

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Oceanografía Física**

**Cambios en la circulación de los vientos de bajos niveles en
México ante escenarios de cambio climático**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Oscar Manuel García Santiago

Ensenada, Baja California, México
2020

Tesis defendida por
Oscar Manuel García Santiago

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Directora de tesis

Dr. Markus Sebastian Gross

Dr. Daniel Saucedo Carvajal

Dra. Andrea N. Hahmann



Dr. José Gómez Valdés
Coordinador del Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Oscar Manuel García Santiago © 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Oscar Manuel García Santiago** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Cambios en la circulación de los vientos de bajos niveles en México ante escenarios de cambio climático

Resumen aprobado por:

Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Director de tesis

El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto del cambio climático en la circulación de mesoescala a 10 y 100 m de altura en México y en particular en 3 torres observacionales cerca de los parques eólicos de La Ventosa en Oaxaca, La Rumorosa en B.C. y San Fernando en Tamaulipas. Para determinar los cambios se utilizó el modelo regional RegCM4.7.1 a 25 km forzado con 3 modelos globales del CMIP5 (HadGEM2-ES, GFDL-ESM2M y MPI-ESM-MR) bajo el escenario de altas emisiones (RCP8.5) para un futuro cercano (2021-2050) con respecto a un periodo histórico (1981-2010). Primero se realizó una evaluación local del modelo regional (RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim) y tres reanálisis (ERA5, MERRA2 y NARR) con observaciones horarias del año 2018 en 7 torres eólicas. También se realizó una caracterización de patrones de circulación del viento con mapas auto-organizados (SOMs) y una intercomparación histórica de la climatología de los vientos de RegCM y los reanálisis en el dominio CORDEX-CAM (México-Centroamérica). La evaluación local del 2018 mostró que RegCM simuló mejor las características del viento en las 7 torres que los reanálisis, posiblemente debido a su resolución espacial más fina. La intercomparación histórica muestra que RegCM sobreestimó la intensidad del viento con respecto a los reanálisis en casi todo el dominio, especialmente en regiones con orografía compleja. Sin embargo, los reanálisis subestimaron considerablemente la magnitud del viento en la evaluación con las observaciones, lo cual sugiere que RegCM es más confiable que los reanálisis en las climatologías históricas. Con los SOMs se identificaron los patrones de viento más relevantes en México (>10m/s), los cuales resultaron ser los vientos característicos de los tres parques eólicos estudiados. En particular, los vientos del norte en el Istmo de Tehuantepec fueron los más intensos en México (>12m/s). Los escenarios derivados del ensamble de las salidas regionalizadas con RegCM sugieren cambios muy pequeños en la circulación de los vientos a 10 y 100 m en el futuro cercano. Resultados similares se hallaron en las regiones cercanas a La Rumorosa, La Ventosa y San Fernando con incrementos muy pequeños (~1%) en los vientos predominantes a 100 m.

Palabras clave: Vientos de mesoescala, torres eólicas, México, CORDEX, cambio climático, RegCM4, SOMs

Abstract of the thesis presented by **Oscar Manuel García Santiago** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in physical oceanography.

Changes in the low-level winds in México under climate change scenarios

Abstract approved by:

Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Thesis Director

The primary purpose of this research was to determine the possible effect of climate change on the mesoscale circulation at 10 and 100 m height in Mexico and at three observational towers near the wind farms of La Ventosa in Oaxaca, La Rumorosa in B.C., and San Fernando in Tamaulipas. We used the regional model RegCM4.7.1, at 25 km spatial resolution, driven by three global models of the CMIP5 (HadGEM2-ES, GFDL-ESM2M, and MPI-ESM-MR) under the high emission scenario (RCP8.5) to determine the wind changes in the near future (2021-2050) with respect to a historical period (1981-2010). First, we performed a local evaluation of winds derived from the regional model RegCM4.7.1 forced by ERA-Interim and from three reanalyses (ERA5, MERRA2, and NARR) against hourly observations of the year 2018 in seven wind towers in Mexico. We also characterized the wind circulation patterns with self-organized maps (SOMs) and assessed a historical intercomparison of wind climatologies from RegCM and the reanalyses in the CORDEX-CAM domain (Mexico and Central America). The local evaluation for 2018 showed that RegCM performed better than the reanalyses in the simulation of the wind characteristics near the seven wind towers, possibly due to its finer spatial resolution. The intercomparison of the historical climatologies showed that RegCM overestimated the wind intensity relative to the reanalyses in almost the entire domain, especially in regions with complex orography. However, the reanalyses underestimated the wind intensity in the evaluation with the observations of 2018, which suggests that RegCM is more reliable than the reanalyses in simulating the historical climatologies. The most relevant wind patterns (>10m/s) in Mexico were identified by the SOMs, which some of them turned out to be the characteristic winds in the three wind farms analyzed. Especially, the northerly winds in the Isthmus of Tehuantepec were the most intense in Mexico (>12m/s). The future scenarios from the RegCM ensemble suggest no significant changes in the circulation of winds at 10 and 100 m heights in the near future. Similarly, the results showed minor increases (~ 1%) in the prevailing winds at 100 m near La Rumorosa, La Ventosa, and San Fernando.

Keywords: Mesoscale winds, wind towers, Mexico, CORDEX, climate change, RegCM4, SOMs

Dedicatoria

*A mis padres y
hermanos*

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. No. de becario 633662.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y al Departamento de Oceanografía Física por permitirme realizar mis estudios de posgrado y por el conocimiento y apoyo brindado desde el primer día en esta institución.

A la Dra. Tereza Cavazos, por su tiempo, apoyo y consejos como directora de este trabajo. Sin duda alguna fue una gran guía para mí.

A los miembros del comité, Dr. Markus Gross, Dra. Andrea Hahmann y Dr. Daniel Saucedo, por su valioso tiempo y observaciones.

A la Agencia Danesa de Desarrollo Internacional y al proyecto: *Evaluación de modelos a escalas múltiples y de cadenas de modelos para generación de Atlas de Viento* (No. 17-M01-DTU), por el apoyo económico en la culminación de este trabajo.

A Ramón Lira y Ubaldo Miranda del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) por la ayuda que me brindaron con las observaciones de las torres eólicas.

A Alfredo Peña y los integrantes del proyecto *Atlas Eólico Mexicano* por sus comentarios y observaciones.

Al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste Mexicano por darme acceso a sus recursos computacionales para la realización de este trabajo. Proyecto 032C.

A mis padres Aracely Santiago y Manuel García y mis hermanos María y Oliver por siempre apoyarme en todo momento.

A Mariana Salinas por su gran apoyo y lindos momentos conmigo y a todos mis amigos del Departamento de Oceanografía Física por la ayuda brindada y por los momentos de ocio y fiesta.

Tabla de contenido

Página

Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Justificación.....	6
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
Capítulo 2. Datos y metodología.....	7
2.1. Observaciones.....	7
2.2. Reanálisis.....	8
2.3. Modelo climático regional RegCM4.7.1.....	10
2.4. Evaluación de los reanálisis y el modelo regional.....	13
2.4.1. Errores estadísticos.....	15
2.5. Caracterización del campo de viento.....	16
2.6. Proyecciones futuras.....	19
Capítulo 3. Resultados.....	20
3.1. Evaluación del viento con observaciones del 2018.....	20
3.1.1. Análisis de errores (2018).....	25
3.2. Evaluación histórica del viento (1981-2010).....	28
3.2.1. Intercomparación del viento cerca de las torres.....	28
3.2.2. Intercomparación espacial en el dominio CORDEX-CAM.....	31
3.3. Clasificación de vientos a 100 m con los mapas auto-organizados.....	36
3.3.1 Clasificación de los vientos a 100 m de RegCM-ERAInt.....	37
3.3.2 Mecanismos sinópticos asociados a los patrones de viento a 100 m.....	40

3.3.3. Clasificación de vientos de RegCM4.7 forzado con los modelos globales.....	49
3.4. Proyecciones futuras del viento a 100 m.....	52
3.4.1. Torres eólicas	52
3.4.2. Cambio en los patrones sinópticos de circulación en el dominio CORDEX-CAM.....	57
3.4.3. Cambios en los patrones de circulación	60
Capítulo 4. Discusión y conclusiones	63
Literatura citada	68
Anexo	74

Lista de figuras

Figura		Página
1	Parques eólicos y su capacidad instalada (MW) en México hasta el 2018. (Tomada de https://www.amdee.org/mapas/parques-eolicos-mexico-2018)	2
2	Distribución de las siete torres de viento del Atlas Eólico Mexicano utilizadas en este trabajo	8
3	Dominio CORDEX-CAM, México/Centroamérica y topografía en metros	11
4	Esquema general de la metodología de los mapas auto-organizados. Tomada de Cavazos (1999). Donde (a) serían las series de tiempo de las velocidades u y v redimensionadas en latitud y longitud, (b) entrenamiento no supervisado de los mapas auto-organizados, (c) nodo ganador y (d) ejemplos de compuestos	18
5	Dominio utilizado para entrenar el mapa auto-organizado (SOM) a una resolución de 25 km. Topografía de RegCM	19
6	Intercomparación del viento a 100 m de altura en el mástil de la Rumorosa, Baja California durante 2018 con los datos de los puntos de malla más cercanos de los reanálisis (MERRA2, ERA5 y NARR) y el modelo regional RegCM4.7 forzado con ERAInt. (a) Ciclo diurno, (b) ciclo anual y (c) distribución de densidad de probabilidad Weibull del viento. La región sombreada en (a) y (b) representa la desviación estándar de las observaciones. El histograma en (c) representa a las observaciones del mástil (Mast) y la curva negra, su ajuste	21
7	Comparación de rosas de viento (con datos horarios y tri-horarios) a 100 m de altura en el mástil de la Rumorosa, Baja California, los reanálisis, el modelo regional RegCM durante el año 2018	21
8	Igual que la Figura 6, pero para el mástil de San Fernando, Tamaulipas	22
9	Igual que la Figura 7, pero para San Fernando, Tamaulipas	23
10	Igual que la Figura 6, pero para el mástil de la Ventosa, Oaxaca	24
11	Igual que la Figura 7, pero para la Ventosa, Oaxaca	25
12	(a) Error absoluto medio (MAE) de la magnitud de los vientos instantáneos horarios (MERRA2 y ERA5) y tri-horarios (RegCM y NARR) a 100m de altura con respecto a cada uno de los 7 sitios observacionales (mástil) en 2018. (b) Igual que (a), pero para el error de la raíz cuadrada media (RMSE). Los sitios son: B.C. (La Rumorosa), YUC (Mérida), CHI (Cuauhtémoc), OAX (La Ventosa), JAL (Ojuelos), TAM (San Fernando) y PUE (Tepexi)	26

13	(a) Error circular absoluto de la dirección del viento instantáneo de los reanálisis y el modelo regional con respecto a cada uno de los 7 sitios observacionales en 2018. (b) Igual que en (a), pero para el porcentaje de acierto en la dirección del viento. Símbolo de los sitios como en la Figura 12	27
14	Ciclo anual (a) y porcentaje de la dirección del viento (b) a 100 m de altura del reanálisis ERA5 y el modelo RegCM forzado con ERA-Interim en el punto de malla más cercano a la Rumorosa, B.C., para el periodo 1981-2010	29
15	Igual que la Figura 14, pero para los puntos de malla cercanos a San Fernando, Tamaulipas	30
16	Igual que la Figura 14, pero para los puntos de malla cercanos a la Ventosa, Oaxaca	31
17	Intercomparación de la climatología promedio del viento estacional a 10 m de altura en el periodo de referencia (1981-2010) en el dominio CORDEX-CAM de cuatro reanálisis y el RegCM forzado con ERA Interim. Los vectores y colores indican la dirección y magnitud (m/s) del viento, respectivamente	32
18	Diferencias en la climatología del viento promedio estacional a 10 m entre RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim menos los reanálisis en el periodo de referencia (1981-2010)	33
19	Intercomparación del viento a 100 m de altura en el mástil de la Rumorosa, Baja California durante 2018 con los datos de los puntos de malla más cercanos de los reanálisis (MERRA2, ERA5 y NARR) y el modelo regional RegCM4.7 forzado con ERAInt. (a) Ciclo diurno, (b) ciclo anual y (c) distribución de densidad de probabilidad Weibull del viento. La región sombreada en (a) y (b) representa la desviación estándar de las observaciones. El histograma en (c) representa a las observaciones del mástil (Mast) y la curva negra, su ajuste	35
20	Climatología promedio del viento estacional y anual a 100 m de RegCM de las simulaciones realizadas con RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim (primera columna) y las diferencias con respecto a RegCM forzado por 3 modelos globales y con el ensamble de los modelos en el periodo de referencia (1981-2010)	36
21	Compuestos promedios de vientos tri-horarios a 100 m de altura de las salidas de RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim de acuerdo a los nodos del SOM en el periodo histórico (1981-2010). Los colores (rojo, naranja y azul) que enmarcan algunos nodos indican diferentes tipos de vientos regionales dominantes de acuerdo a la estación del año; rojo: vientos en la Sierra Madre Occidental; naranja: vientos en la Península de B.C. y noreste de México; y azul: vientos Tehuanos. Los números de la izquierda superior de los mapas representa el número del nodo y el de la derecha el porcentaje de datos en el compuesto	37
22	Distribución mensual de las frecuencias tri-horarias de los vientos en los nodos del SOM de la Figura 21. Los colores azul, amarillo, naranja y verde representan las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño, respectivamente	39

