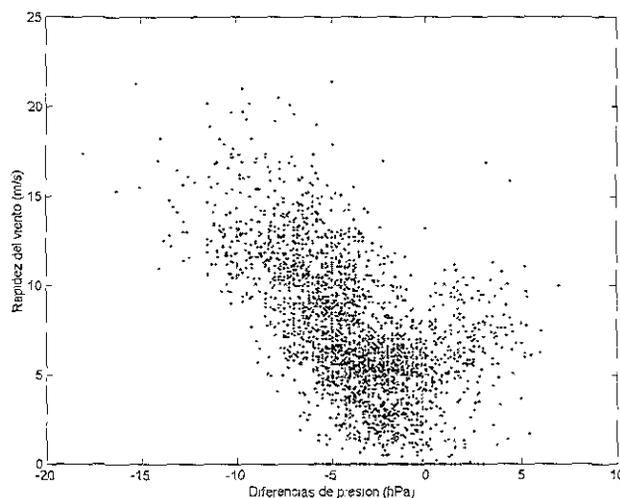
$\Delta P_{SC-C}$ vs/	Rap V	Ab. Norte	Ab. Sur	$u$	$v$
<b>Coefficiente de correlación</b>	-0.79	-0.69	0.06	-0.40	0.84

Los valores de los coeficientes de correlación entre  $\Delta P_{SC-C}$  y el viento observado en La Venta son muy similares a los obtenidos en la sección anterior usando los datos de presión del NCDC (Tabla 4.11). Por lo tanto, los resultados obtenidos muestran la coherencia entre ambos conjuntos de datos de presión.

#### IV.5.4 El viento en Salina Cruz y las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC

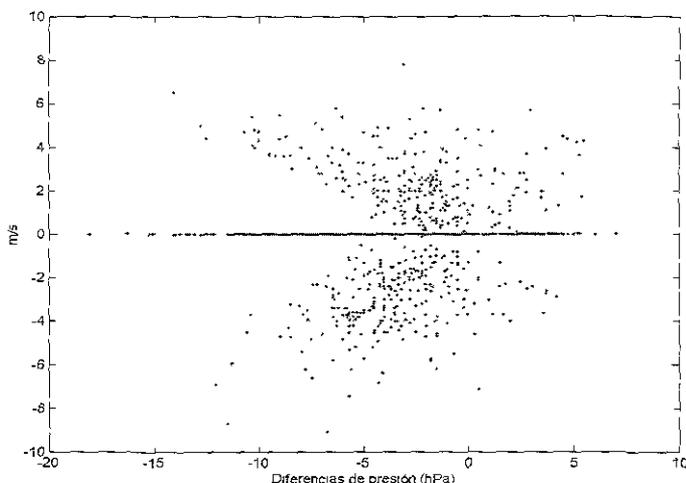
En esta sección se realiza un análisis similar al de la sección IV.5.2 para estudiar la relación que existe entre las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC ( $\Delta P_{NCDC}$ ) y los vientos observados en Salina Cruz. En este caso, las series de datos tienen 3,300 registros simultáneos a las 0 Z y 12 Z para el período comprendido entre octubre de 1983 y diciembre de 1988.

El diagrama de dispersión entre la rapidez del viento en Salina Cruz y  $\Delta P_{NCDC}$  (Figura 4.31) muestra que la intensidad del viento aumenta conforme se incrementan las diferencias de presión, tanto en sentido positivo como negativo, observándose dos aglomeraciones de puntos que también pueden estar asociadas con direcciones distintas del viento, como en el caso del viento en La Venta. En este diagrama se observa claramente una línea de puntos con rapidez nula correspondiente al conjunto de datos registrados como calmas.



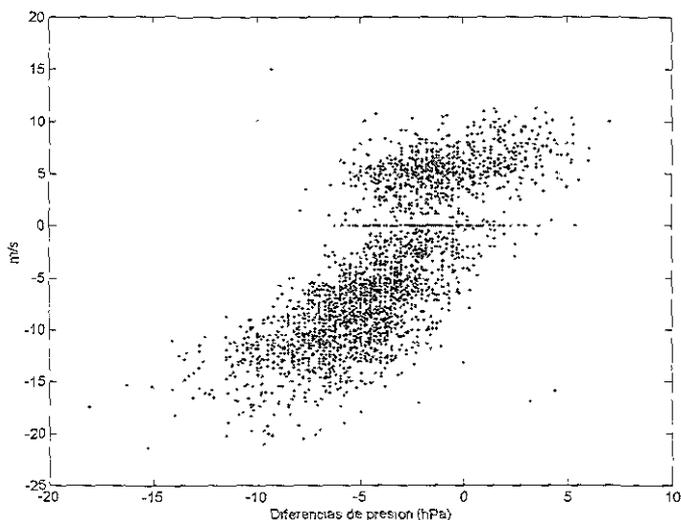
**Figura 4.31:** Diagrama de dispersión entre la rapidez del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.

En el diagrama de dispersión entre la componente zonal ( $u$ ) del viento en Salina Cruz y  $\Delta P_{\text{NCDC}}$  (Figura 4.32) se observa que, sin importar el signo de  $\Delta P_{\text{NCDC}}$ , los valores de  $u$  son tanto positivos (viento del oeste) como negativos (viento del este). Asimismo, se observa que la componente  $u$  tiende a ser más intensa cuando las diferencias de presión aumentan en sentido negativo. Este comportamiento complejo de la componente  $u$  del viento en Salina Cruz con respecto a las diferencias de presión, puede deberse al carácter inercial de los vientos en el Golfo de Tehuantepec en combinación con otros procesos, como los patrones dominantes en el Pacífico adyacente al golfo [Bourassa, 1999].



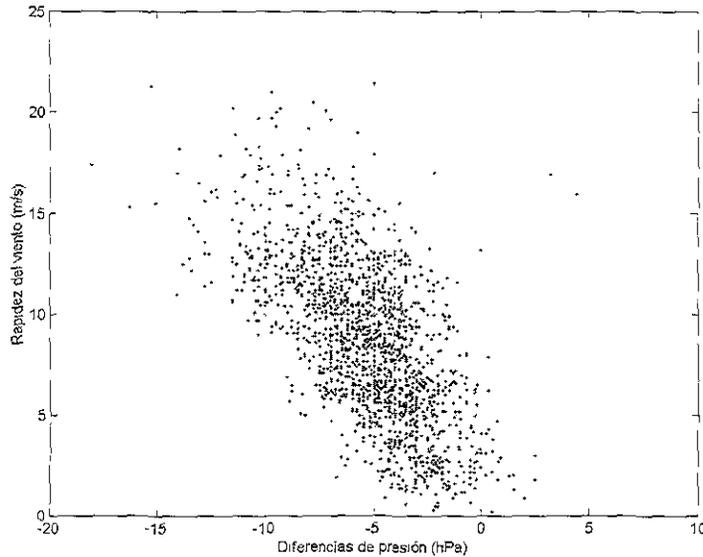
**Figura 4.32:** Diagrama de dispersión entre la componente  $u$  del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.

En cuanto al comportamiento de la componente meridional ( $v$ ) del viento en Salina Cruz con respecto a  $\Delta P_{\text{NCDC}}$  (Figura 4.33), el diagrama de dispersión muestra que los valores negativos de  $v$  (vientos del norte) están asociados, casi en su totalidad, con diferencias de presión negativas, es decir, cuando la presión en el Golfo de México es mayor que en el Golfo de Tehuantepec. También podemos observar valores positivos de  $v$  (vientos del sur) asociados con diferencias de presión negativas, cuando éstas son relativamente pequeñas (entre 0 y  $-6$  hPa). En general, cuando las diferencias de presión son positivas, se observan valores positivos de  $v$  predominantemente.



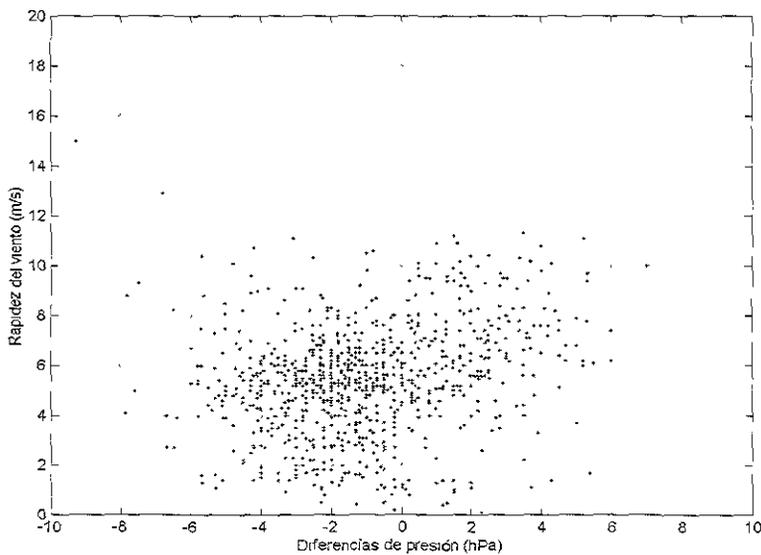
**Figura 4.33:** Diagrama de dispersión entre la componente  $v$  del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.

El diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico norte y las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC (Figura 4.34), muestra una tendencia al aumento de la rapidez de los vientos conforme se incrementan las diferencias de presión en sentido negativo, y muy pocos puntos asociados con valores positivos de  $\Delta P_{\text{NCDC}}$ .



**Figura 4.34:** Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico norte en Salina Cruz y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.

En cuanto a los vientos del abanico sur, el diagrama de dispersión (Figura 4.35) muestra que los valores de rapidez del viento están asociados tanto a valores positivos como negativos de  $\Delta P_{\text{NCDC}}$ , con cierta tendencia al aumento de la rapidez de los vientos conforme se incrementan las diferencias de presión en sentido positivo.



**Figura 4.35:** Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico sur en Salina Cruz y las diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC.

En la Tabla 4.13 se presentan los coeficientes de correlación entre  $\Delta P_{\text{NCDC}}$  y la rapidez del viento en Salina Cruz considerando: el viento observado a las 0 Z y 12 Z; el viento del abanico norte o del abanico sur registrado a las 0 Z y 12 Z; las componentes  $u$  y  $v$  del viento registrado a las 0 Z y 12 Z, y los valores de las componentes promediados en 12 horas, es decir, 6 horas antes y 6 horas después de las 0 Z y 12 Z.

**Tabla 4.13:** Coeficientes de correlación entre las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC y la rapidez del viento en Salina Cruz considerando: el viento observado a las 0 Z y 12 Z (**Rap V**); el viento del abanico norte o del abanico sur registrado a las 0 Z y 12 Z (**Ab. Nte.**, **Ab. Sur**); las componentes  $u$  y  $v$  del viento registrado a las 0 Z y 12 Z, y los valores de las componentes promediados en 12 horas ( $u_{\pm 6}$ ,  $v_{\pm 6}$ ).

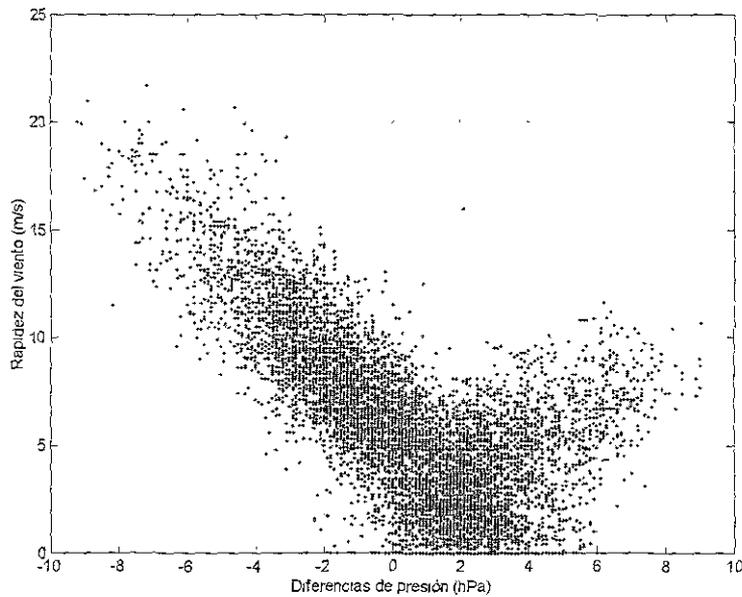
$\Delta P_{\text{NCDC}}$ vs/	Rap V	Ab. Norte	Ab. Sur	$u$	$v$	$u_{\pm 6}$	$v_{\pm 6}$
Coefficiente de correlación	-0.57	-0.64	0.21	0.05	0.74	-0.03	0.79

La componente  $v$  del viento en Salina Cruz presenta una correlación alta y positiva con respecto a las diferencias de presión obtenidas con los datos del NCDC, similar a lo que se observa con los datos de viento en La Venta. Sin embargo, la componente  $u$  del viento en Salina Cruz tiene una correlación prácticamente nula con  $\Delta P_{\text{NCDC}}$ , a diferencia de lo observado en La Venta en donde esta componente presenta coeficientes de correlación de  $-0.53$  para  $u$  y  $-0.63$  para  $u_{\pm 6}$ . Con respecto a la correlación entre  $\Delta P_{\text{NCDC}}$  y la rapidez del viento observado en Salina Cruz, se observa una correlación negativa pero menor a la observada en el caso del viento en La Venta. En cuanto a la rapidez de los vientos del abanico norte en Salina Cruz, la correlación con  $\Delta P_{\text{NCDC}}$  es negativa y muy similar a la obtenida con los datos de La Venta, mientras que la rapidez de los vientos del abanico sur muestra cierta correlación positiva con  $\Delta P_{\text{NCDC}}$ , a diferencia de lo observado en La Venta cuya correlación resultó prácticamente nula. Las diferencias en los valores de la correlación entre  $\Delta P_{\text{NCDC}}$  y el viento observado en Salina Cruz y el observado en La Venta, se deben a los distintos fenómenos causantes del viento en cada zona.