23	Ocurrencias promedio (%) tri-horarias del viento en los nodos del SOM de la Figura 21 por hora	40
24	Compuestos del viento a 100 m de las salidas de RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim en el periodo histórico igual a la Figura 21, pero para el dominio extendido de CORDEX-CAM	42
25	Igual que la Figura 24, pero para la variable de presión al nivel del mar	43
26	Igual que la Figura 24, pero para la temperatura superficial (°C) a 2 m	44
27	Distribución promedio de las rosas de viento a 100 m de altura del punto de malla más cercano a San Fernando, Tamaulipas por cada nodo del SOM de la Figura 21. Datos de RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim en el periodo 1981-2010. Los círculos internos de las rosas representan la frecuencia (%) del viento y los colores, la intensidad del viento (m/s)	46
28	Igual que la Figura 27, pero para el sitio de La Rumorosa, B.C.	47
29	Igual que la Figura 27, pero para el sitio de La Ventosa, Oaxaca.	48
30	Compuestos del viento a 100 m del ensamble las salidas de RegCM4.7.1 forzado con los tres MGCs en el periodo histórico para el dominio CORDEX-CAM	50
31	Diferencias en el porcentaje de frecuencias de ocurrencia de cada nodo del SOM (Figura 21) de las salidas de RegCM4.7 forzado con los modelos globales: GFDL-ESM2M (a), HadGEM2-ES (b) y MPI-ESM-MR (c); menos RegCM.4.7 forzado con ERA-Interim (Figura 22) en el periodo histórico	51
32	Ciclos anuales del viento a 100 m en el punto de malla cercano a la Rumorosa, B.C. Comparación entre las salidas de RegEraInt en el periodo histórico (línea sólida negra), RegEnsamble en el periodo histórico (línea sólida verde) y RegEnsamble en el futuro cercano (2021-2050) (línea segmentada roja)	53
33	Rosas de viento a 100 m en el punto de malla cercano a la Rumorosa, B.C. de las salidas de RegGFDL, RegHad y RegMPI. Rosas superiores: climatología 1981-2010. Rosas inferiores: Diferencias en frecuencias (%) del periodo futuro (2021-2050) menos el histórico; tonalidades rojas indican un aumento y azules reducción	54
34	Igual que la Figura 32, pero para el punto de malla cercano a San Fernando	55
35	Igual que la Figura 33, pero para el punto de malla cercano a San Fernando	55
36	Igual que la Figura 32, pero para el punto de malla cercano a La Ventosa	56
37	Igual que la Figura 33, pero para el punto de malla cercano a La Ventosa	56

38	Cambios relativos (%) estacionales del viento a 100 m en el futuro cercano menos el periodo histórico (1981-2010). Datos de RegGFDL (primera columna), RegHad (columna de en medio) y RegMPI (última columna)	58
39	Cambios relativos (%) estacionales (invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d)) del viento a 100 m de altura en el futuro cercano (2021-2050) menos el periodo histórico (1981-2010) del ensamble multimodelo	59
40	Igual que la Figura 39 pero para una altura de 10 m	60
41	Diferencias relativas en el futuro cercano (2021-2050) del porcentaje de frecuencias de ocurrencia de cada nodo del SOM utilizando las salidas de RegCM4.7 forzado con los modelos globales: RegGFDL (a), RegHad (b) y RegMPI (c)	62
42	Ejemplo de simplificación del terreno en el modelo regional y los reanálisis. Los cuadros de colores representan los puntos de malla más cercanos a la torre de viento en Tepexi, Puebla. Modelo de Elevación Digital de INEGI (2013)	64
43	Intercomparación del viento a 100 m de altura en el mástil de Mérida, Yucatán durante 2018 con los datos de los puntos de malla más cercanos de los reanálisis (MERRA2, ERA5 y NARR) y el modelo regional RegCM4.7 forzado con ERAInt. (a) Ciclo diario, (b) ciclo anual y (c) distribución de densidad de probabilidad Weibull del viento. La región sombreada en (a) y (b) representa la desviación estándar de las observaciones. El histograma en (c) representa a las observaciones del mástil (Mast) y la curva negra, su ajuste	74
44	Comparación de rosas de viento (con datos horarios y tri-horarios) a 100 m de altura en el mástil de Mérida, Yucatán, los reanálisis, el modelo regional RegCM durante el año 2018.	74
45	Igual que la Figura 43, pero para el mástil de Cuauhtémoc, Chihuahua.....	75
46	Igual que la Figura 44, pero para el mástil de Cuauhtémoc, Chihuahua.....	75
47	Igual que la Figura 43, pero para el mástil de Ojuelos, Jalisco.....	76
48	Igual que la Figura 44, pero para el mástil de Ojuelos, Jalisco.....	76
49	Igual que la Figura 43, pero para el mástil de Tepexi, Puebla.	77
50	Igual que la Figura 44, pero para el mástil de Tepexi, Puebla.....	77

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Estaciones anemométricas del Atlas Eólico Mexicano. Los sitios en amarillo se analizan con detalle en este trabajo	8
2	Resumen técnico de los reanálisis utilizados	9
3	Modelos globales utilizados por el ICTP para el re-escalamiento dinámico con el RegCM4.7.1.	10
4	Esquema de parametrizaciones del modelo regional RegCM4.7.1 usados en la simulación de 2018 para todo el dominio CORDEX-CAM	11
5	Especificaciones del dominio de las salidas de RegCM4.7	12
6	Simulaciones realizadas con RegCM4.7.1 utilizadas en este trabajo	12
7	Coeficiente de correlación de Pearson de la magnitud del viento promedio mensual a 100 m de altura de los mástiles observacionales con los tres reanálisis y el modelo regional. Los valores en negritas indican las correlaciones más altas en cada mástil. Todos los valores son significativos al 95%, excepto los indicados con asterisco	26
8	Error absoluto medio (MAE) de la magnitud del viento promedio mensual a 100 m de altura durante 2018 con referencia a los mástiles de los siete sitios. Los valores en negritas indican el menor error en cada sitio	27

Capítulo 1. Introducción

El crecimiento económico y social de las naciones depende de la capacidad de cubrir sus necesidades básicas. La energía es una de las necesidades esenciales de una nación en desarrollo y debido a la rápida globalización, el requerimiento de ésta se ha incrementado en los últimos años (Baños et al., 2011).

Actualmente la principal fuente de energía proviene de los combustibles fósiles, sin embargo, la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2015) en su reporte de tendencias globales del consumo y producción de energías indica que se ha visto una disminución en la demanda de combustibles fósiles y un aumento en la inclusión de energías renovables por parte de sus mayores consumidores (Estados Unidos, China y la Unión Europea). Asimismo, dicho reporte indica que para el año 2040 se prevé que la tendencia en el consumo de energía aumente en un 70% y que la principal fuente de producción provenga de energías renovables; cabe señalar que dicho reporte sostiene una perspectiva optimista.

La disponibilidad de los combustibles fósiles ha disminuido en las últimas décadas debido a la alta demanda mundial. Esto aunado a la relación que existe entre el uso de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto de invernadero a la atmósfera, han creado un nicho de oportunidad para las energías renovables. La energía producida por el viento es una energía viable para las naciones debido a su bajo costo de operación y a la escasa emisión de contaminantes que involucra (Saidur et al., 2011). Actualmente se considera a la energía eólica como la principal fuente renovable para sustituir a los combustibles fósiles debido a su precio, rentabilidad y bajo impacto ambiental (GWEC, 2017).

De acuerdo a la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (Camara de Diputados, 2008), uno de los objetivos de la Secretaría de Energía de México es reducir el uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica en un 60% y 50% para el 2035 y 2050 respectivamente, por lo que se plantea un mejor aprovechamiento de las energías renovables para abastecer la futura demanda energética. Sin embargo, datos del IEA (2016) señalan que en México, al igual que en los demás países del mundo, la demanda y consumo de la energía total se ha incrementado entre un 25% y 50% en lo que va del 2000 al 2015. La principal fuente para la producción de energía en México proviene de gas y petróleo y esta última ocupa poco más de la mitad de la producción total. Por otro lado, el mismo reporte documenta que la producción generada por fuentes no fósiles en el país representa la quinta parte de la total producida, donde la energía hidroeléctrica es la predominante seguida por la nuclear.

Por su parte, la energía eólica ha ganado terreno en México. En años recientes, el gobierno ha invertido en la industria del viento para aumentar la producción de energías limpias llegando a instalar 49 parques eólicos (cifra hasta 2018) en el país (Figura 1), los cuales tuvieron una capacidad instalada de 4 GW hasta finales del 2017; esta cifra representa el 4% de la energía total generada en ese año (GWEC, 2017). De acuerdo con las perspectivas de la IEA (2016), se prevé que México tenga una capacidad instalada de 50GW en energía eólica para finales del 2040 y que este tipo de energía sea la de mayor contribución en la producción de electricidad en el rubro de energías renovables. En la Figura 1 destacan los estados de Oaxaca y Tamaulipas por ser los principales productores de energía eólica en México.

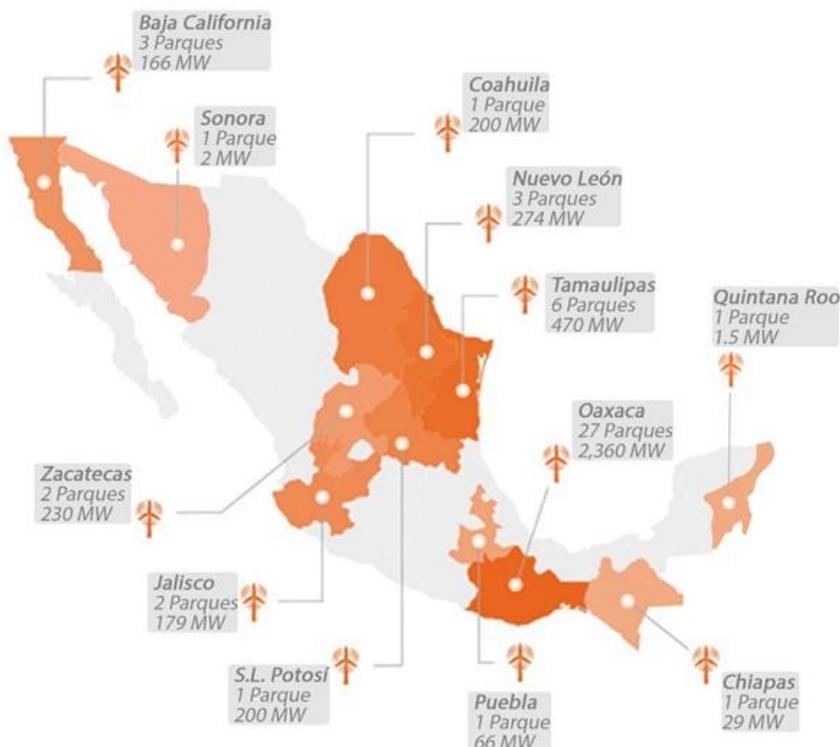


Figura 1. Parques eólicos y su capacidad instalada (MW) en México hasta el 2018. (Tomada de <https://www.amdee.org/mapas/parques-eolicos-mexico-2018>).

La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) es un tema que va relacionado con el consumo y producción de energía. Tan solo en 2010, el 49% de las emisiones de GEI fue producido por el sector energético, convirtiéndolo en el mayor contribuyente de emisiones a escala global (Bruckner et al., 2014). Por lo tanto, una medida para reducir las emisiones de GEI es aumentar el uso de energías renovables. Algunas de estas fuentes de energía, como la hidroeléctrica y eólica, están intrínsecamente ligadas a las condiciones climatológicas del lugar, por lo que es importante evaluar la variabilidad del clima y los

posibles efectos del cambio climático local y regional. Para el caso particular de la energía eólica, los efectos del cambio climático podrían reflejarse en cambios en la distribución geográfica de los vientos y en la variabilidad interanual y estacional del recurso eólico (Pryor y Barthelmie, 2010). Considerando lo anterior, es importante saber si la producción de energía eólica se verá mermada o intensificada bajo las condiciones futuras, por lo que en este trabajo se plantea investigar el posible cambio en la circulación de los vientos de bajos niveles (100 y 10 m de altura) y los mecanismos físicos asociados a dichos cambios.