#### IV.5.5 El viento en Salina Cruz y las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos

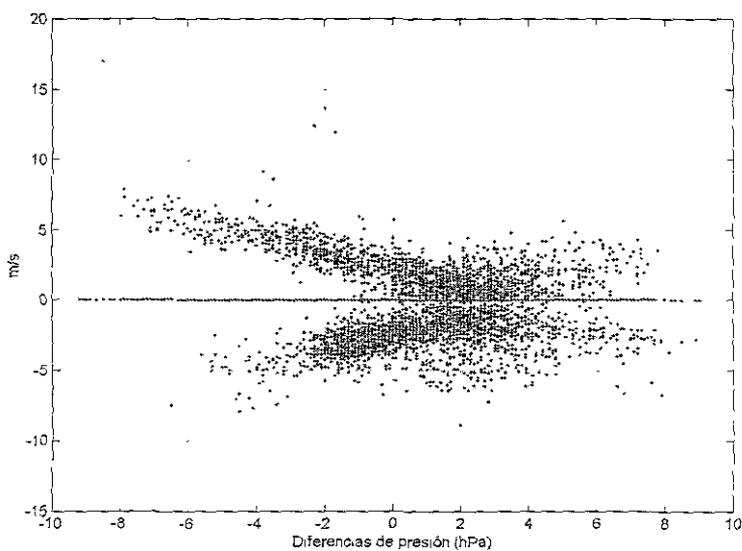
En este caso, las series de datos de viento en Salina Cruz y de diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos ( $\Delta P_{\text{SC-C}}$ ) tienen un total de 27,827 registros simultáneos en el período comprendido entre octubre de 1983 y diciembre de 1988. Debido a la gran cantidad de datos que se tienen en este caso y puesto que el análisis de los datos de viento en Salina Cruz muestra deficiencias en el funcionamiento del anemocinemógrafo en los años anteriores a 1988, se hizo un análisis similar al de las secciones anteriores tomando en cuenta únicamente los datos correspondientes a 1988.

La Figura 4.36 muestra el diagrama de dispersión entre la rapidez del viento en Salina Cruz y  $\Delta P_{\text{SC-C}}$ , en el que se observa nuevamente una tendencia al aumento de la rapidez del viento conforme se incrementan las diferencias de presión tanto en sentido positivo como negativo.



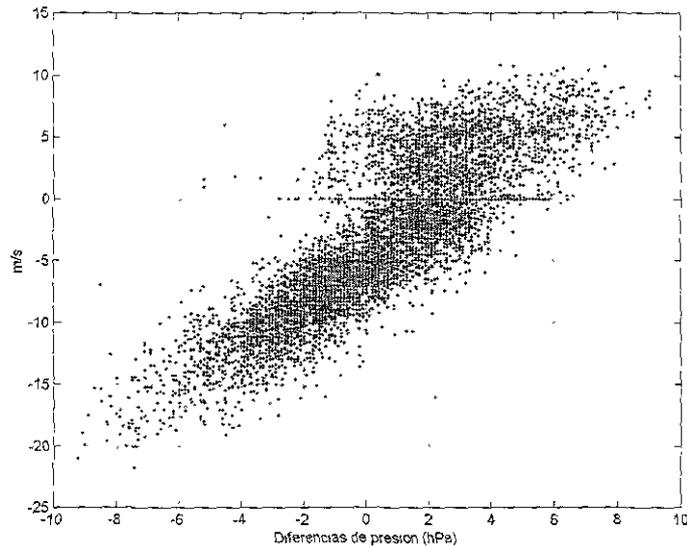
**Figura 4.36:** Diagrama de dispersión entre la rapidez del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.

En el diagrama de dispersión entre la componente zonal ( $u$ ) del viento en Salina Cruz y  $\Delta P_{SC-C}$  (Figura 4.37), se observa bien marcada la doble tendencia que presenta la componente  $u$  con respecto a los valores de  $\Delta P_{SC-C}$ , similar a la que se observa en la Figura 4.32 considerando los datos de presión del NCDC. En este caso, podemos observar una gran cantidad de puntos con valores positivos de  $\Delta P_{SC-C}$  que están asociados tanto a valores positivos de  $u$  (viento del oeste) como a valores negativos (viento del este). Es el comportamiento de la componente  $u$  del viento con respecto a las diferencias de presión, el que marca la diferencia más notoria entre el viento observado en La Venta y el observado en Salina Cruz ya que este último está más expuesto a otros procesos que los determinados básicamente por la orografía.



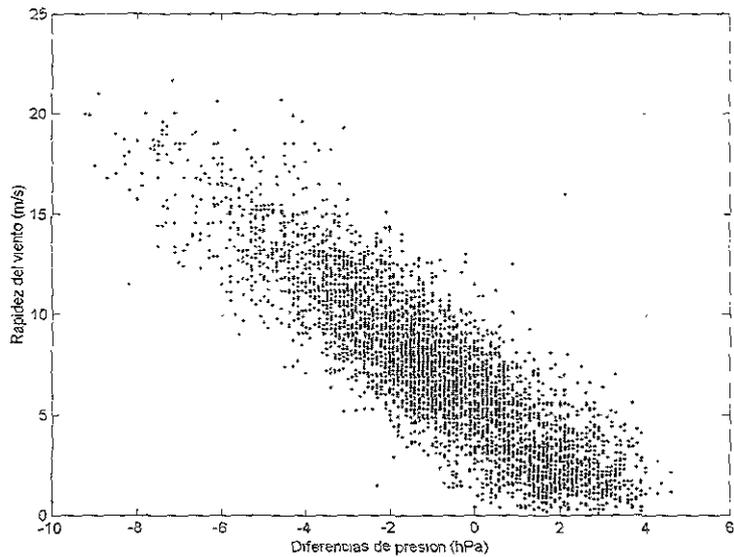
**Figura 4.37:** Diagrama de dispersión entre la componente  $u$  del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.

El diagrama de dispersión entre la componente meridional ( $v$ ) del viento en Salina Cruz y  $\Delta P_{SC-C}$  (Figura 4.38), muestra una gran similitud con el diagrama correspondiente al viento en La Venta (ver Figura 4.28). Los valores muy negativos de  $v$  (vientos intensos del norte) están asociados con valores negativos de  $\Delta P_{SC-C}$ , es decir, cuando la presión en Coatzacoalcos es mayor que en Salina Cruz, y los valores positivos de  $v$  (vientos del sur) están asociados, casi en su totalidad, con valores positivos de  $\Delta P_{SC-C}$ . En este diagrama, a diferencia de lo observado en la Figura 4.33 considerando los datos de presión del NCDC, se observa una acumulación importante de puntos con valores negativos de  $v$  (vientos del norte) asociados con diferencias de presión positivas, es decir, cuando la presión en Coatzacoalcos es menor que en Salina Cruz.

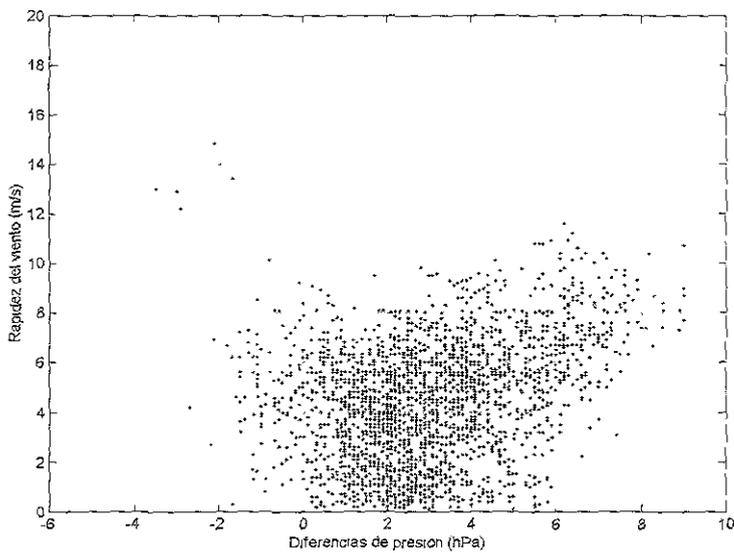


**Figura 4.38:** Diagrama de dispersión entre la componente  $v$  del viento en Salina Cruz y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.

Al separar los vientos en abanicos norte y sur, obtenemos los diagramas de dispersión de las Figuras 4.39 y 4.40, respectivamente. A diferencia de lo observado en las Figuras 4.34 y 4.35 que muestran los diagramas de dispersión de la rapidez de los vientos de los abanicos norte y sur con respecto a  $\Delta P_{NCDC}$ , en el diagrama de la Figura 4.39 se observan bastantes vientos del abanico norte asociados con diferencias de presión positivas y en el diagrama de la Figura 4.40 se observan muy pocos vientos del abanico sur asociados con diferencias de presión negativas. Estas diferencias las podemos atribuir, como lo mencionamos en la Sección IV.5.3, a que la ubicación de los observatorios no coincide con la de los vértices que se usaron para calcular las diferencias de presión con los datos del NCDC, y a que los datos de presión de los observatorios no están reducidos al nivel medio del mar mientras que los del NCDC sí lo están. Podemos observar también que los vientos del abanico norte presentan una tendencia muy clara con respecto a  $\Delta P_{SC-C}$ , intensificándose la rapidez de los vientos en el sentido de incremento negativo de  $\Delta P_{SC-C}$ , mientras que los vientos del abanico sur muestran una dispersión considerable con respecto a las diferencias de presión entre los observatorios.



**Figura 4.39:** Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico norte en Salina Cruz y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.



**Figura 4.40:** Diagrama de dispersión entre la rapidez de los vientos del abanico sur en Salina Cruz y las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.

En la Tabla 4.14 se presentan los coeficientes de correlación entre  $\Delta P_{SC-C}$  y la rapidez del viento observado a la hora correspondiente en Salina Cruz, considerando: el conjunto de todos los vientos; los vientos del abanico norte o del abanico sur, y los valores de las componentes u y v.

**Tabla 4.14:** Coeficientes de correlación entre las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos y la rapidez del viento observado en Salina Cruz, considerando: el conjunto de todos los vientos (**Rap V**); los vientos del abanico norte o del abanico sur (**Ab. Norte, Ab. Sur**), y los valores de las componentes **u** y **v**.

$\Delta P_{SC-C}$ vs/	Rap. V	Ab. Norte	Ab. Sur	u	v
<b>Coefficiente de correlación</b>	-0.60	-0.75	0.33	0.05	0.82

Estos valores de los coeficientes son similares a los obtenidos en la sección anterior con los datos de presión del NCDC, mostrando una correlación alta y negativa para la componente **v** y una correlación prácticamente nula con la componente **u**. Asimismo, reflejan claramente las tendencias observadas en las Figuras 4.39 y 4.40, es decir, una alta correlación negativa entre la rapidez de los vientos del abanico norte y las diferencias de presión entre los observatorios y una correlación positiva pero bastante baja entre la rapidez de los vientos del abanico sur y las diferencias de presión entre los observatorios.

## CAPÍTULO V

### ESTIMACIÓN DE LOS VIENTOS EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC

En este capítulo se presenta el modelo desarrollado para estimar los vientos en La Venta a partir de los datos de presión, así como los resultados obtenidos. El modelo incluye una parte probabilística que determina si el viento proviene o no del norte como función de la diferencia de presiones, y tiene un término aleatorio que reproduce la dispersión observada en los datos con respecto a la regresión lineal ajustada. Como resultado se obtienen vientos estimados que tienen una distribución bimodal, con máximos relativos similares a los observados, que permiten estudiar la variación estacional e interanual de los vientos en la región.

#### V.1 ESTIMACIÓN DEL VIENTO EN LA VENTA A PARTIR DE LOS DATOS DE PRESIÓN REGISTRADOS EN LOS OBSERVATORIOS DE SALINA CRUZ Y COATZACOALCOS

El siguiente análisis se construyó sobre la base de la alta correlación existente entre las diferencias de presión a través del Istmo de Tehuantepec y los datos de viento en La Venta (ver Seccs. IV.5.2 y IV.5.3). Sin embargo, como la serie de datos de viento en La Venta y la de diferencias de presión calculadas con los datos del NCDC tienen registros simultáneos en un intervalo de tiempo muy corto, de enero a abril de 1994, no podemos obtener información acerca de la variabilidad del viento en las escalas estacional e interanual. Si bien en primera aproximación estas escalas no influyen en los valores de la correlación, pues el balance dominante de los vientos es con las diferencias de presión, otros factores o variables sí pueden influir y podrían reflejarse en el comportamiento estadístico de los valores de la correlación y de la regresión lineal. Por lo tanto, en esta primera etapa de la estimación del viento en La Venta a partir de los datos de presión, se utilizaron los datos de presión de los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos porque tienen registros simultáneos con los datos de viento en La Venta durante un período de tiempo más largo que los del NCDC, de enero a noviembre de 1994 y de julio a diciembre de 1995.