1.1. Antecedentes

Se han realizado diversos estudios sobre el potencial eólico ante escenarios de cambio climático. A escala global, Karnauskas et al. (2018) determinaron el cambio en la energía del viento a 80 metros a partir de 10 modelos de circulación general del proyecto CMIP5 (Climate Model Intercomparison Project phase 5) para los escenarios de emisiones medias (RCP4.5) y altas (RCP8.5) y por periodos de 20 años en el siglo 21. Sus resultados de la mayoría de los modelos, sugieren que en los primeros y últimos veinte años del siglo 21 podría haber una disminución del potencial eólico en latitudes medias del Hemisferio Norte y un aumento del potencial en los trópicos y en el Hemisferio Sur.

Un factor muy importante al estudiar el potencial eólico es saber qué tan extremos pueden llegar a ser los vientos, en qué estaciones del año ocurren y con qué frecuencia. Kumar et al. (2015) evaluaron los vientos máximos extremos en superficie de 15 modelos globales del CMIP5 para el escenario RCP8.5 durante siglo 21. Ellos caracterizaron la intensidad y frecuencia de los máximos extremos del viento en superficie siguiendo una distribución Gumbel para presentar sus resultados en términos de periodos de retorno. Sus resultados indican que, para las 22 regiones analizadas del globo, la velocidad máxima anual esperada podría no cambiar significativamente durante 2074-2100 comparado con el periodo histórico de referencia (1979-2005).

Los dos trabajos citados anteriormente utilizaron salidas de modelos globales, los cuales debido a su baja resolución espacial ($> 1^\circ$) no son capaces de capturar correctamente la circulación de mesoescala y mucho menos los efectos asociados a la microescala (rugosidad, topografía, estabilidad atmosférica, etc.). Para mejorar la resolución y simulación de la circulación a escalas más finas, algunos autores han utilizado técnicas de re-escalamiento climático; por ejemplo, Reyers et al. (2016) utilizaron una técnica híbrida de reducción de escala estadística-dinámica, combinando patrones de circulación global y un modelo regional

climático para investigar el potencial eólico en Europa. En este trabajo se utilizaron 22 modelos climáticos globales que sirvieron para forzar un modelo regional (COSMO-CLM) en los periodos 2001-2060 y 2061-2100 bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5). Los resultados más importantes se encontraron a escalas estacionales para vientos a 80 metros de altura, con un mayor potencial eólico en invierno y menor en verano para el norte de Europa.

Otros autores como Pryor et al. (2012a) analizaron el uso de modelos regionales para estudiar los extremos de la velocidad del viento ante el cambio climático. Los autores hicieron un re-escalamiento dinámico del modelo global ECHAM5 usando dos modelos climáticos regionales (HIRHAM5 y RCA3) para la región escandinava. El enfoque del estudio se centró en el periodo de retorno (de 50 años) de vientos muy extremos y ráfagas de vientos a 10 m de lo cual se encontró que no cambiarían significativamente hasta el final del siglo 21.

Reboita et al. (2018) utilizaron el modelo climático regional RegCM4 para re-escalar dinámicamente las salidas de vientos de tres modelos globales para la región Sudamericana considerando el escenario RCP8.5. El objetivo fue determinar el cambio futuro en la densidad de potencia del viento y la intensidad del viento a una altura de 100 metros. Encontraron que, en general, podría haber un aumento en la densidad de potencia en la mayor parte de Sudamérica, especialmente en el norte y centro; para regiones más al sur del continente, el aumento podría intensificarse para finales del siglo.

El trabajo de Santos et al. (2018) demuestra que el uso de modelos regionales mejora la representación de los vientos de mesoescala en comparación con los modelos globales. Los autores evaluaron la magnitud del viento a 120 m de los modelos regionales y globales de los proyectos de CORDEX y CMIP5, respectivamente, utilizando observaciones de 15 granjas eólicas y de 13 boyas oceánicas para la Península Ibérica. Encontraron que los modelos regionales tuvieron mejor habilidad que los modelos globales del CMIP5, principalmente en las regiones oceánicas. Con la evaluación de los modelos regionales, pudieron determinar los cambios en el futuro bajo el escenario de altas emisiones, indicando una reducción en la velocidad promedio en la mayor parte del dominio de estudio.

Los estudios de mesoescala como los de Pryor et al. (2012a), Reyers et al. (2016), Reboita et al. (2018) y Santos et al. (2018) son importantes para entender los mecanismos sinópticos y regionales asociados a los vientos de una región de interés. Sin embargo, cuando el objetivo es obtener el potencial eólico, estimar los vientos con modelos de mesoescala continúa siendo un reto y en ocasiones inadecuado. Primero, la resolución de los vientos en un modelo de mesoescala es inadecuada para obtener

directamente el potencial eólico de una turbina a escala local. Una alternativa sería incrementar la resolución de estos modelos a una escala más fina (entre 2 y 1 km); no obstante, esto no necesariamente implicaría una mejora en la habilidad del modelo (Pryor et al., 2012b). Segundo, cuando se hace un re-escalamiento de mesoescala a microescala el cambio en las configuraciones o condiciones de frontera pueden resultar en diferencias substanciales del recurso eólico (Gryning et al., 2014). Aun así, con las configuraciones adecuadas o con métodos de re-escalamiento dinámico-estadístico como el de Badger et al. (2014), las salidas de los modelos de mesoescala podrían dar las condiciones iniciales suficientes para forzar modelos de microescala. A esta escala, la influencia local de la topografía, la rugosidad y el uso de suelo son dominantes en la variabilidad espacial de los vientos que afectan directamente la producción de energía en la turbina. En México se ha utilizado el software WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program; <http://www.wasp.dk/>) para determinar algunas características del viento de microescala en la evaluación de zonas con potencial eólico. Por ejemplo, Dorrego Portela et al. (2011) utilizaron WASP a una resolución espacial de 50 metros con los datos de una estación anemométrica a 15 y 32 metros de altura en la localidad Unión Hidalgo, Oaxaca. El objetivo del estudio fue demostrar que esta localidad era apta para la instalación de una granja eólica; los autores encontraron que el factor de capacidad de energía eólica fue de 55%, considerado como adecuado para la instalación de una granja eólica.

En México se han realizado muy pocos estudios de potencial eólico para algunas regiones del país. Por ejemplo, Jaramillo et al. (2004) hicieron un estudio del potencial eólico del estado de Baja California Sur utilizando un año de datos de 15 estaciones eólicas colocadas a lo largo de la costa oeste del estado. Utilizaron una estación representativa de largo periodo para corroborar la climatología del viento a 10 m en la región. Ellos ajustaron una distribución de probabilidad Weibull a las series de tiempo de viento para después calcular la energía generada por dos tipos de turbinas. Determinaron que Baja California Sur presenta condiciones favorables para la instalación de granjas eólicas, a una altura de 50 metros, debido a las condiciones climatológicas del lugar y por el bajo costo de producción que presenta.

Si bien existen pocos estudios sobre el potencial eólico en el país, los estudios sobre los efectos del cambio climático en el potencial eólico de México son aún más escasos. Gross y Magar (2016) estudiaron los posibles cambios del potencial eólico sobre el océano cerca de costas mexicanas ante escenarios de cambio climático. Los autores determinaron el potencial eólico a partir de las salidas del modelo global HadGEM3 a una resolución de 25 km para tres niveles verticales (50, 100 y 150 metros) bajo el escenario de emisiones más extremo (RCP8.5) para el periodo 2000-2100. Con la confianza de las pruebas estadísticas, indicaron que las diferencias entre el escenario futuro y el estado actual del clima resultaron en una reducción del recurso de manera substancial.

1.2. Justificación

La mayoría de los planes de energía a largo plazo se elaboran a partir de las condiciones actuales del clima, sin tomar en consideración los posibles escenarios de cambio climático, lo cual puede ser riesgoso para la planificación o implementación de sistemas de energía, especialmente las renovables (Karnauskas et al., 2018; Pereira de Lucena et al., 2010). México tiene planeado reducir el uso de combustibles fósiles y para abastecer la demanda energética se contempla un mayor aprovechamiento de energías renovables, entre ellas la energía eólica. Sin embargo, debido a los efectos del cambio climático global los patrones de circulación del viento podrían verse alterados en intensidad y dirección y con ello la disponibilidad del recurso eólico en diferentes regiones del país. Además, en México no se han hecho estudios de cómo podría cambiar la dirección e intensidad del viento a 100 m de altura bajo condiciones de cambio climático utilizando modelos de mesoescala. Esta tesis es una oportunidad para evaluar varios reanálisis y las salidas de un modelo regional (RegCM4.7.1) de la iniciativa de modelación regional llamada *Coordinated Regional Downscaling Experiment* (CORDEX; Giorgi y Gutowski, 2015).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar el cambio en la circulación de mesoescala de los vientos a 10 y 100 m de altura en México ante escenarios de cambio climático con el modelo regional RegCM4.7.1

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar la habilidad del modelo regional RegCM4.7.1 y los reanálisis en reproducir el comportamiento diario, mensual y estacional del viento a 100 metros cerca de 7 torres anemométricas durante 2018.
- Evaluar las climatologías del viento a 10 y 100 m del RegCM4.7 en el dominio CORDEX Centro-América para un periodo de referencia (1981-2010).
- Identificar los patrones de circulación del viento y los mecanismos asociados en el periodo de referencia usando el modelo regional.
- Determinar los posibles cambios del viento de bajos niveles en un futuro cercano (2021-2050) bajo el escenario de altas emisiones (RCP8.5).

Capítulo 2. Datos y metodología

2.1. Observaciones

Los datos de observaciones del viento se obtuvieron a partir de las siete torres eólicas del proyecto Atlas Eólico Mexicano (AEM). Estas torres se ubican en sitios estratégicos de diversos estados del país que sirven de referencia en la evaluación y cálculo del potencial eólico en México (Figura 2). Las torres registran la intensidad del viento a 20, 40, 60 y 80 metros de altura y la dirección del viento a 58 y 78 metros de altura; además proporcionan datos de temperatura, humedad, densidad del aire y presión en el sitio. La frecuencia de medición de los instrumentos es de alrededor de 1 Hz, pero los datos disponibles, después de pasar por un control de calidad, tienen una resolución temporal promediada de 10 minutos además de estar referenciados al horario local del lugar. Como post-procesamiento, se combinaron las mediciones de los dos anemómetros a 80 metros para eliminar los efectos de la torre, se eliminaron periodos con problemas de medición e incluso se corrigieron errores de medición de ángulo (p.ej. mediciones desviadas 180 ° en la torre de San Fernando). Para este trabajo se seleccionó un periodo de tiempo en donde la información de las 7 torres fuera consistente, por lo que se escogió el año completo de 2018 para la evaluación del modelo regional y los reanálisis. La Tabla 1 muestra detalles de cada una de las 7 torres de viento y la información referente a los datos y especificaciones de las torres se puede consultar en la liga <http://aems.ineel.mx/>.

Tabla 1. Estaciones anemométricas del Atlas Eólico Mexicano con datos cada 10 minutos del 2018. Los sitios en amarillo se analizan con detalle en este trabajo.

Código	Sitio	Estado	Localización	Elevación (m)
M01	Rumorosa	Baja California	32.48 N, 116.11 W	1343
M02	Mérida	Yucatán	21.14 N, 89.78 W	5
M03	Cuauhtémoc	Chihuahua	29.02 N, 106.95 W	33
M04	CERTE	Oaxaca	16.55 N, 94.96 W	31
M05	Ojuelos	Jalisco	21.66 N, 101.72 W	2422
M06	San Fernando	Tamaulipas	25.02 N, 98.09 W	32
M07	Tepexi	Puebla	18.59 N, 97.94 W	1636

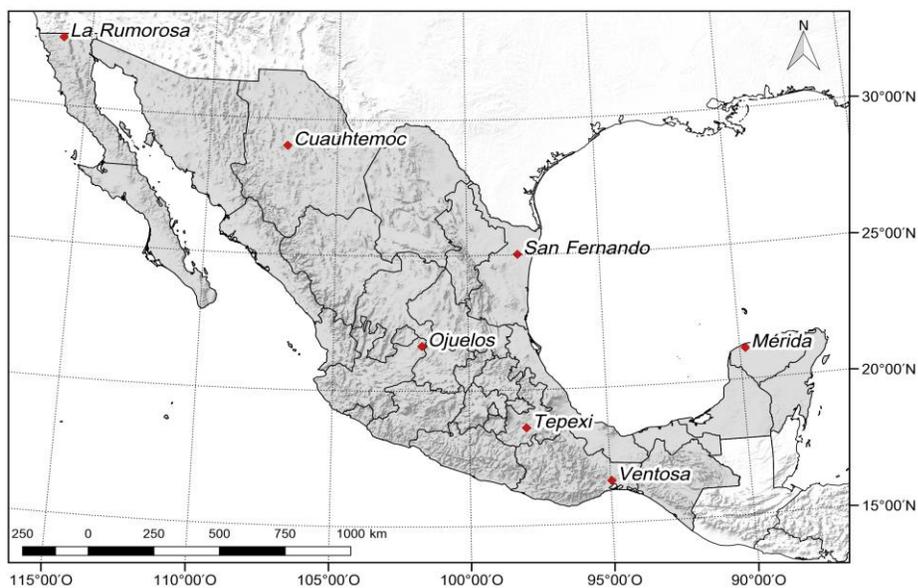


Figura 2. Distribución de las siete torres de viento del Atlas Eólico Mexicano utilizadas en este trabajo.