Casi en cualquier región en donde se analice la relación entre los vientos y el campo de presión se encuentra que existe una relación lineal entre ellos; la teoría y las observaciones así lo indican. Sin embargo, las diferencias de presión a través del Istmo tienen una distribución unimodal (Figura 5.1) mientras que la rapidez del viento en La Venta tiene una distribución bimodal (ver la Figura 4.16 en la Secc. IV.4), es decir, tiene dos máximos relativos. Esto hace ilógico construir una regresión lineal simple a partir de los datos de presión para inferir los vientos en la región porque el resultado sería unimodal.

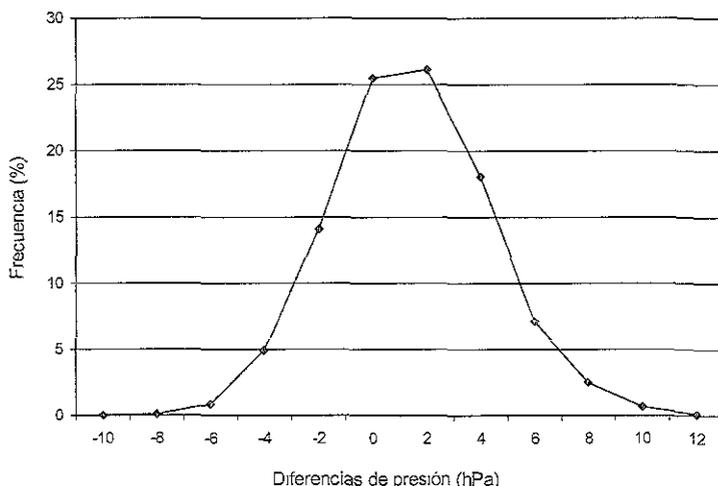
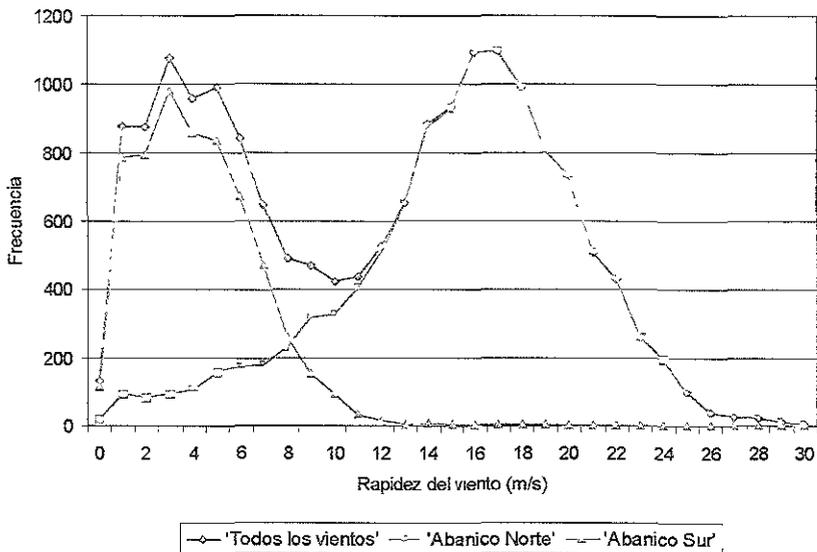


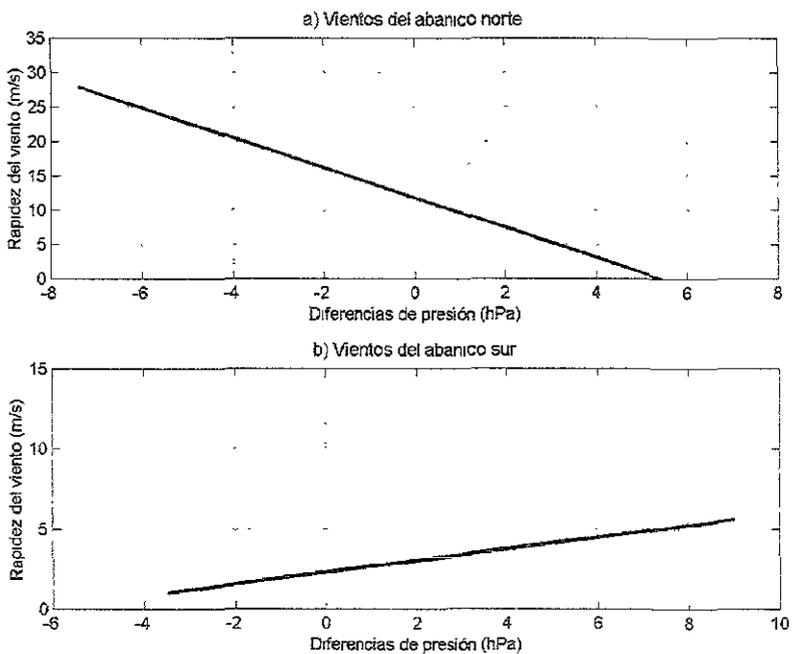
Figura 5.1: Distribución de frecuencias de las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos.

Como se explicó anteriormente, la bimodalidad en la distribución de frecuencias de la rapidez del viento en La Venta está relacionada con su dirección (Figura 5.2). Este comportamiento sugiere separar, para su estimación, a los vientos del abanico norte de los del resto de las direcciones (abanico sur).



**Figura 5.2:** Distribución de frecuencias de la rapidez del viento en La Venta para el período 1994-1995 considerando el conjunto de todos los vientos y los vientos separados en abanicos norte y sur.

Con los vientos separados en abanicos se obtuvieron los ajustes lineales con respecto a las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos ( $\Delta P_{SC-C}$ ) (Figura 5.3).



**Figura 5.3:** Ajustes lineales entre la rapidez del viento en La Venta y las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos para los vientos separados en abanicos norte y sur.

El viento estimado para cada uno de los abanicos estaría representado mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Viento estimado} = m \cdot \Delta P_{SC-C} + b \tag{5.1}$$

donde  $m$  y  $b$  son los parámetros de la recta ajustada por mínimos cuadrados (pendiente y ordenada al origen, respectivamente). Los valores de  $m$  y  $b$  para los vientos de los abanicos norte y sur se presentan en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1:** Parámetros de las rectas ajustadas por mínimos cuadrados a los datos de rapidez de los vientos del abanico norte y del abanico sur en La Venta con respecto a las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos.

Parámetro	Abanico Norte	Abanico Sur
$m$	-2.17	0.37
$b$	11.82	2.32

En este caso, logramos reproducir la forma bimodal de la distribución de los vientos; sin embargo, los vientos estimados de esta manera presentan una mayor concentración de valores alrededor de las modas. En principio esto es lo que debe suceder, pero dado que la correlación entre las diferencias de presión y la rapidez del viento no es perfecta (1 o -1), existe una desviación entre los valores estimados mediante la regresión lineal y los valores observados. Ahora bien, la diferencia entre las observaciones y la estimación lineal de los vientos tiene una estadística casi gaussiana (Figura 5.4), que puede simularse e incorporarse al modelo de la siguiente manera:

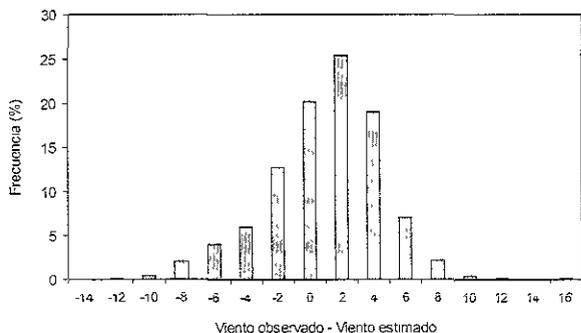
$$\text{Viento estimado} = m \cdot \Delta P_{SC-C} + b + A \tag{5.2}$$

donde  $A$  es un término aleatorio con una distribución normal con media cero y desviación estándar igual al error cuadrático medio ( $ecm$ ) entre las observaciones ( $V_{obs}$ ) y la estimación lineal ( $V_{lineal}$ ) dado por:

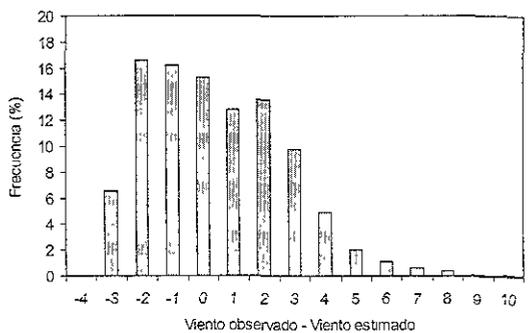
$$ecm = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{obs} - V_{lineal})^2}$$

donde  $n$  es el total de datos para cada uno de los abanicos. El valor del error cuadrático medio para los datos del abanico norte es de 3.63 m/s y para los vientos del abanico sur es de 2.05 m/s.

a) Vientos del abanico norte

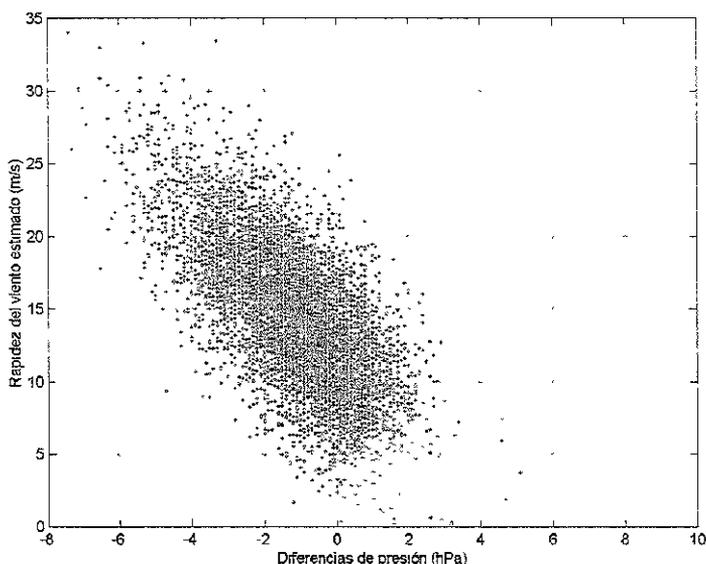


b) Vientos del abanico sur



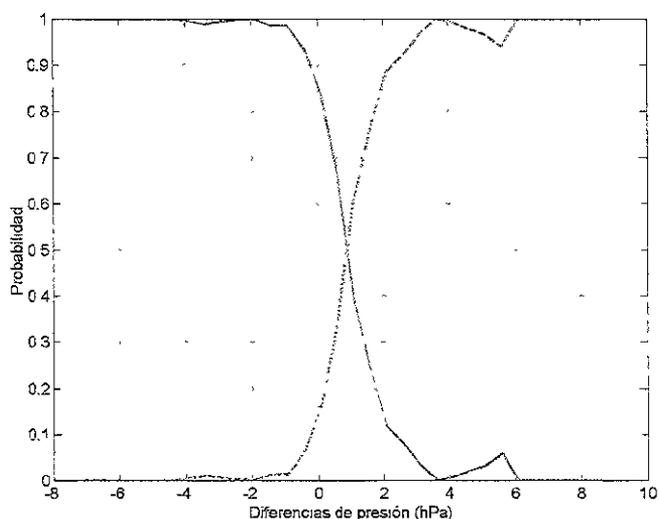
**Figura 5.4:** Distribuciones de frecuencias de las diferencias entre la rapidez del viento observado y del viento estimado para los vientos del abanico norte y del abanico sur en La Venta.

De esta manera, se generan vientos estimados a partir de las diferencias de presión que son estadísticamente similares a los observados (Figura 5.5). Debe señalarse que esta es una simulación estadística y no puntual que tiene por objeto estimar parámetros no lineales como la energía del viento.



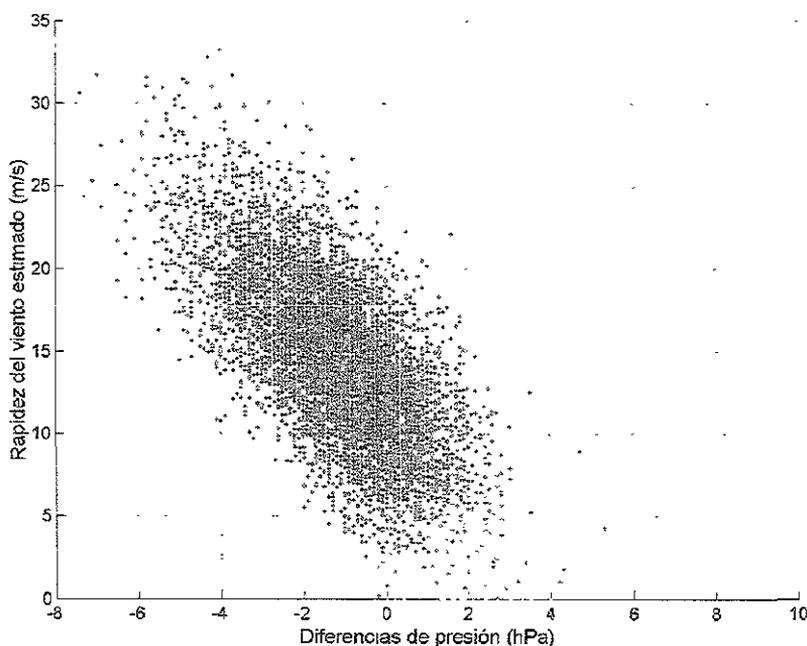
**Figura 5.5:** Rapidez del viento estimado en La Venta a partir de las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos con base en el modelo representado por la ecuación 5.2.

Sin embargo, puesto que el carácter bimodal de los vientos depende de la dirección de donde provienen, al estimarlos a partir de las diferencias de presión se debe establecer cuándo se considera que los vientos vienen del norte y cuándo del resto de las direcciones. En primera aproximación, hemos visto que cuando la diferencia de presiones es negativa, es decir, cuando la presión en Coatzacoalcos es mayor que en Salina Cruz, los vientos vienen del abanico norte y cuando es positiva vienen del resto de las direcciones. La Figura 5.6 muestra la probabilidad de ocurrencia de vientos del abanico norte (o del resto de las direcciones) como función de las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos ( $\Delta P_{SC-C}$ ).



**Figura 5.6:** Probabilidad de ocurrencia de vientos del abanico norte (línea continua) o del resto de las direcciones (línea segmentada) en La Venta como función de las diferencias de presión entre Salina Cruz y Coatzacoalcos.

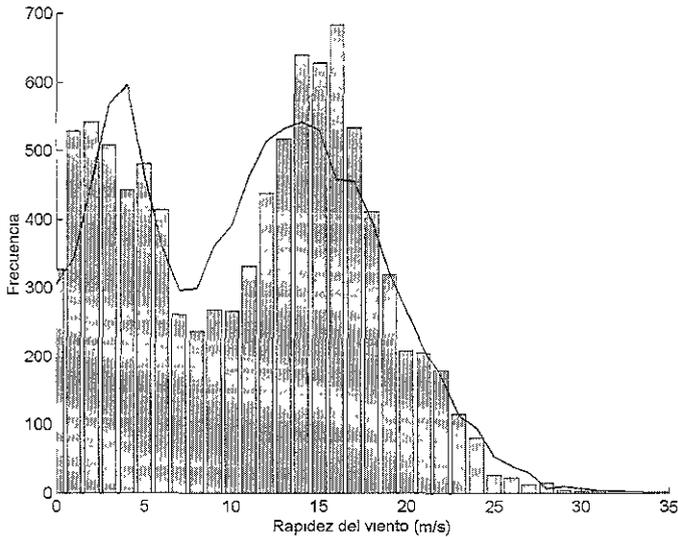
En la figura anterior se observa que, para valores de  $\Delta P_{SC-C}$  menores de  $-1.5$  hPa, el porcentaje de vientos del abanico norte es superior al 90%, mientras que para valores de  $\Delta P_{SC-C}$  mayores de 2 hPa el porcentaje de vientos del abanico norte es prácticamente nulo. Existe entonces un intervalo de valores de diferencias de presión, entre  $-1.5$  y 2 hPa, para el cual se pueden observar ambos tipos de viento. En este intervalo, el valor de la diferencia de presiones no es suficiente para determinar si el viento proviene o no del norte, ya que esto se debe a otros factores de los cuales no se tiene suficiente información y tendrían que analizarse con más cuidado. Sin embargo, sí podemos estimar el viento en forma probabilística como función de las diferencias de presión y podemos reproducirlo estadísticamente. Por lo tanto, utilizando los valores de la probabilidad de tener vientos del abanico norte dado un valor de diferencia de presiones, y utilizando el mismo modelo que se usó anteriormente al separar arbitrariamente los vientos en abanicos, obtenemos los vientos estimados que se muestran en la Figura 5.7.



**Figura 5.7:** Rapidez del viento estimado en La Venta con base en el modelo representado por la ecuación 5.2 y utilizando la probabilidad de tener vientos del abanico norte (o del resto de las direcciones) dado un valor de diferencia de presiones entre Salina Cruz y Coatzacoalcos.

En la Figura 5.8 se presenta la comparación entre las distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento observado y del viento estimado en La Venta a partir de las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos. En esta figura se observa que los vientos estimados tienen una distribución bimodal, con máximos relativos similares a los observados.

El aspecto más relevante que no se explica con el modelo propuesto es la causa que produce que el viento sea o no del norte para un cierto intervalo de valores de diferencias de presión en el cual se presentan ambos tipos de viento. Este punto es muy importante y amerita estudiarlo con mayor detenimiento, pero en buena medida rebasa la información con que se cuenta actualmente.



**Figura 5.8:** Distribuciones de frecuencias de la rapidez del viento observado (barras) y del viento estimado (línea continua) en La Venta a partir de las diferencias de presión entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos.

## V.2 CLIMATOLOGÍA DEL VIENTO EN LA VENTA

Para llevar a cabo un estudio de caracterización climatológica de cualquier parámetro en alguna región determinada, es necesario contar, por lo menos, con 30 años de información (OMM). Puesto que contamos con los datos de presión del NCDC para un período de tiempo de poco más de 30 años, en esta sección veremos de qué manera se relacionan estos datos con los datos de presión registrados en los observatorios y haremos una equivalencia entre ambas series para después estimar los vientos en La Venta durante este período de tiempo.

### V.2.1 Comparación entre los datos de presión registrados en Salina Cruz y Coatzacoalcos y los datos de presión del NCDC

Como se explicó anteriormente, los datos de presión del NCDC están definidos en los vértices de una malla uniforme cada cinco grados de latitud y longitud y no hay puntos que coincidan exactamente con la localización de los observatorios. Tales datos se obtuvieron a partir de los valores medidos en los observatorios y de los reportados por otras estaciones meteorológicas y por barcos de ocasión, y suponemos que fueron sometidos a un proceso de control de calidad. Esto hace que los campos de presión generados a partir de estos datos sean suaves, es decir, los valores extremos son suavizados y con ellos no podemos apreciar las variaciones de mesoescala. Por esta razón, y como medida de control de calidad, es importante comparar el comportamiento de esos datos con series de mediciones puntuales.

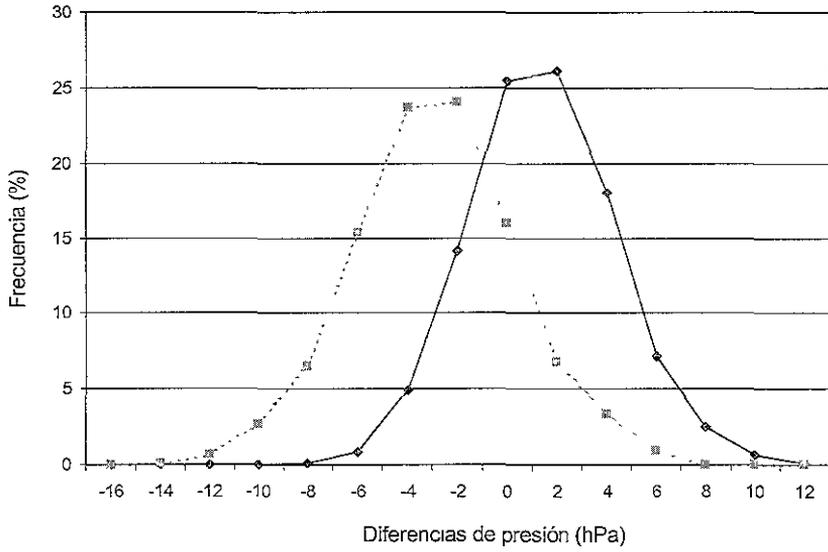
Para ello, se calcularon los coeficientes de correlación entre las presiones medidas en Coatzacoalcos y en Salina Cruz a las 0 Z y 12 Z, y los valores de presión promediados en 12 horas (6 horas antes y 6 horas después de las 0 Z y 12 Z), con los valores de presión del NCDC en los vértices correspondientes de la malla, es decir,  $P_{GT}$  y  $P_{GM}$  (ver la Figura 2.2 del Capítulo II). Asimismo, se calcularon los coeficientes de correlación entre  $\Delta P_{NCDC}$  y los valores de  $\Delta P_{SC-C}$  a las 0 Z y 12 Z y con los valores promedio de 12 horas. Cabe señalar que las series de datos  $\Delta P_{NCDC}$  y  $\Delta P_{SC-C}$  tienen registros simultáneos a las 0 Z y 12 Z en un total de 3,761 ocasiones en los períodos de octubre de 1983 a diciembre de 1988 y de enero a abril de 1994. En la Tabla 5.2 se presentan los valores obtenidos para los coeficientes de correlación.

**Tabla 5.2:** Coeficientes de correlación entre los valores de la presión observada en los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos y los valores de la presión registrados en los vértices  $P_{GT}$  y  $P_{GM}$  del NCDC, y entre los conjuntos de diferencias de presión  $\Delta P_{NCDC}$  y  $\Delta P_{SC-C}$ .

Presión en Salina Cruz vs presión en el vértice $P_{GT}$ (15° N y 95° W)		Presión en Coatzacoalcos vs presión en el vértice $P_{GM}$ (20° N y 95° W)		$\Delta P_{NCDC}$ vs $\Delta P_{SC-C}$	
Hora Z	Promedio 12 hrs.	Hora Z	Promedio 12 hrs.	Hora Z	Promedio 12 hrs.
0.72	0.74	0.94	0.94	0.84	0.85

Estos valores de los coeficientes de correlación nos muestran que existe una alta correspondencia entre los valores de presión medidos en Coatzacoalcos y los correspondientes al vértice  $P_{GM}$ , y un poco menos significativa es la correspondencia entre los valores de la presión medidos en Salina Cruz y los correspondientes al vértice  $P_{GT}$ .

Aunque la correlación entre ambos conjuntos de diferencias de presión es alta, las distribuciones de frecuencias para  $\Delta P_{NCDC}$  y  $\Delta P_{SC-C}$  están desfasadas (Figura 5.9). Entonces, con el objeto de tener una serie larga de datos para estimar los vientos en el período mencionado, se transformaron los valores de  $\Delta P_{NCDC}$  en valores de presión equivalentes para  $\Delta P_{SC-C}$ .



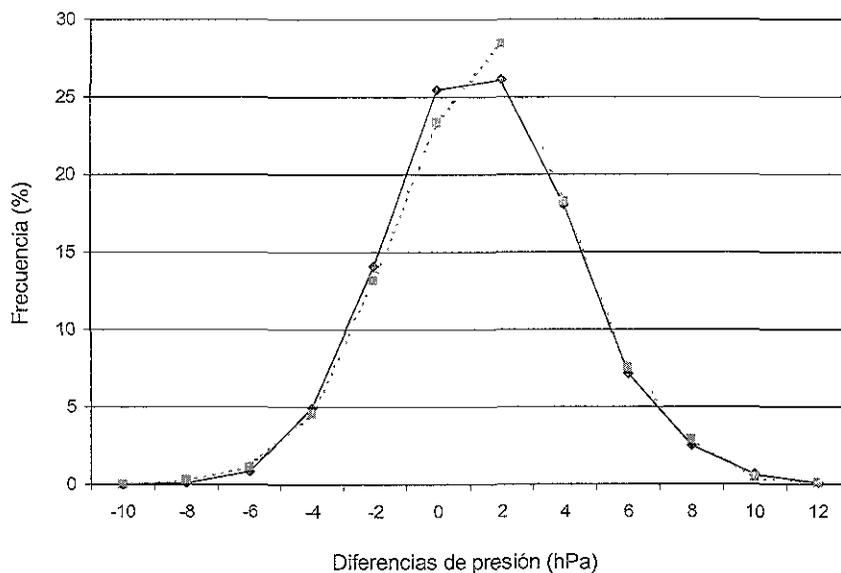
**Figura 5.9:** Distribución de frecuencias para  $\Delta P_{NCDC}$  (línea segmentada) y  $\Delta P_{SC-C}$  (línea continua).

Para llevar a cabo la transformación, fue necesario hacer un ajuste que consistió en exigir que las diferencias de presión estimadas para los observatorios a partir de los datos del NCDC ( $\Delta \hat{P}_{SC-C}$ ) tuvieran una estadística igual (media y varianza) a la del conjunto original ( $\Delta P_{SC-C}$ ) mediante una transformación de escala para una distribución normal [Berenson y Levine, 1989], determinada por la ecuación:

$$\Delta \hat{P}_{SC-C}(i) = \frac{\Delta P_{NCDC}(i) - \overline{\Delta P_{NCDC}}}{\sigma_{NCDC}} \cdot \sigma_{SC-C} + \overline{\Delta P_{SC-C}}$$

en donde la barra superior indica el valor promedio y  $\sigma$  la desviación estándar del conjunto de datos de presión correspondiente indicado mediante subíndices.

En la Figura 5.10 se presenta la gráfica que compara la distribución de frecuencias de las diferencias de presión observadas entre Salina Cruz y Coatzacoalcos y la obtenida a partir de los datos del NCDC para el período en el que hay simultaneidad de registros. Dada la gran similitud entre ambas distribuciones de frecuencias, se obtuvieron las diferencias de presión ajustadas para los observatorios a partir de los datos del NCDC para el período de 1964 a 1994 con el objeto de obtener una climatología del viento en La Venta en dicho período.