2.2. Reanálisis

Se utilizaron datos de las componentes de vientos instantáneas provenientes de reanálisis para tener comparaciones cerca de las torres de viento y en el dominio de estudio. La selección de los reanálisis se centró en los de mayor resolución temporal y espacial que estuvieran disponibles públicamente, restringiendo la selección a resoluciones espaciales menores a un grado y resoluciones temporales menores a 3 horas. Para cada reanálisis se descargó información horaria o tri-horaria de los vientos en dos niveles (según su disponibilidad) y por debajo de 100 m de altura para poder extrapolarlos posteriormente a la altura deseada (ver ecuaciones 1 y 2 en la Sección 2.4). Se utilizaron datos del 2018 y del periodo 1981-2010 con una extensión espacial desde los -140° hasta los -60° de longitud y desde los 0° hasta los 45° de latitud norte.

A continuación se describen los reanálisis utilizados y sus detalles técnicos se resumen en la Tabla 2.

- **ERA5:** *Fifth generation of ECMWF ReAnalysis* (Copernicus Climate Change Service (C3S), 2017). Es un reanálisis global de alta resolución horizontal (~ 31 km) y vertical (137 niveles verticales presión/sigma) que provee información horaria de parámetros atmosféricos, oceánicos y uso de suelo. Está programado que ERA5 remplace al reanálisis ERA-Interim por las diversas mejoras que presenta

el primero (Hersbach et al., 2018). ERA5 cuenta con información disponible desde 1979 hasta la actualidad en <http://apps.ecmwf.int/data-catalogues/era5/>.

- **NARR:** *North American Regional Reanalysis* (Mesinger et al., 2006). Es un reanálisis regional que cubre la región de Norteamérica a una resolución de 32 km con datos tri-horarios; es producido por el National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Cuenta con información desde 1979 a la fecha en <https://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rrean/>.
- **MERRA2:** *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version 2* (Gelaro et al., 2017). Es un reanálisis global con información horaria y una resolución espacial de $1/2^\circ \times 2/3^\circ$. La versión 2 del MERRA tiene mejoras en la asimilación de la información meteorológica con respecto a su primera versión, además de contar con asimilación de aerosoles para una mejor representación del sistema climático. Los datos se encuentran disponibles desde 1980 en https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/data_access/.
- **ERA-Int 75:** Era-Intermin reanálisis (Dee et al., 2011). Es un reanálisis atmosférico global con información cuatro-horaria con aproximadamente 83 km de resolución espacial y 60 niveles verticales. Este reanálisis se utilizó como datos de entrada para las condiciones iniciales y de frontera del modelo regional RegCM4.7.1 en los periodos históricos y en 2018. Cuenta con información disponible desde 1979 hasta agosto 2019 en <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>.

Tabla 2. Resumen técnico de los reanálisis utilizados.

Reanálisis	Resolución espacial	Resolución temporal	Niveles superficiales	Coordenadas	Referencia
ERA5	0.28125° (~ 31 km)	1 hr	10, 100 m	Geográficas (WGS84)	(Copernicus Climate Change Service (C3S), 2017)
NARR	~ 32 km	3 hr	10, 30 m	Proyectadas (Conforme Cónica de Lambert)	(Mesinger et al., 2006)
MERRA-II	0.5° x 0.65° (lat x lon)	1 hr	10, 50 m	Geográficas (WGS84)	(Gelaro et al., 2017)
ERA-Int 75	0.75° (~ 83 km)	6 hr	10 m	Geográficas (WGS84)	(Dee et al., 2011)

2.3. Modelo climático regional RegCM4.7.1

Para los análisis del campo del viento histórico y ante escenarios de cambio climático se utilizaron las salidas dinámicamente regionalizadas del modelo climático RegCM4.7.1 (Giorgi et al., 2012). Este modelo regional fue desarrollado y es mantenido por el *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP). Es un modelo hidrostático, compresible y con coordenadas verticales sigma-p que resuelve las ecuaciones primitivas de la atmósfera en una malla tipo Arakawa B en donde el viento y las variables termodinámicas están alternadas (Giorgi et al., 2012). El modelo regional fue forzado con el reanálisis ERA-Int 75 durante un periodo histórico (1979-2015) para poder evaluar su habilidad; RegCM4.7.1 también fue forzado con tres modelos climático globales (MCG) durante el periodo histórico y durante el futuro cercano (2021-2050) bajo el escenario RCP8.5. Los MCG del CMIP5 son: el GFDL-ESM2M, MPI-ESM-MR y HadGEM2-ES (Tabla 3), los cuales mostraron un comportamiento adecuado en simular los patrones de precipitación y temperatura en el dominio CORDEX-CAM (Colorado-Ruiz et al., 2018; Coppola et al., 2014; Elguindi et al., 2014), además de representar adecuadamente circulaciones atmosféricas como el monzón de Norteamérica (p. ej. Bukovsky et al., 2015; Geil et al., 2013; Torres-Alavez et al., 2014). Estas simulaciones se hicieron en el ICTP como parte de la iniciativa CORDEX (Giorgi y Gutowski, 2015; Giorgi et al., 2009) para el dominio CORDEX-CAM (Figura 3) con una resolución espacial de 25 km. Actualmente los datos diarios están disponibles como CAM-22 en <http://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>. Los datos semi-diarios se obtuvieron directamente del ICTP y estarán disponibles próximamente en la página antes mencionada.

De la información disponible, se utilizaron las salidas tri-horarias de las componentes del viento a 10 y 100 metros de altura junto con la presión al nivel del mar de las salidas históricas de RegCM forzado con ERA-Int 75 y las históricas y futuras forzadas con los tres MCG (Tabla 3). En las salidas históricas se dejó el primer año fuera del análisis debido al spinup (calentamiento).

Tabla 3. Modelos globales utilizados por el ICTP para el re-escalamiento dinámico con el RegCM4.7.1.

Modelo	Resolución espacial (°)	Calendario	Referencia
GFDL-ESM2M	2.0225 x 2.5	365 días/año	(Dunne et al., 2012)
MPI-ESM-MR	1.8653 x 1.875	Gregoriano	(Giorgetta et al., 2013)
HadGEM2-ES	1.25 x 1.8575	360 días/año	(Collins et al., 2011)

Además de las simulaciones realizadas por el ICTP, se hizo una simulación con RegCM4.7.1 forzado con ERA-Int 75 para el año 2018 con la finalidad de evaluar el modelo regional con referencia a las observaciones horarias de las torres de viento y a los reanálisis. Este experimento se llevó a cabo en el

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Para ser consistentes con las salidas provenientes del ICTP se utilizó la misma configuración y parametrizaciones usadas por el ICTP (Tablas 4 y 5) y el reanálisis ERA-Interim 75 como condiciones iniciales y de frontera. La simulación se hizo de diciembre de 2017 a diciembre de 2018 y se dejó el primer mes como spinup en los análisis.

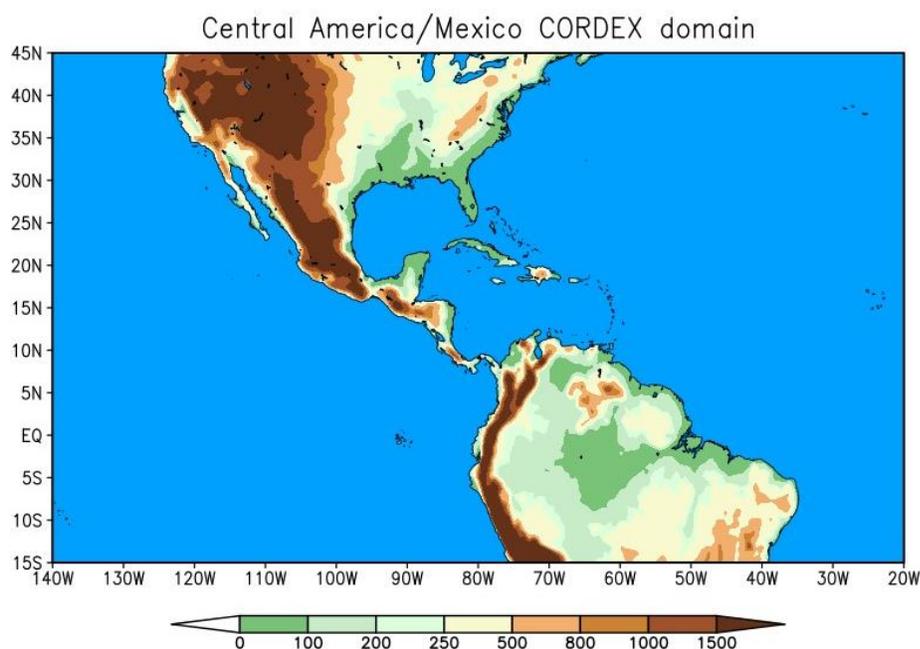


Figura 3. Dominio CORDEX-CAM, México/Centroamérica y topografía en metros.

Tabla 4. Esquema de parametrizaciones del modelo regional RegCM4.7.1 usados en la simulación de 2018 para todo el dominio CORDEX-CAM.

Parametrización	Referencias
Dinámica	Hidrostática, coordenadas sigma (Giorgi et al., 1993)
Radiación	CCM3 (Kiehl et al., 1996)
Capa Límite Planetaria (PBL)	Holtslag (Holtslag et al., 1990)
Esquema de suelo	Community Land Model (CLM4.5)
Microfísica	Subgrid Explicit Moisture Scheme (SUBEX) (Pal et al., 2000)
Esquema Convectivo	Kain-Fritsch (océano) y Emmanuel (continente)

La Tabla 6 enlista las simulaciones del RegCM4.7.1 que fueron utilizadas para la elaboración de este trabajo. Cada experimento indica el periodo de simulación, los distintos institutos involucrados y los

modelos o reanálisis usados como condiciones iniciales y de frontera. Todos los experimentos comparten la misma configuración de parametrizaciones del modelo regional, al igual que la resolución temporal y espacial.

Tabla 5. Especificaciones del dominio de las salidas de RegCM4.7.

Tamaño del dominio en puntos	576 x 346
Resolución espacial	25 km
Niveles verticales	23

La Tabla 6 enlista las simulaciones del RegCM4.7.1 que fueron utilizadas para la elaboración de este trabajo. Cada experimento indica el periodo de simulación, los distintos institutos involucrados y los modelos o reanálisis usados como condiciones iniciales y de frontera. Todos los experimentos comparten la misma configuración de parametrizaciones del modelo regional, al igual que la resolución temporal y espacial.

Tabla 6. Simulaciones del RegCM4.7.1 utilizadas en este trabajo. El experimento del 2018 se hizo en CICESE como parte de esta tesis y las salidas de las otras simulaciones se obtuvieron del ICTP.