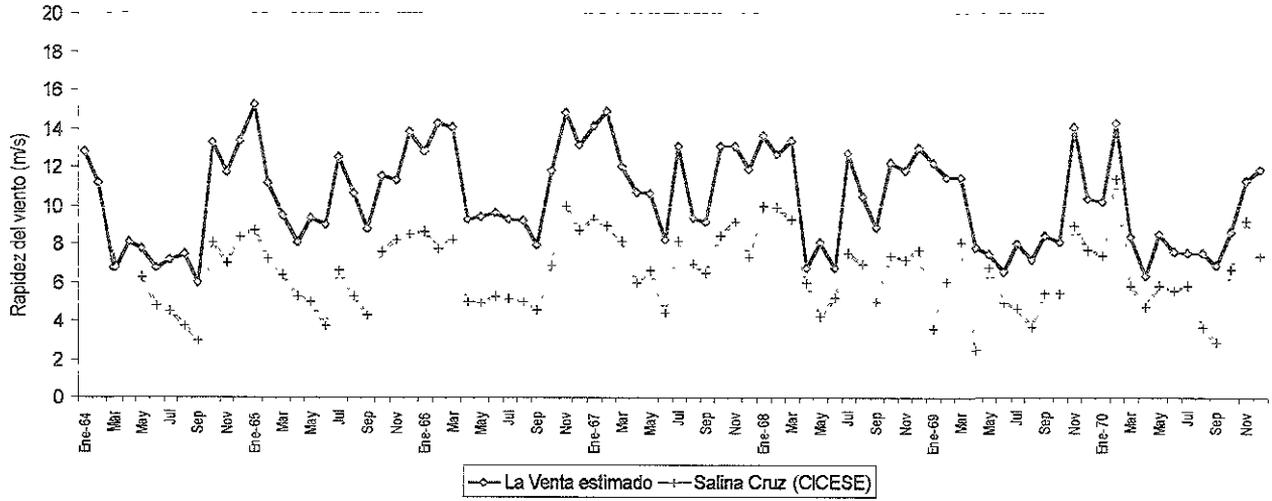


**Figura 5.10:** Comparación entre la distribución de frecuencias de las diferencias de presión observadas entre Salina Cruz y Coatzacoalcos (línea continua) y la distribución de frecuencias obtenida a partir de los datos del NCDC (línea segmentada), para el período de octubre de 1983 a diciembre de 1988 y de enero a abril de 1994.

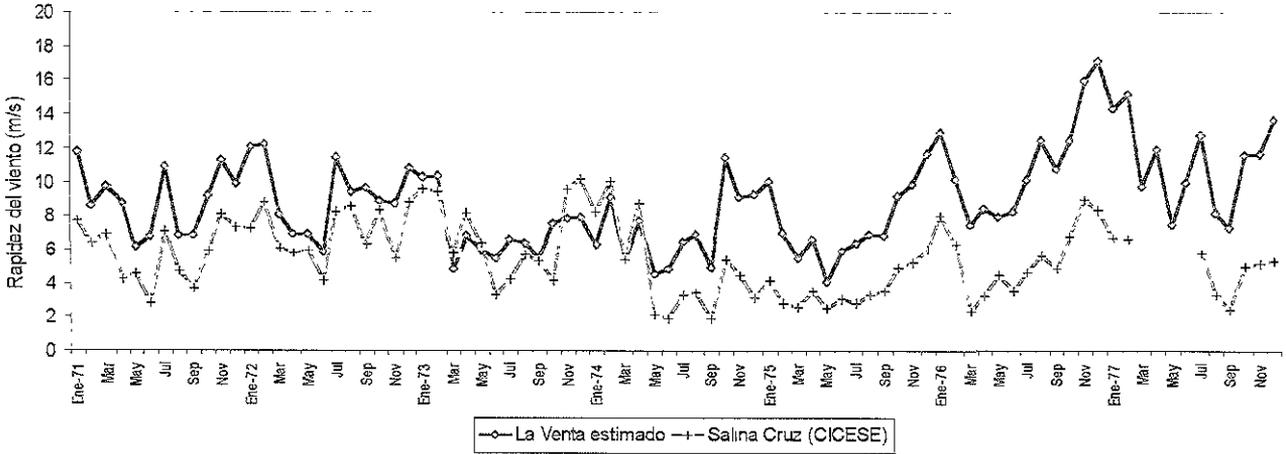
### V.2.2 Vientos estimados en La Venta para el período de 1964 a 1995

Utilizando los valores de presión ajustados para los observatorios a partir de los datos del NCDC para el período de enero de 1964 a abril de 1994, y utilizando las diferencias de presión observadas entre Salina Cruz y Coatzacoalcos para los períodos de enero a noviembre de 1994 y de julio a diciembre de 1995, se estimaron los valores de rapidez del viento en La Venta para estos años. En la Figura 5.11 se presentan los promedios mensuales de la rapidez del viento estimado en La Venta junto con las series de observaciones en La Venta y en Salina Cruz.

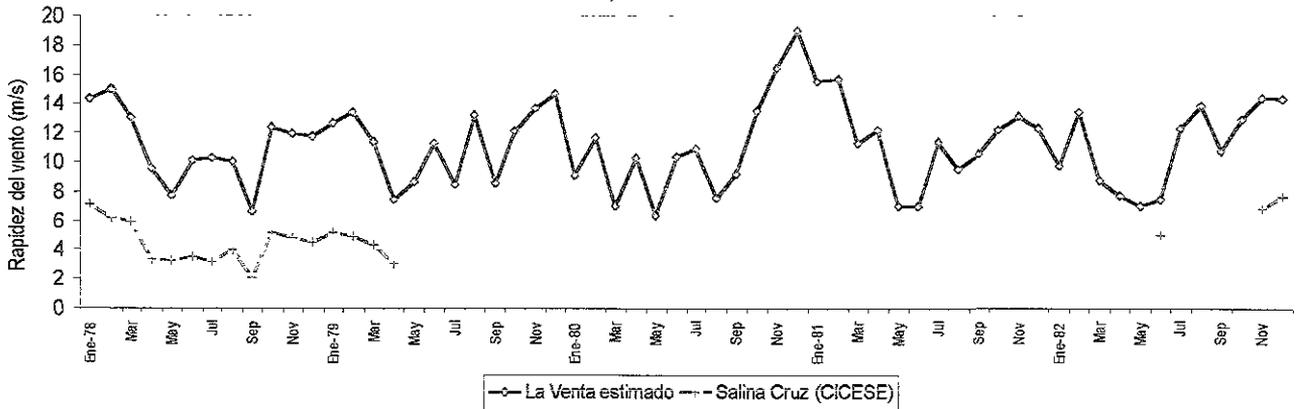
a) 1964-1970



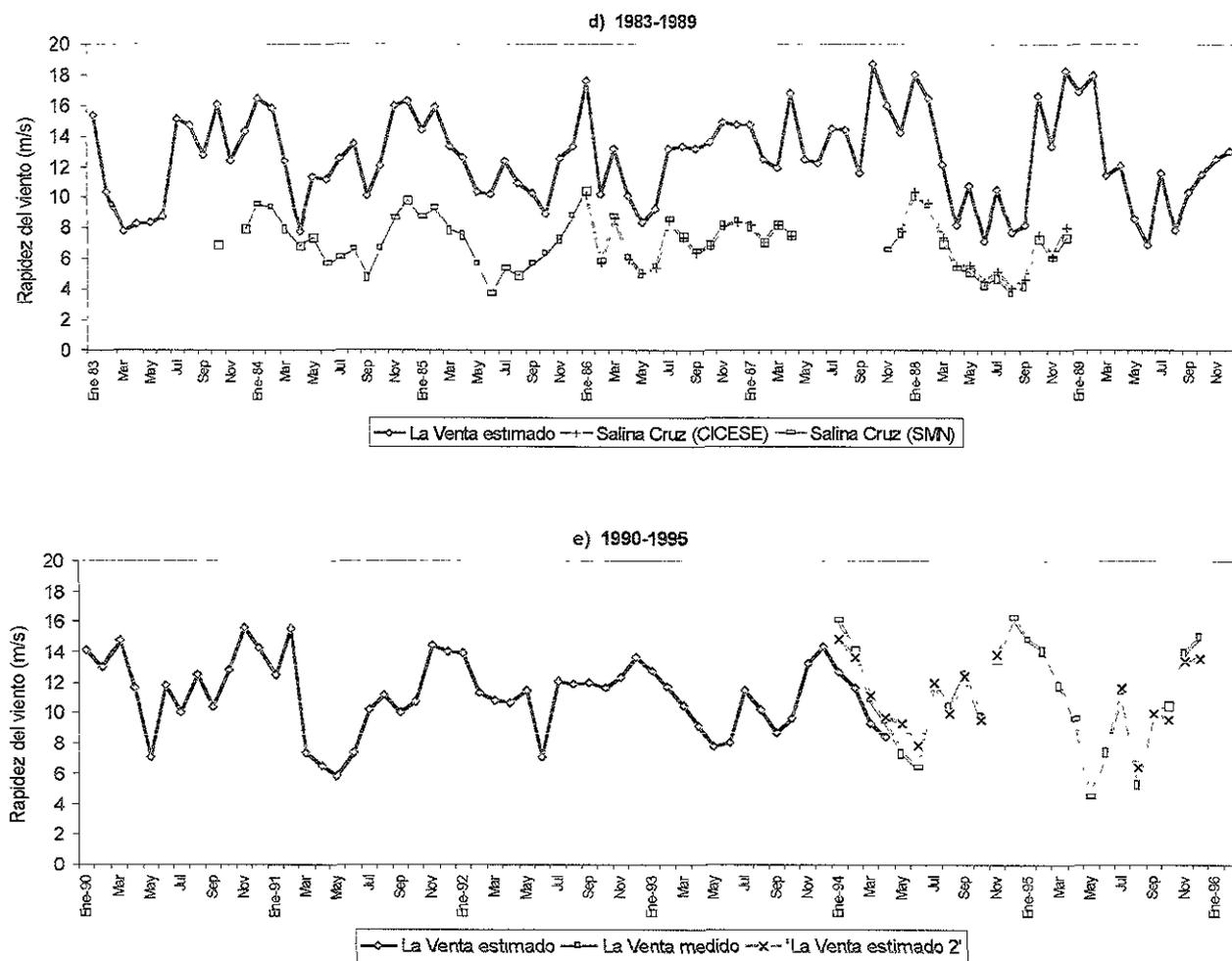
b) 1971-1977



c) 1978-1982



ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



**Figura 5.11:** Promedios mensuales de la rapidez del viento observado y estimado en La Venta y promedios mensuales de la rapidez del viento observado en Salina Cruz durante: a) 1964-1970, b) 1971-1977, c) 1978-1982, d) 1983-1989 y e) 1990-1995 (Nota: 'La Venta estimado 2' corresponde a la rapidez del viento estimado en La Venta a partir de las diferencias de presión observadas entre los observatorios de Salina Cruz y Coatzacoalcos).

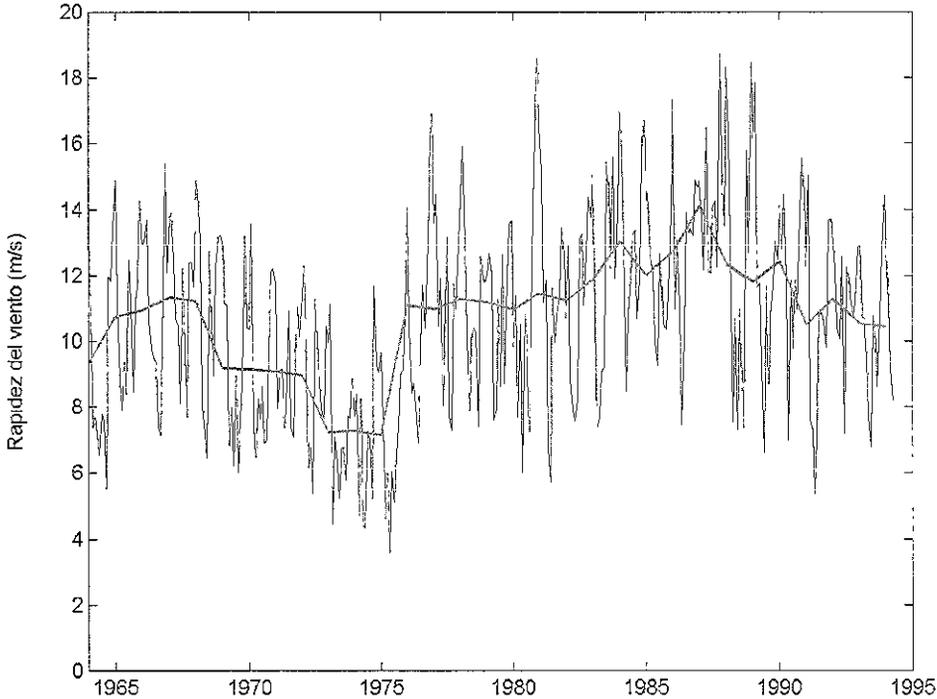
En esta gráfica podemos observar una gran correspondencia en la magnitud de las variaciones de la rapidez del viento, así como en las tendencias observadas a escala mensual e interanual, tomando en cuenta que el viento en La Venta fue medido a 26.5 metros sobre la superficie y en Salina Cruz a 10 metros. Sin embargo, se observa que durante los años de 1972 hasta mediados de 1974 el modelo estimó valores muy bajos para la rapidez del viento en La Venta, lo cual se debe a posibles errores en los datos de presión del NCDC. Asimismo, podemos observar que los promedios mensuales de rapidez del viento en La Venta estimados a partir de las diferencias de presión observadas entre Salina Cruz y Coatzacoalcos son muy similares a los calculados con las observaciones, lo cual demuestra la confiabilidad del modelo. En la Tabla 5.3 se presentan los valores de los coeficientes de correlación entre los promedios mensuales de la rapidez del viento estimado en La Venta y las series de observaciones en La Venta y Salina Cruz.