Simulación	Periodo	Condiciones iniciales y de frontera	Instituto
Evaluación con observaciones	2018	ERA-Interim	CICESE
Control	1981-2010	ERA-Interim	ICTP
Evaluación histórica	1981-2010	GFDL-ESM2M	ICTP
		MPI-ESM-MR	
		HadGEM2-ES	
Proyecciones futuras (RCP8.5)	2021-2050	GFDL-ESM2M	ICTP
		MPI-ESM-MR	
		HadGEM2-ES	

2.4. Evaluación de los reanálisis y el modelo regional

Primero se evaluó la habilidad del modelo regional RegCM4.7.1 y los reanálisis con respecto a los datos horarios de las 7 torres de vientos para el 2018. Para esta comparación se seleccionó el punto de malla más cercano a las torres del modelo regional y los reanálisis para resaltar el impacto de la simplificación del terreno en la intensidad del viento. Debido a que contamos con información del viento a diversas alturas, fue necesario extrapolar la magnitud de los vientos a un mismo nivel de las observaciones, reanálisis y el modelo regional. Se seleccionó la altura de 100 metros para extrapolar las bases de datos debido a que el RegCM4.7.1 cuenta con datos de 10 y 100 m, considerándose el último como cercano a la altura de las turbinas. Para la extrapolación se supuso que había condiciones neutras en el sitio y se utilizó el promedio ponderado de los resultados de dos funciones que describen el perfil de viento cerca de superficie:

- Ley de potencia:

$$U_1 = U_2 \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^\alpha \quad (1)$$

- Perfil logarítmico:

$$U_1 = U_2 \left(\frac{\ln(z_1-d)/z_0}{\ln(z_2-d)/z_0} \right) \quad (2)$$

donde U y z son la magnitud del viento y la altura, respectivamente en dos niveles (indicados por los subíndices 1 y 2) y α es el coeficiente de fricción o el exponente de Hellman, el cual está en función de la rugosidad, orografía y estabilidad atmosférica (Emeis, 2013). En la ecuación (2), z_0 es la rugosidad del sitio y d es el desplazamiento del plano cero, el cual representa la altura donde la magnitud del viento es igual a cero. A partir del perfil del viento en la altura (mínimo dos niveles conocidos), se ajustó una curva exponencial (ec. 1) y logarítmica (ec. 2) a las magnitudes del viento por cada paso de tiempo en cada base de datos. Se evaluó la regresión de las dos ecuaciones en cada tiempo y se les asignó un peso para poder realizar el promedio ponderado de las regresiones a la altura deseada (ver Johansson, 2019). Después de haber estandarizado las bases de datos a una misma altura, se evaluó el desempeño del modelo regional y los reanálisis calculando diversos errores estadísticos (ver sección 2.4.1); también se compararon los ciclos diurnos y anuales de la magnitud del viento, las direcciones de las distribuciones del viento y su dirección predominante utilizando rosas de viento climatológicas, y el comportamiento de la distribución de Weibull ajustada cerca de cada una de las 7 torres. La distribución de Weibull es una función de densidad de probabilidad (pdf) particularmente usada para la representación de la distribución de

frecuencias de la magnitud de los vientos horizontales (Tuller y Brett, 1984) y cuya expresión matemática de dos parámetros se representa por:

$$f(u) = \frac{\kappa}{A} \left(\frac{u}{A}\right) \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^\kappa\right) \quad (3)$$

donde $f(u)$ es la frecuencia de la magnitud del viento u , A es el parámetro de escala relacionado con la media de la distribución y κ es el parámetro de forma que describe la asimetría de la función. Para la evaluación sólo se consideró la similitud de las distribuciones de frecuencias del viento con la función de Weibull. Para esto, los parámetros de forma y escala se obtuvieron a partir de la metodología propuesta en el Atlas Eólico Europeo (Troen y Lundtang Petersen, 1989), la cual ajusta la función de distribución en cada sector de las direcciones del viento utilizando el método de momentos y dando mayor importancia al ajuste en las colas de la distribución.

La evaluación con las observaciones disponibles para el año 2018 se consideró como suficiente para determinar la habilidad del modelo regional. Sin embargo, es fundamental explorar el comportamiento del modelo en un periodo mayor para comparar periodos climatológicos en el futuro; además, el objetivo principal del trabajo es determinar el cambio en la circulación de los vientos, por lo que también es necesario analizar un dominio espacial más allá de los siete puntos observacionales. Por tal motivo, se realizó una intercomparación del modelo regional RegCM4.7 forzado con ERA-Int 75 (RegERAInt) con respecto a tres reanálisis globales (ERA-Interim 75, MERRA2 y ERA5) y uno regional (NARR) durante el periodo histórico 1981-2010 en el dominio CORDEX-CAM (Centroamérica y México). La evaluación consistió en la comparación del sesgo de las climatologías estacional y anual del viento a 10 m de RegERAInt con respecto a cada uno de los reanálisis (i.e. RegERAInt menos reanálisis). Para lo anterior, se realizó una interpolación conservativa (Jones, 1999) de las salidas de RegERAInt a la resolución de cada uno de los reanálisis. Asimismo, se evaluaron de manera cualitativa los patrones de circulación del viento considerando congruencia entre los patrones sinópticos predominantes entre RegERAInt y los reanálisis.

Por último, se evaluaron las climatologías estacionales y anuales del viento a 100 m de altura de cada una de las salidas regionalizadas de RegCM forzado con tres modelos de circulación global (GFDL-ESM2M, MPI-ESM-MR y HadGEM2-ES) en el dominio CORDEX-CAM en el periodo histórico. Se calcularon los sesgos estacionales y anuales con respecto a la simulación histórica de referencia (RegERAInt) la cual se comparó anteriormente con los reanálisis. Asimismo, se calculó un ensamble multimodelo (RegEnsamble) dándole igual peso a cada modelo en la creación del ensamble para su posterior evaluación.

2.4.1. Errores estadísticos

Para determinar objetivamente el desempeño de los reanálisis y el modelo regional durante 2018, se calcularon los errores estadísticos: error medio absoluto, error cuadrático medio, error absoluto circular y el porcentaje de ángulo acertado de las simulaciones con respecto a las observaciones de las torres en diferentes escalas de tiempo. A continuación, se detallan cada una de las métricas utilizadas (donde Ws es la magnitud y Wd es la dirección del viento):

- Error absoluto medio (*MAE*): es la magnitud promedio de los errores entre las observaciones y reanálisis/simulaciones.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |W_{S_{sim}}(i) - W_{S_{torre}}(i)| \quad (5)$$

- Error cuadrático medio (*RMSE*): es el promedio de los errores al cuadrado, el cual da mayor peso a los errores extremos individuales.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_{S_{sim}}(i) - W_{S_{torre}}(i))^2} \quad (6)$$

- Error circular absoluto (*CAE*): Es la distancia angular promedio de las direcciones del viento entre las observaciones y las simulaciones.

$$CAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \min(|Wd_{sim}(i) - Wd_{torre}(i)|, 360 - |Wd_{sim}(i) - Wd_{torre}(i)|) \quad (7)$$

- Porcentaje de ángulo acertado (*PA*): es la frecuencia de acierto entre el ángulo simulado y el observado. El acierto se define si cae en una de las 16 categorías de la dirección de viento.

Las métricas de MAE y RMSE son positivas y pueden diagnosticar, en conjunto, las variaciones de los errores individuales. Esto es, entre mayor sean las diferencias entre estas métricas, mayor será la varianza de los errores individuales. El CAE varía entre 0 y 180°, y los valores cercanos a 0° indican una menor desviación con respecto al ángulo observado. El CAE también se calcula en forma del porcentaje de ángulos acertados, en donde los valores cercanos a 100% indican un buen desempeño del reanálisis o del modelo.

2.5. Caracterización del campo de viento

Para la identificación de los patrones espaciales predominantes del viento a 100 m de altura en México se utilizó la metodología de los mapas auto-organizados (SOMs por sus siglas en inglés). Los SOMs son una red neuronal artificial que usa un entrenamiento no supervisado e iterativo para organizar la información en un número de patrones especificado por el usuario (Kohonen, 2001); es decir, es una técnica de reducción de escala. Se seleccionó esta metodología en lugar de otras técnicas de agrupamiento y reducción de dimensiones debido a que genera la clasificación de una forma no lineal proyectando la función de densidad de probabilidad de una matriz multidimensional en una de dos dimensiones (Kohonen et al., 1996). Además, ya se han aplicado a México utilizando otras variables meteorológicas en diferentes niveles verticales y con otros fines obteniendo buenos resultados (Cavazos, 1999; Díaz-Esteban y Raga, 2018; Díaz-Esteban et al., 2020).

El entrenamiento de los SOMs consiste, primero, en construir un arreglo inicial de vectores de referencia (también conocidos como nodos) de forma aleatoria dada una topología preseleccionada (p.ej. topología rectangular de 3x5 nodos o 3x4 nodos). A continuación, se presenta el vector de entrada a cada uno de los nodos del arreglo y se calcula la distancia euclidiana entre los nodos. En este trabajo, el vector de entrada fueron las componentes U y V del viento redimensionadas, en latitud y longitud, a un vector de una dimensión para cada tiempo t . Después, se busca el nodo más similar (Best Matching Unit, BMU) al vector de entrada considerando la menor distancia calculada anteriormente. Este nodo ganador y sus adyacentes se ajustan y actualizan en función del vector entrante de acuerdo a la siguiente ecuación (Kohonen, 2001):

$$W_i(t + 1) = W_i(t) + \theta(t) \cdot (V(t) - W_i(t)) \quad (8)$$

donde $W_i(t)$ es un nodo dentro del arreglo, $\theta(t)$ es la razón de influencia del nodo ganador y $V(t)$ es el vector de entrada presentado. Para la razón de influencia del BMU se utilizó una función gaussiana que decae con el tiempo:

$$\theta(t) = \alpha(t) \cdot \exp\left(-\frac{dist^2}{2\sigma^2(t)}\right) \quad (9)$$

donde $dist$ es la distancia del nodo $W_i(t)$ al BMU y $\alpha(t)$ y $\sigma(t)$ son el factor de aprendizaje y radio de influencia respectivamente que decaen con cada iteración de forma lineal o exponencial. Para este trabajo

se utilizó una razón de decaimiento lineal para los factores $\alpha(t)$ y $\sigma(t)$. Una vez finalizado el ajuste del BMU y los nodos dentro de su influencia, se vuelve a repetir el proceso de selección del nodo más similar, pero con nuevos vectores entrantes. El entrenamiento de los SOMs finaliza cuando se alcanza el número de iteraciones establecido y el factor de aprendizaje decae hasta cero. La Figura 4 muestra un esquema general de la metodología de los mapas auto-organizados aplicado a un análisis climático (Cavazos, 1999). En este trabajo se utilizó un esquema similar con la diferencia de que los vectores de entrada son las componentes del viento. En Kohonen (2001) se puede encontrar información más detallada de la metodología de los mapas auto-organizados.

En este estudio se utilizó el software SOM-PAK (Kohonen et al., 1996) en su versión 3.1; los binarios se encuentran disponibles en la página oficial http://www.cis.hut.fi/research/som_pak/. Para entrenar los SOM se usaron, en conjunto, las componentes zonal y meridional del viento a 100 m de altura de las salidas tri-horarias de RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim 75 (RegERAInt) en el periodo histórico (1981-2010). Antes de entrenar los SOMs, se redujo el dominio de los datos de viento de RegERAInt a la extensión de un polígono rotado que abarcara los límites del territorio mexicano con la finalidad de que el SOM identificara vientos más locales (Figura 5) ya que si usáramos el dominio completo del CORDEX-CAM, los patrones a gran escala tendrían mayor influencia al momento de entrenar los SOMs.

Se evaluaron diversos arreglos de nodos (o topologías) (4x3, 4x5, 6x6 y 5x7) para determinar la mejor representación (y la más eficiente) de los patrones de viento en México. En el análisis de los resultados de estas topologías se consideró la generalización y la diversificación de los patrones, concluyendo que un arreglo del SOM de 4x3 cubría el rango óptimo de patrones de circulación representativos del territorio mexicano.

Una vez finalizado el entrenamiento de los SOMs, los nodos entrenados sirvieron de referencia para clasificar los vientos de RegERAInt al nodo que más se asemejara mediante la menor diferencia cuadrada entre los nodos entrenados y la información de entrada (ec. 8). El resultado principal del SOM son las fechas y horas de los vientos de RegERAInt que se clasificaron a cada nodo o patrón. Con esto, se realizaron análisis de frecuencia temporal (3-horaria y mensual) de cada patrón de vientos/nodo, se obtuvieron compuestos del viento promedio de cada patrón y de otras variables relevantes al fenómeno de estudio, como la presión a nivel del mar y la temperatura superficial usando las salidas de RegERAInt. Asimismo, se elaboraron compuestos de los campos de viento de cada patrón, o climatologías, en el dominio de CORDEX-CAM para explicar la circulación regional del viento en cada nodo y sus mecanismos asociados a una mayor escala.

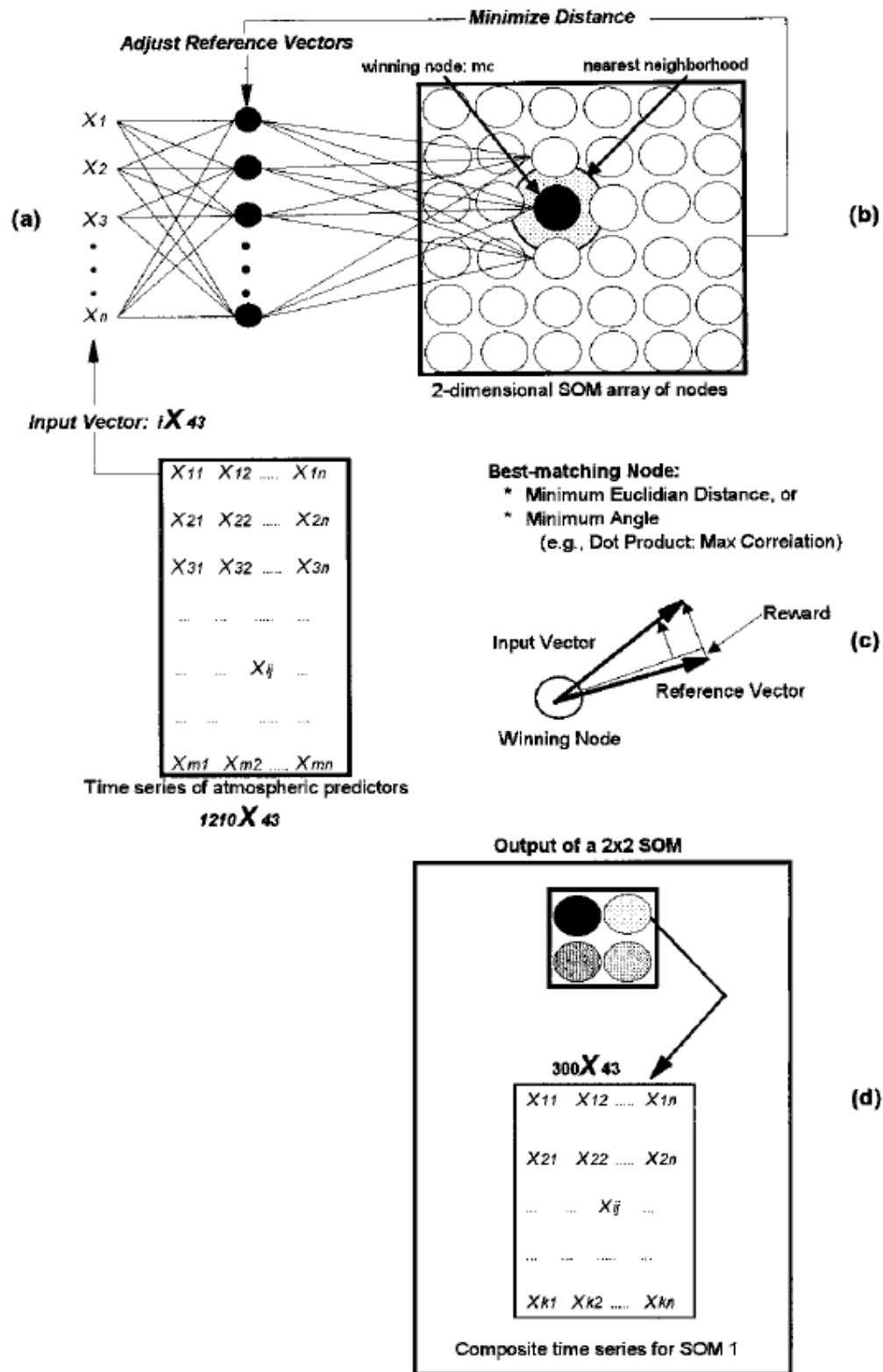


Figura 4. Esquema general de la metodología de los mapas auto-organizados. Tomada de Cavazos (1999). Donde (a) serían las series de tiempo de las velocidades u y v redimensionadas en latitud y longitud, (b) entrenamiento no supervisado de los mapas auto-organizados, (c) nodo ganador y (d) ejemplos de compuestos.

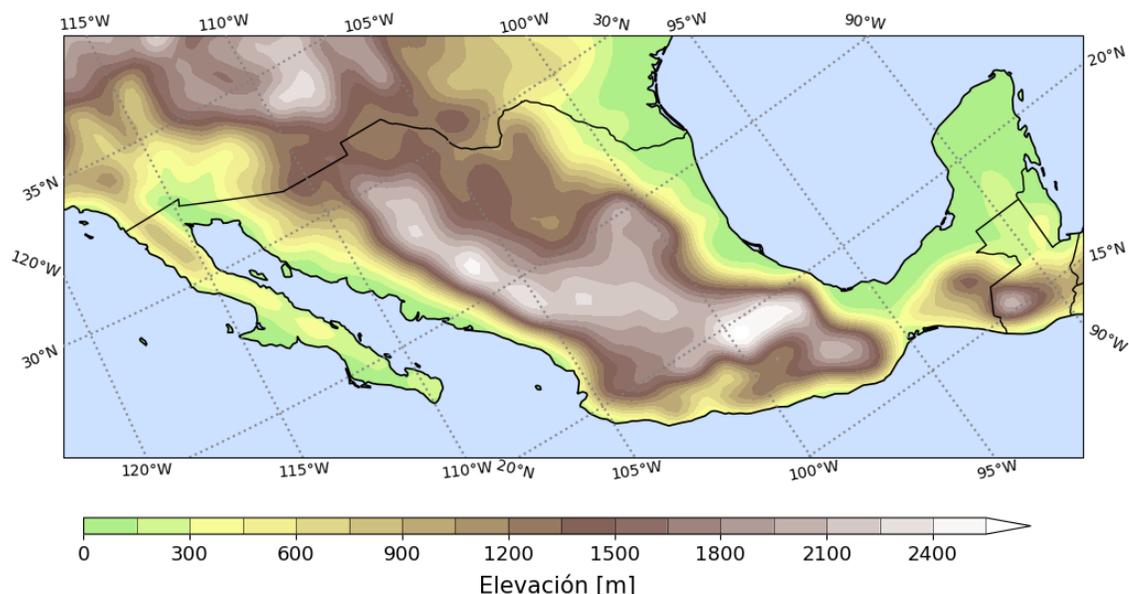


Figura 5. Dominio utilizado para entrenar el mapa auto-organizado (SOM) a una resolución de 25 km. Topografía de RegCM.

2.6. Proyecciones futuras

Los cambios futuros del viento a 10 y 100 m se obtuvieron a partir de las salidas regionalizadas del RegCM4.7.1 forzado con los MCG (RegHAD, RegGFDL y RegMPI) bajo el escenario de altas emisiones (RCP8.5) para un futuro cercano (2021-2050). Se obtuvieron los cambios futuros por cada modelo y el ensamble multimodelo (RegEnsamble). Las proyecciones futuras del viento se presentan como cambios o anomalías relativas al periodo de referencia 1981-2010 (i.e., diferencia entre el periodo del futuro cercano menos el periodo de referencia). El análisis de las proyecciones se dividió en tres aspectos importantes:

- Cambios relativos en las 7 torres. Se investigaron los cambios en la magnitud y dirección del viento mensual y estacional en los puntos de malla cercanos a las 7 torres.
- Cambios relativos en el dominio CORDEX México-Centroamérica. Se calcularon las anomalías estacionales y anuales de la magnitud del viento en el dominio CORDEX CAM.
- Cambios relativos en la frecuencia de los patrones de circulación del viento. Se mapearon las salidas de los modelos RegHAD, RegGFDL y RegMPI con los SOMs entrenados previamente (RegERAInt) para obtener las frecuencias de cada patrón de vientos por modelo en el periodo histórico. Después se repitió lo anterior pero ahora para el periodo futuro. De esta manera se obtuvieron los cambios futuros a partir de las diferencias en la frecuencia de los patrones.

Capítulo 3. Resultados

3.1. Evaluación del viento con observaciones del 2018

Se hizo una evaluación inicial de las características del viento a 100 m de los reanálisis y el modelo climático regional RegCM4.7.1 para el punto de malla más cercano (de las bases de datos) a cada una de las siete torres eólicas en México para el año 2018. Para esta evaluación se realizó un post-procesamiento con las ecuaciones 1 y 2 (ver sección 2.4) para obtener la magnitud del viento a 100 m de todas las bases de datos. La Figura 6 muestra el comportamiento del ciclo diurno y anual de la magnitud del viento a 100 m de altura en La Rumorosa, Baja California. De acuerdo con los datos del mástil, el ciclo diurno presenta magnitudes que oscilan entre 6.5 hasta 7 m/s con las mayores velocidades en las horas de la tarde, mientras que en el ciclo anual el máximo de la velocidad promedio se observa en abril con 8 m/s. RegCM forzado con ERA-Int logra capturar el comportamiento de los dos ciclos en magnitud y forma (con ligeras sobre-estimaciones), mientras que los reanálisis únicamente logran reproducir la distribución horaria y estacional, ya que en términos de magnitud se observan sesgos negativos entre 2 y 4 m/s con referencia a las observaciones. En las horas de la tarde los errores son ligeramente menores (Figura 6a). La Figura 6c muestra la comparación de las funciones de densidad de probabilidad de las magnitudes del viento a 100 m de altura. La diferencia entre la función ajustada y el histograma de los datos del mástil es debido a que se da un mayor peso al ajuste en las velocidades más altas de la distribución. En este caso, el RegCM simula mejor la distribución observada que las funciones ajustadas de los 3 reanálisis, los cuales subestiman las magnitudes del viento en toda la distribución (principalmente en las magnitudes promedio), llegando sólo a velocidades de 10 m/s mientras que las colas de las observaciones alcanzan hasta los 25 m/s. El modelo regional logra capturar la distribución de vientos mayores a 12.5 m/s mientras que los reanálisis los subestiman significativamente.

La Rumorosa presenta vientos predominantes del oeste y los más intensos y frecuentes son de dirección oeste-suroeste, como se observa en la Figura 7. Sólo el Reanálisis ERA5 y RegCM logran capturar la distribución de frecuencias de los vientos de componente oeste observados en el mástil, aunque subestiman el porcentaje y las magnitudes del viento predominante en ambos casos.

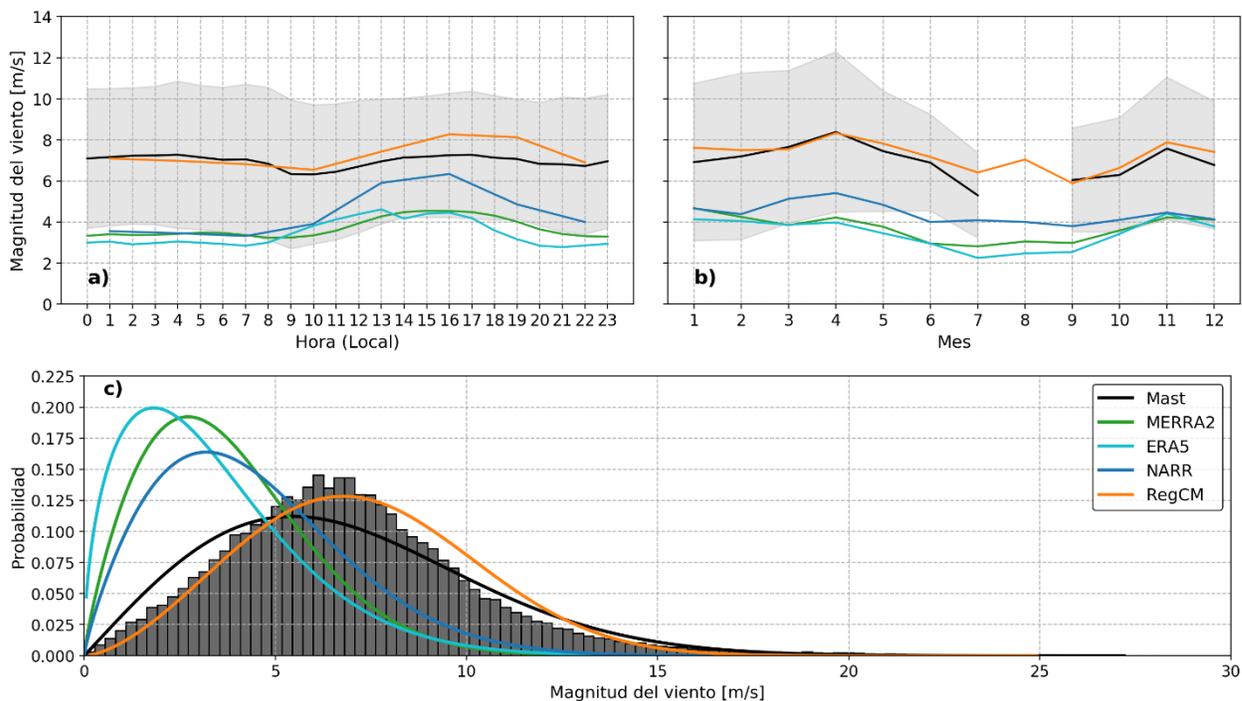


Figura 6. Intercomparación del viento a 100 m de altura en el mástil de la Rumorosa, Baja California durante 2018 con los datos de los puntos de malla más cercanos de los reanálisis (MERRA2, ERA5 y NARR) y el modelo regional RegCM4.7 forzado con ERAInt. (a) Ciclo diario, (b) ciclo anual y (c) distribución de densidad de probabilidad Weibull del viento. La región sombreada en (a) y (b) representa la desviación estándar de las observaciones. El histograma en (c) representa a las observaciones del mástil (Mast) y la curva negra, su ajuste.