**Tabla 5.3:** Coeficientes de correlación entre la rapidez del viento estimado en La Venta para el período 1964-1995 y la rapidez de los vientos observados en Salina Cruz y La Venta.

Salina Cruz (CICESE: May 1964-Dic 1978, Ene 1986-Dic 1988)	Salina Cruz (SMN: Dic 1983-Dic 1988)	La Venta (Ene-Abr 1994)	La Venta (Ene-Nov 1994, Jul-Dic 1995)
0.69	0.80	0.99	0.99

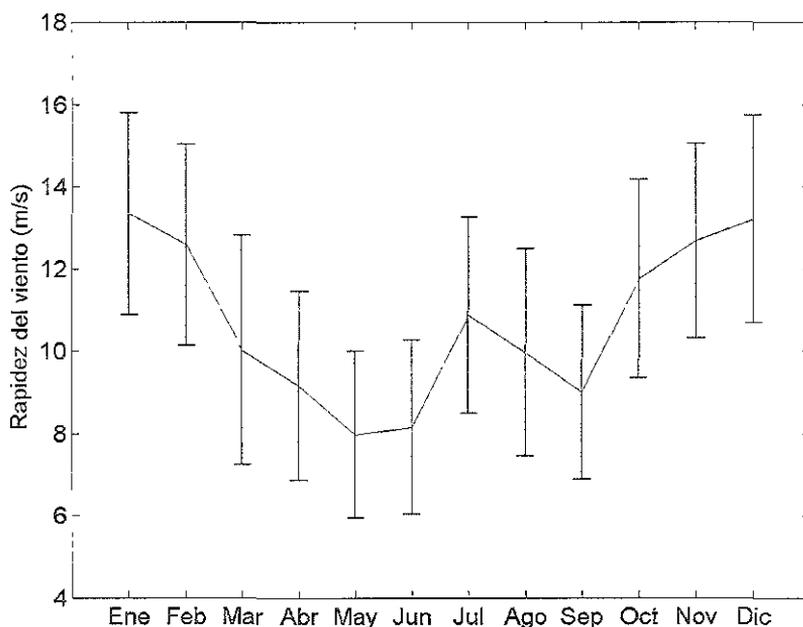
**V.2.2.1 Promedios mensuales y anuales del viento estimado en La Venta**

A partir de la serie de vientos estimados se calcularon los promedios mensuales y anuales de la rapidez del viento, los cuales se muestran en la Figura 5.12. En esta figura se observa claramente la señal estacional, con vientos más intensos en invierno y más débiles en verano. Los promedios anuales varían entre 7 m/s y 14 m/s.



**Figura 5.12:** Promedios mensuales y anuales de la rapidez del viento estimado en La Venta para el período 1964-1994.

La Figura 5.13 muestra los promedios mensuales globales de la rapidez del viento estimado para todo el período. En ella se observa que los vientos más intensos se presentan en los meses de diciembre y enero, con valores promedio de más de 13 m/s, y los más débiles en el mes de mayo, con un promedio de 8 m/s. Se observa también el máximo relativo de rapidez del viento en el verano durante el mes de julio, particularidad que se identificó en los valores observados en La Venta y Salina Cruz. Los promedios y desviaciones estándares mensuales globales se incluyen en la Tabla 5.4, junto con el promedio y la desviación estándar anual global para el período 1964-1994.



**Figura 5.13:** Promedios y desviaciones estándar mensuales globales de la rapidez del viento estimado en La Venta para el período 1964-1994.

**Tabla 5.4:** Promedios y desviaciones estándar mensuales globales y anual global para la rapidez del viento estimado en La Venta durante el período 1964-1994.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual global
<b>Promedio (m/s)</b>	13.3	12.6	10.1	9.2	8.0	8.2	10.9	10.0	9.0	11.8	12.7	13.2	10.7
<b>Desv. Estd. (m/s)</b>	2.5	2.5	2.8	2.3	2.0	2.1	2.4	2.5	2.1	2.4	2.4	2.5	2.4

### V.2.3 Variabilidad interanual

Como medida de la variabilidad interanual del viento en La Venta, se calcularon las desviaciones estándar con respecto a los promedios de rapidez mensual global (valores que se presentan en la Tabla 5.4 y en la Figura 5.13 mediante barras verticales). A diferencia de los promedios, en la desviación estándar no se encontró una señal estacional. Los valores de desviación estándar varían entre 2.0 m/s para el mes de mayo y 2.8 m/s para el mes de marzo. La alta variabilidad en el mes de marzo puede deberse a que es el mes de transición entre el invierno y el verano, y la baja variabilidad en el mes de mayo indica que es el mes más estable. La desviación estándar determina el rango en el cual se espera que se encuentre el promedio de rapidez del viento en el 66% de los casos.

#### V.2.3.1 El Niño y La Niña

Con el objeto de estudiar la posible influencia de los fenómenos conocidos como El Niño y La Niña sobre la variabilidad interanual del viento en el Istmo de Tehuantepec, se calcularon los promedios y desviaciones estándar mensuales globales para los años en los que ocurrió algún evento de El Niño o La Niña (ver el Apéndice). En la Tabla 5.5 se incluyen los años durante los cuales ocurrió alguno de estos eventos dentro del período de 1964 a 1995, y en la Tabla 5.6 se presentan los promedios mensuales y anuales globales de

rapidez del viento considerando tales años. Se considera que estos eventos se inician en el mes de octubre del año indicado y terminan en el mes de septiembre del año siguiente.

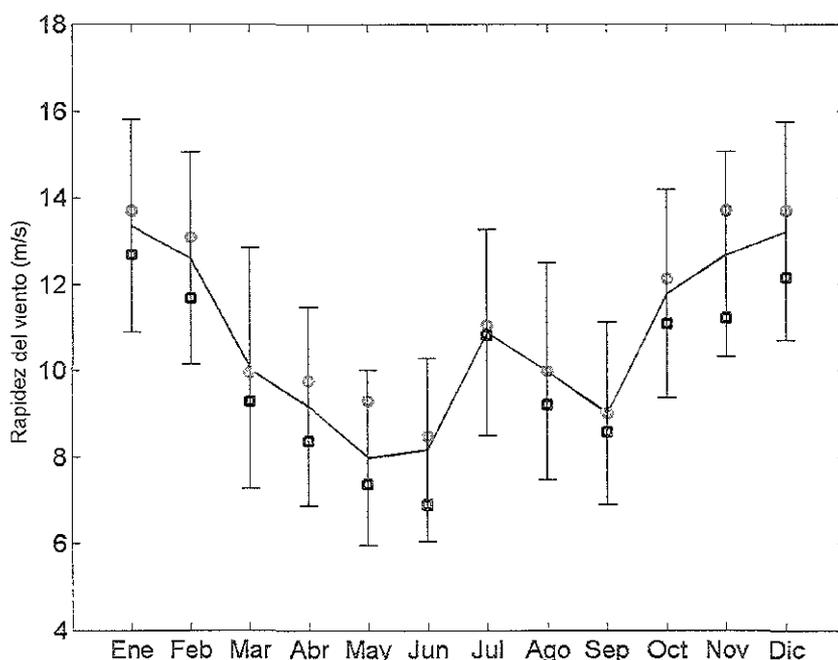
**Tabla 5.5:** Años en los cuales ocurrió un evento de El Niño o La Niña durante el período de 1964 a 1995 según el índice de la Japan Meteorological Agency.

<b>El Niño</b>	1965	1969	1972	1976	1982	1986	1987	1991
<b>La Niña</b>	1964	1967	1970	1971	1973	1975	1988	

**Tabla 5.6:** Promedios mensuales y anuales globales de rapidez del viento (m/s) en La Venta considerando los años en los que ocurrió un evento de El Niño o de La Niña.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annual
<b>El Niño</b>	13.7	13.1	9.9	9.8	9.3	8.5	11.0	10.0	9.0	12.1	13.7	13.7	11.1
<b>La Niña</b>	12.7	11.7	9.3	8.4	7.4	6.9	10.8	9.2	8.6	11.1	11.2	12.1	9.9

En la Figura 5.14 se muestra la gráfica de los promedios mensuales globales de la rapidez del viento estimado en La Venta y los promedios mensuales globales obtenidos considerando los años en los cuales ocurrió un evento de El Niño o La Niña. En la gráfica se observa que los promedios mensuales calculados con los datos de los años considerados como La Niña están por debajo de la media mensual global del periodo, explicando un 34% de la variabilidad interanual. El promedio anual global de la rapidez del viento durante los años de La Niña fue de 9.9 m/s, con una diferencia de 0.8 m/s con respecto al promedio global del período. Con respecto a los promedios mensuales de rapidez del viento calculados para los años considerados como El Niño se observa que están por encima de los promedios mensuales del período, explicando un 19% de la variabilidad interanual. Se encontró también que la influencia de El Niño y La Niña es mayor durante la fase inicial del fenómeno, es decir, de octubre a febrero.



**Figura 5.14:** Promedios mensuales globales de la rapidez del viento estimado en La Venta y promedios mensuales globales obtenidos considerando los años en los cuales ocurrió un evento de El Niño (círculos) o de La Niña (cuadrados).

El análisis de la influencia de estos fenómenos sobre el campo de viento en la región del Istmo de Tehuantepec puede hacerse con mucho más detalle, estudiando, por ejemplo, la posible influencia durante el año anterior y posterior a El Niño (o La Niña). También es posible hacer pruebas estadísticas para determinar el nivel de significancia de la influencia de estos fenómenos.

## CAPÍTULO VI

### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

#### VI.1 DISCUSIÓN

La rapidez del viento en La Venta tiene un comportamiento bimodal que no corresponde con el comportamiento unimodal de las diferencias de presión observadas entre un extremo y otro del Istmo de Tehuantepec. El primer modo corresponde a vientos relativamente débiles que provienen, en su mayoría, del sur, y el segundo corresponde a vientos relativamente intensos provenientes predominantemente del norte, es decir, que los vientos débiles del norte rara vez cruzan el corredor orográfico. En esta región son varios los factores que obstruyen el paso de los vientos del norte y que impiden que se desarrollen a pesar de que los gradientes de presión puedan ser favorables.

Entre los mecanismos que influyen sobre el comportamiento de los vientos en su recorrido a través del Istmo de Tehuantepec está la conservación de vorticidad potencial, la cual se puede expresar mediante la siguiente relación:

$$\text{Vorticidad potencial} = \frac{\zeta + f}{h} = \text{constante}$$

donde  $\zeta$  es la vorticidad relativa,  $f$  la vorticidad planetaria y  $h$  la altura de la columna de aire [Holton, 1979]. Toda columna de aire tiende a conservar la suma de su vorticidad planetaria más su vorticidad relativa y se resiste a realizar movimientos que la modifiquen.

Al moverse una columna de aire a través del Istmo sufre un desplazamiento de norte a sur que implica un cambio en su vorticidad planetaria. El desplazamiento desde el Golfo de México hasta el Golfo de Tehuantepec es del orden de dos grados, lo cual implica un cambio en la vorticidad planetaria ( $\Delta f$ ) dado por:

$$\Delta f = 2\Omega (\text{sen } 19^\circ - \text{sen } 17^\circ)$$

con  $\Omega$  la velocidad angular de la tierra. En su recorrido, la columna de aire también experimenta un cambio en su vorticidad relativa debido al cambio en el tamaño de la columna, pues al elevarse sobre una ladera adquiere una vorticidad anticiclónica y al descender por ella adquiere una vorticidad ciclónica. Aunque el Istmo es un paso relativamente bajo, su elevación, de unos 250 m sobre el nivel del mar, es considerable en términos del cambio en la vorticidad relativa de las masas de aire que pasan a través de él. En primera aproximación, si consideramos una columna de aire de 1,000 m y un corredor orográfico cuya altura máxima es de 250 m y mide de ancho 50 km, una columna de aire que conserve su vorticidad potencial al viajar desde el Golfo de México hasta la parte más alta del corredor, adquiriría una diferencia de velocidades entre los extremos oriental y occidental del corredor de aproximadamente 0.4 m/s. Si la columna de aire es más pequeña, esa diferencia aumenta.

Estas restricciones impiden el desarrollo de vientos a través del Istmo de Tehuantepec hasta que los gradientes de presión alcanzan un nivel de energía suficiente para vencerlas. En principio, el cambio en la vorticidad que sufre una masa de aire al cruzar el Istmo es fácil de estimar; sin embargo, existen varios factores que deben tomarse en cuenta y que son difíciles de controlar, como la complejidad de la topografía, la variabilidad en la altura de la capa de mezcla, la estabilidad de la columna de aire, su baroclinicidad, etc. Estas particularidades se tendrían que analizar con más cuidado para poder determinar bajo qué condiciones un viento cruza el Istmo de Tehuantepec cuando los gradientes de presión son débiles.

No sólo la conservación de vorticidad potencial afecta el desarrollo de los vientos a través del Istmo de Tehuantepec, otros factores importantes son los gradientes de presión este-oeste, la estratificación de la columna de aire y los fenómenos de menor escala, como las brisas de mar y tierra. La influencia de cada uno de estos factores puede estimarse, pero ello implica contar con más información, llevar a cabo el análisis correspondiente de los datos y desarrollar modelos analíticos y numéricos.