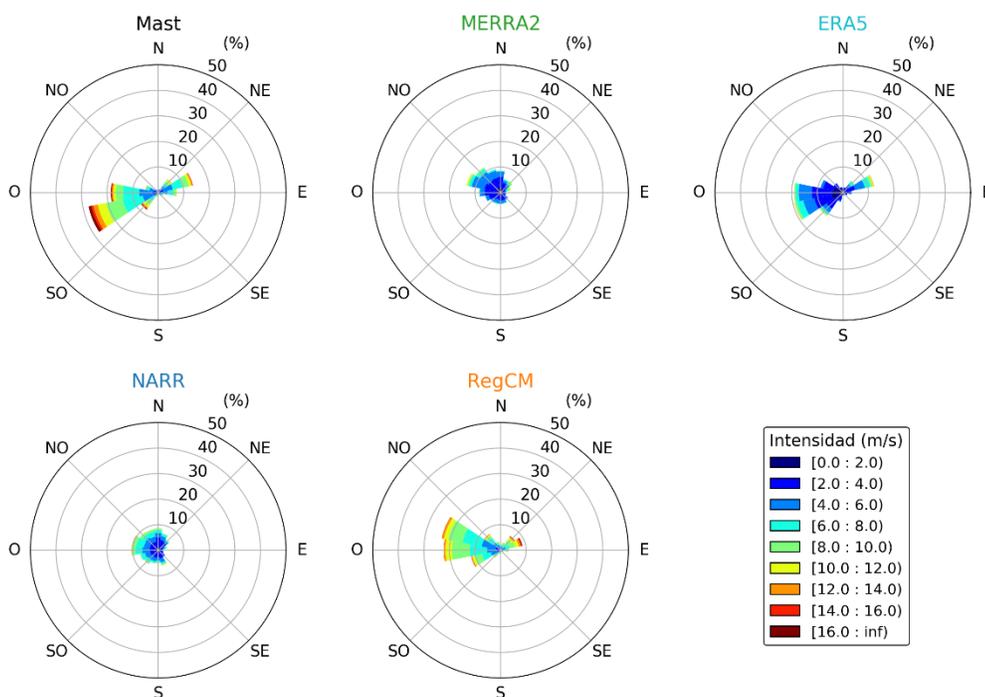


Figura 7. Comparación de rosas de viento (con datos horarios y tri-horarios) a 100 m de altura en el mástil de la Rumorosa, Baja California, los reanálisis, el modelo regional RegCM durante el año 2018.

El ciclo diurno del viento en San Fernando, Tamaulipas (Figura 8a), es más acentuado (más variación en las horas de la tarde) que en La Rumorosa (Figura 7a). Durante las horas de la noche y la mañana el viento es más débil (cerca de 6.5 m/s), mientras que la intensidad del viento aumenta a 9 m/s entre las 15 y las 17 hrs, cuando el contraste térmico entre el Golfo de México y la zona costera es mayor. Por otro lado, este sitio presenta vientos promedio mensuales entre 7 y 8 m/s casi todo el año, con excepción de septiembre que tiene un mínimo de 4 m/s. El mínimo en septiembre podría relacionarse con el máximo de lluvia en la región. Se esperaba que el desempeño de los reanálisis y el modelo regional fuera mejor en este lugar que en los otros sitios debido a la poca complejidad del terreno. Esto se corrobora con las Figuras 8a y 8b donde los reanálisis y el modelo regional presentan un acuerdo en la magnitud y forma de los ciclos horario y anual, con excepción del reanálisis NARR que sobrestima significativamente los vientos, especialmente los extremos (Figura 8c). Respecto a las distribuciones de densidad de Weibull, se pueden observar valores máximos de hasta 20 m/s y valores promedio de 7.5 m/s. El ajuste de las funciones de densidad de los reanálisis (con excepción del NARR) y el modelo regional tiene un comportamiento similar al de las observaciones. La distribución de la dirección del viento en la Figura 9 indica que la dirección predominante en San Fernando es la de los vientos alisios del sur-sureste, dirección que es capturada por los reanálisis y el modelo regional.

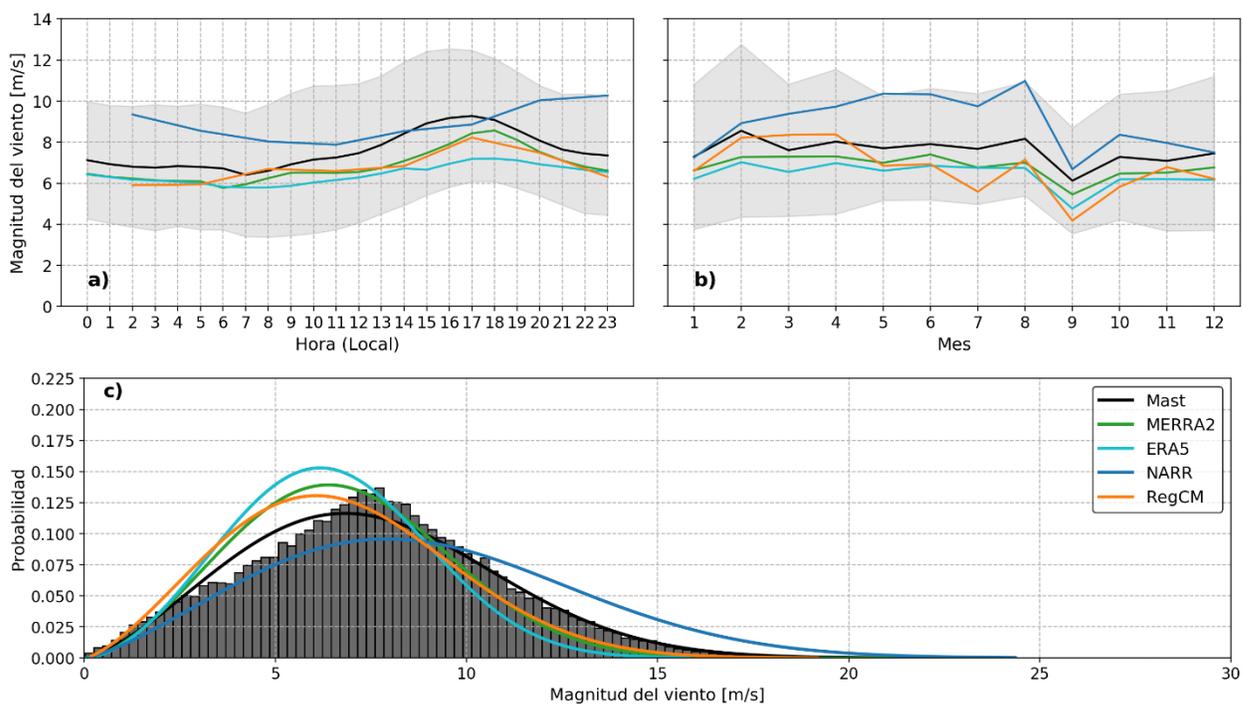


Figura 8. Igual que la Figura 6, pero para el mástil de San Fernando, Tamaulipas.

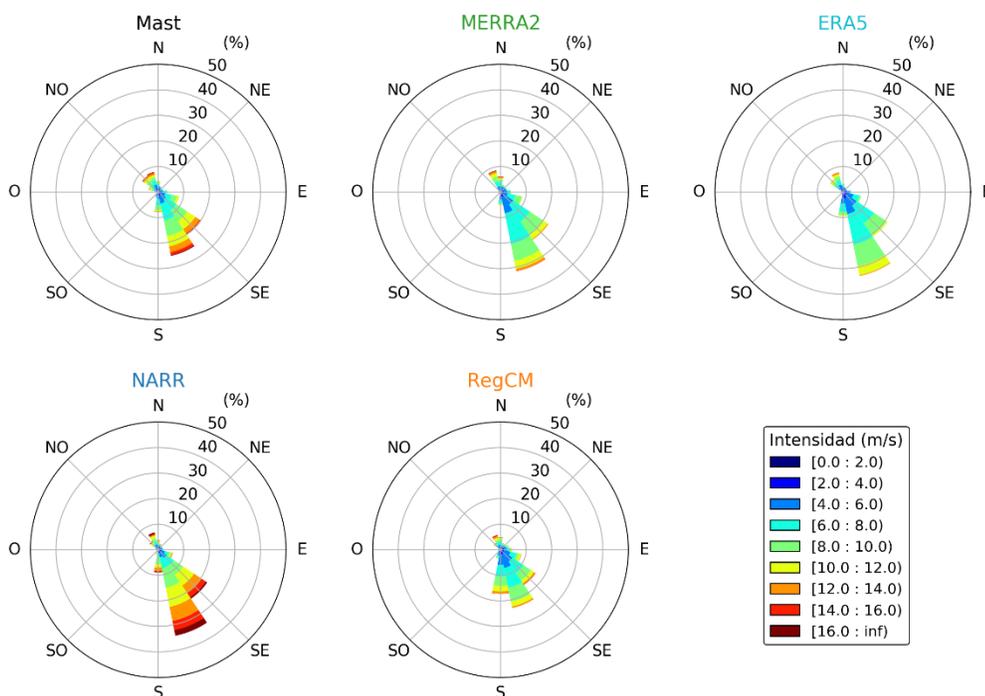


Figura 9. Igual que la Figura 7, pero para San Fernando, Tamaulipas.

La Ventosa, Oaxaca, se caracteriza por tener los vientos horarios y mensuales más intensos del país, razón por la cual ahí se localizan los parques eólicos más importantes de México. Al igual que San Fernando, presenta un ciclo horario muy marcado con mayores intensidades (hasta 11 m/s) entre las horas del mediodía y la tarde (Figura 10a). Debido a que este sitio presenta una orografía compleja, los reanálisis y el modelo regional presentan dificultades en reproducir el comportamiento diurno. A diferencia del caso de San Fernando, el reanálisis NARR es el que mejor describe el ciclo diurno en este sitio especialmente en la intensidad de los vientos. El ciclo anual (Figura 10b) muestra una variación mensual muy amplia que va desde grandes velocidades mensuales en los meses de invierno (14 m/s) caracterizados por el paso de frentes fríos y nortes lo que genera los vientos Tehuanos, hasta mínimos en junio (5 m/s) posiblemente asociados al desplazamiento al norte de la Zona de Convergencia Intertropical. Durante el periodo de la sequía intraestival en julio-agosto se observa un aumento significativo en los vientos (hasta 10 m/s), el cual es capturado por RegCM. A pesar de la resolución espacial del modelo regional y de la orografía compleja del sitio, el modelo logró capturar el ciclo anual del viento en magnitud y forma. Por su parte, los reanálisis logran reproducir el comportamiento del viento adecuadamente, pero con sesgos negativos de hasta 3 m/s en casi todos los meses con excepción del reanálisis NARR. El histograma de las observaciones (Figura 10c) en la Ventosa presenta una curva más elongada que los otros sitios, con probabilidades similares entre los 5 y los 13 m/s, lo que sugiere una persistencia de vientos favorables para la generación de energía

(> 7 m/s; Elliott y Schwartz, 1993). Los valores extremos alcanzan velocidades entre 15 m/s y 30 m/s. La función ajustada del reanálisis NARR fue la más parecida a las observaciones, mientras que MERRA2, ERA5 y RegCM subestimaron la probabilidad en los vientos mayores a 7 m/s. De acuerdo con la Figura 11, los vientos predominantes en la Ventosa son del nor-noroeste, mientras que los reanálisis y modelo regional muestran principalmente vientos del norte.

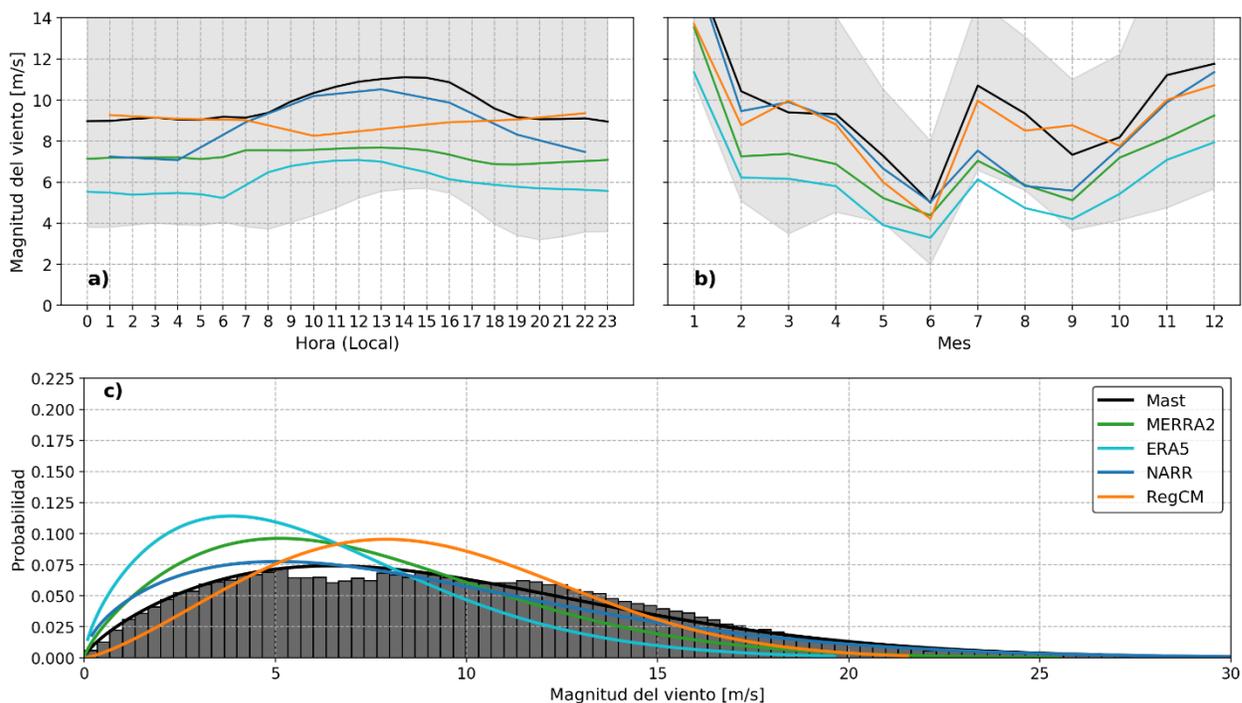


Figura 10. Igual que la Figura 6, pero para el mástil de la Ventosa, Oaxaca.