## VI.2 CONCLUSIONES

El análisis de los datos en el Istmo de Tehuantepec muestra que la rapidez del viento tiene una fuerte componente estacional, con vientos más intensos durante el invierno y más débiles durante el verano. Un resultado importante es el máximo relativo de rapidez del viento que se observa durante el mes de julio, que concuerda con otra manifestación climática que se ha observado en la lluvia y se le conoce como sequía interestival [Magaña et al., 1999].

La distribución de frecuencias de la rapidez del viento en La Venta es bimodal. Esta característica no es común, pues la intensidad de los vientos es función, en primera aproximación, del valor del gradiente de presión y este último, en general, no tiene una distribución bimodal. La distribución de frecuencias de las diferencias de presión entre un extremo y otro del Istmo de Tehuantepec es unimodal, lo que muestra que la bimodalidad en la curva de frecuencias de la rapidez del viento se debe a una combinación de los valores del gradiente de presión y del efecto que impone la topografía.

La bimodalidad en la curva de frecuencias de la rapidez del viento en el Istmo de Tehuantepec, particularmente en la región sur, está asociada con su dirección. Los vientos en esta región tienen la característica de poder dividirse en dos grupos: los provenientes del norte (NNW-NNE), producidos por la combinación del efecto orográfico y una mayor presión en el Golfo de México que en el Golfo de Tehuantepec, y los que provienen del resto de las direcciones, que se observan cuando la presión en el Golfo de Tehuantepec es similar o mayor que la del Golfo de México.

Los vientos del norte son, en general, más intensos que los provenientes de otras direcciones y están asociados a la entrada de sistemas de alta presión que vienen de las planicies de los Estados Unidos, formando frentes en el Golfo de México conocidos en los estados mexicanos del Golfo como “nortes”, y que son más frecuentes durante el invierno. Durante el verano los sistemas de alta presión de las planicies de los Estados Unidos se desplazan hacia el noreste, por lo que disminuye la intensidad de los gradientes de presión y los vientos en el Istmo de Tehuantepec.

Los resultados de este trabajo demuestran que el viento en el Istmo depende, en buena medida, del campo de presión y, por lo tanto, de los fenómenos de escala sinóptica (~1000 km), cuya posición, intensidad y frecuencia se ven afectados por los fenómenos de escala global como El Niño y La Niña. Esto hace que los datos de presión sean de gran utilidad para los estudios climatológicos de la región porque dependen mucho menos de las características regionales de pequeña escala que los datos de viento.

Con base en la alta correlación que existe entre los vientos en La Venta y las diferencias de presión entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec, se construyó un modelo estadístico que relaciona ambas variables para simular los vientos en la región en el período de 1964 a 1995. El modelo se basa en la probabilidad de tener vientos del norte como función de las diferencias de presión y, una vez definida la dirección del viento, se ajusta una relación lineal entre la magnitud del viento y las diferencias de presión. Como la relación lineal no es perfecta, ya que la correlación no es perfecta, para estimar la dispersión se agregó un término aleatorio a la función, que tiene por objeto reproducir adecuadamente la distribución observada de la rapidez del viento. El modelo reproduce la distribución bimodal de velocidades característica de los vientos en La Venta, lo cual es fundamental para la estimación de variables no lineales como la energía, que es una función no lineal de la rapidez del viento y no basta con conocer el viento promedio para estimarla correctamente.

Con relación a la variación interanual se encontró que durante los años afectados por el fenómeno de La Niña, los vientos son menos intensos con respecto al viento promedio en la región del Istmo de Tehuantepec, mientras que los promedios mensuales de rapidez del viento durante los años afectados por el fenómeno de El Niño están, en general, por encima del viento promedio. Se encontró también que la influencia de El Niño y La Niña es mayor durante la fase inicial del fenómeno, es decir, de octubre a febrero. Estos resultados son de gran importancia por las implicaciones que tienen en la agricultura, la pesca y el pronóstico del clima y, en particular, para la estimación de la energía que se puede obtener del viento.

## BIBLIOGRAFÍA

- AWEA (1986): *Standard procedures for meteorological measurements at a potential wind turbine site*. AWEA Standard 8.1 - 1986.
- Aleman, P.A.M. and E. Garcia (1974): *The Climate of Mexico*. Climates of North America, World Survey of Climatology, Vol. II, Elsevier Sc. pp. 245-404.
- Berenson, M.L. y D.M. Levine (1982): *Estadística para Administración y Economía*. Editorial Interamericana.
- Berry, Bolay and Beers (1973): *Handbook of Meteorology*. Mc Graw Hill.
- Bourassa, M.L., L. Zamudio and J. O'Brien (1999): *Noninertial flow in NSCAT observations of Tehuantepec winds*. Journal of Geophys. Res. Vol. 104, No. C5, pp. 11311-11319.
- Bracken, W.E. et al. (s/f): *Synoptic and mesoscale aspects of the Tehuantepecer associated with Superstorm '93*. 14th Conference on WAF. Am. Met. Soc. pp. 56-61.
- Clarke, A.J. (1988): *Inertial wind path and sea surface temperature patterns near the Gulf of Tehuantepec and Gulf of Papagayo*. Jour. Geophys. Res. Vol. 93, No. C12.
- Corotis, R.B., et al., (1977): *Variance analysis of wind characteristics for energy conversion*. Journal of Applied Meteorology, 16, 1149-1157.
- DiMego, G.J. et al. (1976): *An examination of the frequency and mean conditions surrounding frontal incursions into the Gulf of Mexico and Caribbean Sea*. Monthly Weather Rev., 104.
- Elliot, D.L. (1979): *Meteorological and topographical indicators of wind energy for regional assessments*. Proceedings of the Conference on Wind Characteristics and Wind Energy Siting. Am. Met. Soc. pp. 273-283.
- Elliot, D.L. et al. (1987): *Wind energy resource assessment of the Caribbean and Central America*. Estudio preparado por el Departamento de Energía de los E.U.A.
- Hennessey, J.P. Jr. (1977): *Some aspects of wind power statistics*. Journal of Applied Meteorology, 16, pp. 119-128.
- Hill, J.B. (1969): *Temperature variability and synoptic cold fronts in the winter climate of Mexico*. Climatol. Research Series # 4.
- Holton, J.R. (1979): *An Introduction to Dynamic Meteorology*. International Geophysics Series. Vol. 23. Academic Press, 1979.
- Hurd, W.E. (1929): *Northers of the Gulf of Tehuantepec*. Monthly Weather Rev., Vol. 57, No. 5.

- Justus, C.G., y Amir Mikhail. (1976): *Height variation of wind speed and wind distribution statistics*. Geophysical Res. Lett., 3, pp. 261-264.
- Justus, C.G. et al. (1976): *Reference wind speed distributions and height profiles for wind turbine design and performance evaluation applications*. ERDA ORO/5108-76/4, National Technical Information Service, Springfield, Virginia.
- Justus, C.G. et al. (1978): *Methods for estimating wind speed frequency distributions*. Journal of Applied Meteorology, Vol. 17: 350-353.
- Justus, C.G., K. Mani, and A. Mikhail. (1979): *Interannual and month to month variations of wind speed*. Journal of Applied Meteorology, 18, 913-920.
- Kennedy, J. y A. Neville (1982): *Estadística para Ciencias e Ingeniería*. Ed. Harla. 2da. Ed. México.
- Lavín, M.F. et al. (1992): *Física del Golfo de Tehuantepec*. Revista Ciencia y Desarrollo. Marzo/Abril, Vol. XVIII, No. 103, 97-108.
- Magaña, V., J. Amador, S. Medina (1999): *The midsummer drought over Mexico and Central America*. Journal of Climate. Vol. 12, 1577-1588.
- McCreary, J.P. et al. (1989): *The response of the coastal ocean to strong offshore winds: With application to circulation to the Gulf of Tehuantepec and Papagayo*. Journal of Marine Res., Vol. 47, pp. 81-109
- Parmenter, F.C. (1970): *Picture of the Month: A "Tehuantepecer"*. Monthly Weather Rev., 98, 6.
- Ramírez, I., F. Grivel y S. Ramos (1990): *Nivel del mar, presión atmosférica y viento superficial en Salina Cruz, Oax. (1952-1989): Informe de Datos*. Informe Técnico CICESE-CIOFID9001.
- Roden, G.Y. (1961): *On the wind driven circulation in the Gulf of Tehuantepec and its effect upon surface temperatures*. Geofísica Internacional, 1, pp. 55-76.
- Rohatgi S. y V. Nelson (1994): *Wind characteristics. An analysis for the generation of wind power*. Alternative Energy Institute West Texas A&M University.
- Ryan, B.C. (1977): *A mathematical model for diagnosis and prediction of surface winds in mountainous terrain*. Journal of Applied Meteorology, 16, 571-584.
- Schultz, D.M. et al. (1996): *Planetary- and synoptic- scale signatures associated with Central American cold surges*. Submitted to Monthly Weather Rev.
- Trasviña, A. et al. (1995): *Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: the asymmetric circulation*. Journal of Geophysical Res., Vol. 100, No. C10.

## APÉNDICE

### FUNDAMENTO FÍSICO DE LA PRODUCCIÓN DE VIENTO

El viento sopla debido al calentamiento diferencial de la superficie terrestre por los rayos solares. La energía que recibe la Tierra es alrededor de  $1.39 \text{ kW/m}^2$ , que es el valor de la constante solar. Los gases de la atmósfera son prácticamente transparentes a la radiación solar de onda corta, por lo que la mayor parte de la energía del sol penetra hasta la superficie y sólo una pequeña porción de esta energía es dispersada por partículas de polvo o por las nubes. Poco menos de la mitad de esta energía es absorbida por la superficie terrestre. Parte de esta energía se conserva como calor sensible calentando el terreno y el aire, otra parte se invierte en evaporar el agua y otra es utilizada por las plantas en sus procesos fotoquímicos. La Tierra, a su vez, emite energía como radiación de onda larga, que varía de un lugar a otro dependiendo del tipo de superficie. A la relación entre la energía reflejada o dispersada por la superficie y el flujo de energía incidente es conocida como albedo. En general las superficies de tierra y agua tienen un albedo pequeño, lo cual resulta en una elevada absorción de energía solar, en contraste con la baja absorción de las superficies nevadas cuyo albedo es elevado.

El calor absorbido por la superficie terrestre se transmite también a la atmósfera por conducción y convección. La transferencia de calor por conducción está confinada a una capa muy delgada del aire, generalmente no mayor de unos milímetros de espesor. Arriba de esta capa en contacto con la superficie, el efecto de conducción se vuelve despreciable y domina el efecto de convección, el cual produce los intercambios verticales de masas de aire. La convección puede realizarse libremente, como en el caso de una burbuja caliente de aire que asciende gracias a la diferencia en las densidades del aire de la burbuja y de los alrededores. También es posible la convección forzada por las irregularidades del terreno. La convección se da, en general, como una combinación de ambos procesos, lo cual da como resultado el movimiento de masas discretas de aire y remolinos de varios tamaños.

Los movimientos del aire en la atmósfera varían desde los movimientos al azar de las moléculas individuales, hasta la circulación zonal media que involucra a toda la atmósfera. En meteorología, estos movimientos atmosféricos se agrupan en tres escalas espaciales: microescala, mesoescala y escala sinóptica. Esta última incluye fenómenos cuyas dimensiones exceden los 500 kilómetros y escalas de tiempo de 2 días o más; la microescala incluye fenómenos con tamaño menor de 20 kilómetros y duración menor a una hora, y la mesoescala incluye fenómenos con tamaño y duración intermedios a las dos anteriores. En la Tabla A.1 se resumen las características espacio-temporales de los movimientos de la atmósfera y se dan ejemplos de estos para cada una de las escalas definidas anteriormente.

**Tabla A.1:** Escalas espacial y temporal de los movimientos de la atmósfera.

Nombre	Tiempo	Tamaño (km)	Ejemplos
Circulación general	Semanas a años	1000 a 40,000	Vientos alisios, corriente de chorro
Escala sinóptica	Días a semanas	100 a 5,000	Ciclones, anticiclones, huracanes
Mesoescala	Minutos a días	1 a 100	Tornados, tormentas, brisas de mar y tierra
Microescala	Segundos a minutos	<1	Turbulencia, rachas de viento, remolinos

## FUERZAS QUE CONFIGURAN EL COMPORTAMIENTO DEL VIENTO

**Fuerzas del gradiente de presión** - Las fuerzas del gradiente de presión en la horizontal y en la vertical mantienen el aire en movimiento, siendo el gradiente horizontal la principal causa del viento, ya que el gradiente de presión vertical es, en general, contrarrestado por la gravedad que actúa sobre la columna vertical de aire. En ausencia de otras fuerzas, el gradiente de presión horizontal forzaría a las partículas de aire a moverse hacia la zona de menor presión hasta eliminar el gradiente de presión.

**Fuerza de Coriolis** - Esta fuerza se manifiesta sobre una masa de aire en movimiento de manera que es desviada hacia la derecha. La intensidad de la fuerza es proporcional a la rapidez del viento y a la latitud, de manera que en el ecuador la fuerza de Coriolis es cero y en los polos es máxima.

**Viento geostrófico** - En virtud de las dos fuerzas comentadas anteriormente, cuando existe un gradiente de presión fuera del ecuador, el viento generado se moverá en trayectorias curvadas. Una parcela de aire en presencia de una fuerza del gradiente de presión, iniciará su movimiento a lo largo de una perpendicular a las isobaras. En la medida en que el viento cobra velocidad, la fuerza de Coriolis lo desvía hacia la derecha de su trayectoria hasta que el aire se mueve paralelo a las isobaras y a una velocidad constante. El movimiento del aire en este momento se denomina viento geostrófico. El viento geostrófico no es una buena aproximación al viento real en las capas bajas y turbulentas de la atmósfera y en los trópicos.

**Viento gradiente** - El viento gradiente es un flujo horizontal sin fricción paralelo a las isobaras. El viento gradiente involucra un balance entre tres fuerzas: la fuerza de Coriolis, la fuerza centrífuga y la fuerza del gradiente de presión horizontal [Holton, 1979]. El viento gradiente es controlado por las diferencias horizontales de presión a escala sinóptica. Ocurre a suficiente altura sobre la superficie para que la rugosidad de ésta no lo afecte, típicamente por arriba de los 250 metros por encima del nivel medio del mar, 300 metros sobre tierra cultivada, 400 metros sobre un bosque o suburbio y 500 metros sobre una ciudad. El viento gradiente controla al viento en superficie si se cumplen dos condiciones: a) las isobaras están cercanas en la carta sinóptica normal de manera que el viento gradiente es intenso, y b) existe una mezcla vertical adecuada de la atmósfera baja, ya sea por convección térmica o por turbulencia, para unir al viento gradiente con los niveles más bajos de la atmósfera. Es más probable una buena conexión durante el día cuando el calentamiento del suelo por el sol estimula la convección térmica. Está ausente sobre superficies terrestres en la noche, cuando puede haber una inversión en los primeros 200 metros de la atmósfera desacoplando el aire superficial del viento gradiente. Una separación similar del viento gradiente resulta en otras capas de inversión de nivel bajo, como las que ocurren encima de una brisa marina o encima del flujo cuesta abajo de un viento catabático [Linacre, 1992].

**Efecto de la fricción en el perfil vertical del viento** - La superficie terrestre ejerce una fuerza contraria al movimiento del aire cuyo efecto es el de retardar el flujo. Esta fuerza disminuye con la altura sobre el terreno y se vuelve despreciable a partir de cierta altura: la capa límite, en donde se establece un balance en los vientos y el viento fluye con el gradiente de velocidad del viento a lo largo de las isobaras. La atmósfera arriba de la capa límite se denomina la atmósfera libre. El desequilibrio de fuerzas producido en el viento por la fricción del terreno ejercerá una desviación ligera del flujo hacia el centro de baja presión, disminuyendo el efecto conforme aumenta la altura sobre el terreno de acuerdo con la espiral de Ekman [IGS, 1992].

El viento dentro de la capa límite planetaria, especialmente dentro de los primeros 100 metros de altura, es importante para el diseño de turbinas eólicas y otro tipo de estructuras. Por lo tanto, es importante entender el perfil vertical o cizalladura del viento en la capa superficial.

Existen relaciones analíticas para representar y proyectar las variaciones en la altura tanto del viento instantáneo como de los parámetros de la distribución de probabilidades de la rapidez del viento.

**Perfil de la ley de potencia** - La ley de potencia es un modelo simple del perfil vertical del viento. La forma general es:

$$V_2 / V_1 = (Z_2 / Z_1)^n$$

donde el exponente  $n$  se asocia algunas veces con las condiciones del terreno y otras con la inestabilidad atmosférica. Justus (1976) ha encontrado una buena consistencia entre los perfiles de rapidez del viento y las variaciones con la altura de la distribución de probabilidades de Weibull, haciendo que el exponente  $n$  varíe como  $n = a + b \cdot \ln(V_1)$ , con  $a$  y  $b$  constantes que dependen de la altura de referencia donde se mide  $V_1$ . Para una altura de referencia de 10 metros sobre el suelo, se tiene que con  $a = 0.37$ ,  $b = -0.0881$  y  $V_1$  en metros por segundo se reproducen adecuadamente las variaciones de la rapidez del viento y de la distribución de Weibull.

La rapidez del viento sobre una superficie plana y homogénea se estima mediante el perfil-log o por la ley de potencia. Se ha supuesto que la rapidez del viento en contacto con la superficie terrestre sea prácticamente cero y se incrementa con la altitud dentro de la capa límite planetaria; encima de esta capa, el aire se comporta como un fluido ideal. Sin embargo, en un sentido estricto la superficie terrestre no es plana y homogénea, por lo tanto, es razonable esperar que cualquier irregularidad de la superficie modificará el flujo del viento.

**Ecuación del perfil logarítmico** - Esta ecuación es usada comúnmente para estimar la rapidez del viento en otro nivel a partir de una altura de referencia. Por lo tanto, escribiendo dos expresiones para perfiles-log, uno para la altura de referencia  $Z_1$  y otro para una altura desconocida  $Z_2$ , podemos calcular la rapidez del viento en esta altura con:

$$V_2 = V_1 \cdot \ln(Z_2/Z_0) / \ln(Z_1/Z_0)$$

donde  $Z_0$  es la longitud de rugosidad del terreno.

## CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA

Los sistemas meteorológicos varían también desde la escala planetaria (ciclones extratropicales de gran escala, depresiones o bajas y ciclones tropicales) a la mesoescala (nubes cumulonimbus) y microescala (celdas convectivas y turbulencia). Los ciclones extratropicales y la inestabilidad turbulenta de los movimientos de pequeña escala son importantes fuentes de energía.

**Vientos alisios** - La profundidad promedio del flujo primario de los vientos alisios en el Caribe oriental es de aproximadamente 1500 a 2000 m (variando estacionalmente), con vientos máximos generalmente entre los 500 y 1500 m.

**El Niño y la Niña** - Durante la última década se han realizados grandes progresos en la comprensión del mecanismo y de las manifestaciones globales del estado del tiempo y de algunas anomalías climáticas asociadas con el fenómeno denominado El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). El fenómeno ENSO constituye la causa primaria de la variabilidad climática interanual a escala global en varias partes del planeta y consiste en un proceso de acoplamiento entre el océano y la atmósfera que evoluciona lentamente y que se manifiesta mediante una oscilación de la presión atmosférica a través del Pacífico Ecuatorial y una anomalía en las condiciones oceanográficas y atmosféricas a lo largo de las costas de Ecuador y Perú. Se han encontrado y documentado diversas anomalías climáticas asociadas con el fenómeno ENSO en todo el mundo, como la irregularidad en el ciclo del monzón hindú y las lluvias extremas registradas en ciertas zonas áridas de las costas de Perú. La fase complementaria del ENSO se denomina La Niña.

En la Tabla A.2 se presentan los años en los que se ha determinado la ocurrencia de los fenómenos de El Niño y La Niña a partir del año de 1900.

**Tabla A.2:** Años en los que se ha determinado la ocurrencia de los fenómenos de El Niño y La Niña a partir de 1900 (según el índice de la Japan Meteorological Agency).

Años con eventos cálidos (El Niño)		Años con eventos fríos (La Niña)	
1902	1963	1903	1954
1904	1965	1906	1955
1905	1969	1908	1956
1911	1972	1909	1964
1913	1976	1910	1967
1918	1982	1916	1970
1925	1986	1922	1971
1929	1987	1924	1973
1930	1991	1938	1975
1940	1997	1942	1988
1951		1944	1998
1957		1949	

## CIRCULACIÓN SECUNDARIA

La circulación secundaria ocurre si los centros de alta y baja presión son provocados por calentamiento o enfriamiento de la atmósfera baja. Entre los fenómenos que pertenecen a esta categoría y que inciden en la zona del Istmo de Tehuantepec están las ondas tropicales, los huracanes y los ciclones extratropicales.

**Huracanes** - Los huracanes se definen como ciclones tropicales acompañados de velocidades de viento en superficie que exceden los 80 metros por segundo. Su ocurrencia es más frecuente en los meses de agosto y septiembre en el hemisferio norte. Derivan su energía del calor latente liberado por la condensación de grandes cantidades de vapor de agua en las aguas cálidas de los océanos tropicales. Sus centros de baja presión se desplazan a razón de 10 a 20 kilómetros por hora, por lo que la influencia que ejercen sobre una localidad en particular no dura, en general, más de dos días.

**Frentes fríos** - La situación meteorológica típica que lleva a la producción de vientos fuertes en la región del Istmo de Tehuantepec es un anticiclón continental bien desarrollado con su centro sobre las grandes planicies de los Estados Unidos de América o la parte media de Texas, que se extiende bastante hacia el sur dentro del Golfo de México. Esto conduce a un influjo de aire frío que viene desde el centro y noreste de los Estados Unidos. El desbordamiento del aire frío hacia el sur es detenido usualmente por las altas montañas del México meridional. Las ondas frías pasan al Océano Pacífico únicamente a través del Istmo de Tehuantepec y de la región del Lago de Nicaragua.

## CIRCULACIÓN TERCIARIA

Los sistemas de vientos locales del Istmo de Tehuantepec que entran en esta clasificación son de dos tipos: los producidos por el calentamiento desigual del terreno y los cuerpos de agua dando lugar a las brisas de mar y tierra y, durante el verano, a las tormentas convectivas, y aquellos asociados a deformaciones de corrientes de aire por sistemas montañosos. Entre estos últimos se encuentran los vientos de encañonamiento.

**Brisas de mar y tierra** - La circulación de las brisas se inicia a lo largo de la costa cuando los contrastes térmicos entre el terreno y los cuerpos de agua adyacentes son suficientemente grandes. Durante el día, el continente refleja y emite más energía a la atmósfera que el agua. Entonces, la presión atmosférica sobre el agua es ligeramente mayor que sobre el terreno, resultando en un movimiento del aire desde la alta presión hacia la baja generando la brisa marina. Durante la noche se presenta una circulación inversa conforme el terreno se va enfriando con mayor rapidez que los cuerpos de agua y se establece la brisa de tierra. En general, y debido a que la diferencia de temperaturas es menor durante la noche, las brisas de tierra son más débiles que las brisas marinas.

**Vientos Foehn** - El viento que avanza sobre una cadena montañosa es forzado a ascender. Si el ascenso es suficiente para producir condensación, se iniciará la precipitación debido al enfriamiento adiabático del aire húmedo. Después de perder la mayor cantidad de humedad, el aire es forzado a cruzar la cresta orográfica y comienza a descender. La compresión adiabática a su vez produce un calentamiento del aire descendente.

**Tormentas convectivas de verano** - Las tormentas son, sin duda, la manifestación cotidiana más impresionante de las fuerzas de la naturaleza. El término tormenta es un término genérico que puede abarcar numerosos fenómenos producidos por nubes cumulonimbus en estado de madurez, tales como los truenos y relámpagos, lluvias torrenciales, granizo, vientos violentos, tornados, etc. Los cumulonimbus constituyen una forma violenta y espectacular de convección atmosférica. Cuando, por una u otra razón, la atmósfera se hace inestable, queda sometida a un movimiento convectivo. La fuente de inestabilidad de las tormentas de verano en el Istmo es el calentamiento solar, que genera variaciones pronunciadas de la temperatura del aire cerca del suelo durante el día y, con más frecuencia, por las tardes o al anochecer. Las tormentas convectivas suelen formarse por un conglomerado de varias células, cada una de las cuales se comporta como una unidad de circulación convectiva que comprende, a la vez, corrientes ascendentes y descendentes. Cada célula tiene un ciclo de vida que varía entre media hora y una hora y tiene tres fases determinadas por la magnitud de las corrientes verticales de aire: la fase de crecimiento, caracterizada por corrientes ascendentes en toda la célula produciendo vientos convergentes ligeros en la superficie; la fase de madurez, caracterizada por la presencia simultánea de corrientes ascendentes y descendentes, generando vientos convergentes ligeros en superficie y vientos divergentes fuertes en el hemisferio complementario; y la fase de disipación, que se caracteriza por corrientes descendentes débiles en toda la célula y vientos divergentes ligeros en superficie. Las corrientes descendentes de una tormenta intensa se extienden horizontalmente en todas direcciones justamente antes de llegar al suelo en forma de corriente fría cuyo borde exterior se parece a un frente frío de poca profundidad, al que se suele denominar “frente de ráfaga” [IGS, 1992].

**Depresiones** - Las depresiones están caracterizadas, en general, por un rasgo del terreno más bajo que los alrededores. Incluye rasgos tales como valles, cañones, cuencas y corredores. La aceleración del viento se incrementa sustancialmente si las depresiones pueden encauzar efectivamente al viento. La existencia de un sistema de viento local bien definido en ciertas depresiones, con patrones diurnos regulares, ha sido conocida desde tiempo atrás. Hay muchos factores que influyen sobre el flujo en una depresión: la orientación del viento en relación con los rasgos topográficos; la estabilidad atmosférica; el ancho, largo, inclinación, rugosidad y la regularidad de la sección de valle o cañón. Los valles y cañones bajos (<50 m) son considerados depresiones de pequeña escala, mientras que otros rasgos tales como cuencas, corredores, etc., son considerados como depresiones de gran escala. El gran número de parámetros que afectan las características del viento en un valle, junto con la variabilidad de esos parámetros de un valle a otro, hacen casi imposible inferir conclusiones específicas válidas para la caracterización del flujo. De hecho, los pequeños valles y cañones no son considerados como parte de las regiones montañosas, por lo tanto, no son sitios muy buenos para la instalación de turbinas, a menos que esos rasgos puedan encauzar o concentrar los vientos prevalecientes. El encauzamiento ocurre solamente si el valle o cañón está restringido en algún punto, entonces estos sitios se vuelven favorables para el uso de la potencia del viento.