De acuerdo con el análisis comparativo de los tres sitios se puede resumir lo siguiente: El modelo regional RegCM4.7.1 forzado con ERA-Int 75 en 2018 es el que muestra menores errores en la distribución de las magnitudes del viento y los ciclo diurno y anual. NARR fue el del peor desempeño en dos de los tres sitios estudiados sobrestimando ampliamente las magnitudes de los vientos, excepto en la Ventosa donde simuló mejor algunas características del viento. ERA5 y RegCM4.7.1 fueron las bases de datos que mejor pudieron reproducir la distribución de las direcciones del viento y su viento predominante.

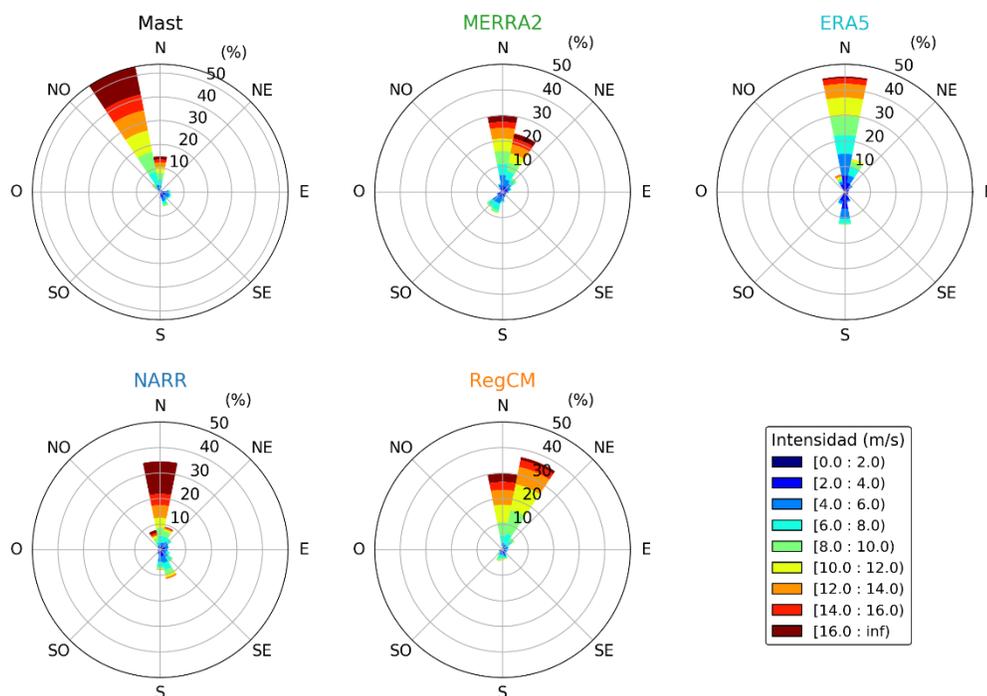


Figura 11. Igual que la Figura 7, pero para la Ventosa, Oaxaca.

3.1.1. Análisis de errores (2018)

Para la evaluación objetiva de la magnitud del viento de las bases de datos con respecto a las observaciones del 2018, se calcularon los errores descritos en la sección 2.4.1, utilizando la mayor resolución temporal disponible (horaria o tri-horaria) de los vientos instantáneos a 100 m de altura para cada una de las 7 torres eólicas.

De acuerdo con la Figura 12, los errores más pequeños de la magnitud del viento se obtuvieron, como se esperaba, en los sitios con terreno más plano (Mérida, Yucatán y San Fernando, Tamaulipas) y los mayores errores en los sitios con orografía compleja (La Rumorosa, Baja California y La Ventosa, Oaxaca). Los reanálisis y el RegCM muestran errores similares en promedio, pero en los tres sitios de mayor interés en este trabajo (La Rumorosa, La Ventosa y San Fernando), RegCM y ERA5 presentan errores menores, posiblemente debido a su resolución espacial más fina, 25 y 31 km, respectivamente. También se hizo una evaluación mensual de la magnitud del viento; para esto se calcularon las correlaciones (Tabla 7) y el error MAE (Tabla 8) para los promedios mensuales del viento a 100 m de altura en las 7 torres. Nuevamente resaltan el reanálisis ERA5 con las mejores correlaciones, seguido del RegCM, mientras que NARR tiene las correlaciones mensuales más pequeñas. Por otra parte, el RegCM presenta los errores más pequeños en

la magnitud del viento mensual en los 7 sitios, mientras que el reanálisis ERA5 es, en general, el que presenta los errores más grandes (Tabla 8). Es decir, aunque ERA5 presente una muy buena correlación, tiene sesgos grades, por lo tanto, RegCM es el que logra capturar mejor las métricas de la magnitud del viento.

Los errores en la dirección del viento (Figura 13), muestran resultados similares a los de la magnitud; es decir, las bases de datos mostraron un mejor acierto en el ángulo horario y tri-horario en los los sitios que se localizan en las planicies costeras del Golfo de México (San Fernando y Yucatán) y lo opuesto ocurrió en los sitios con orografía compleja. ERA5 reprodujo mejor la dirección del viento horario en los 7 sitios.

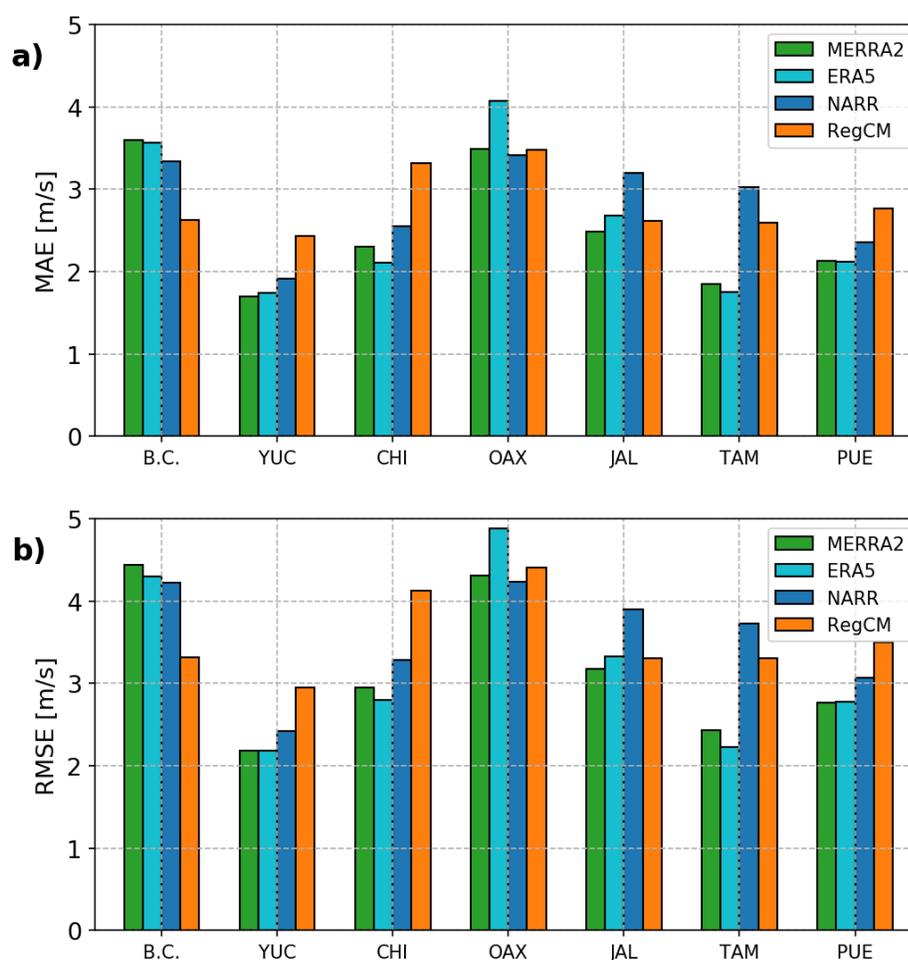


Figura 12. (a) Error absoluto medio (MAE) de la magnitud de los vientos instantáneos horarios (MERRA2 y ERA5) y tri-horarios (RegCM y NARR) a 100m de altura con respecto a cada uno de los 7 sitios observacionales (mástil) en 2018. (b) Igual que (a), pero para el error de la raíz cuadrada media (RMSE). Los sitios son: B.C. (La Rumorosa), YUC (Mérida), CHI (Cuauhtémoc), OAX (La Ventosa), JAL (Ojuelos), TAM (San Fernando) y PUE (Tepexi).

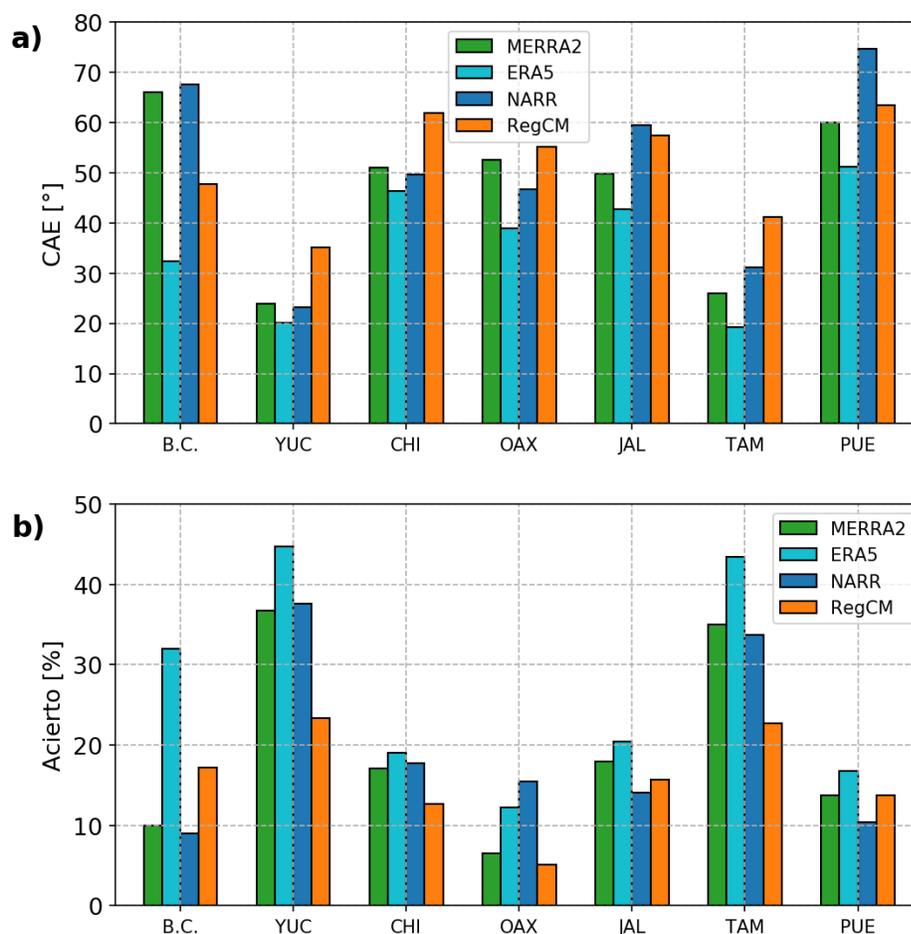


Figura 13. (a) Error circular absoluto de la dirección del viento instantáneo de los reanálisis y el modelo regional con respecto a cada uno de los 7 sitios observacionales en 2018. (b) Igual que en (a), pero para el porcentaje de acierto en la dirección del viento. Símbolo de los sitios como en la Figura 13.

Tabla 7. Coeficiente de correlación de Pearson de la magnitud del viento promedio mensual a 100 m de altura de los mástiles observacionales con los tres reanálisis y el modelo regional. Los valores en negritas indican las correlaciones más altas en cada mástil. Todos los valores son significativos al 95%, excepto los indicados con asterisco.

Mástil eólico	MERRA2	ERA5	NARR	RegCM4.7.1
La Rumorosa, B.C.	0.67	0.78	0.81	0.89
Mérida, Yucatán	0.84	0.96	0.79	0.85
Cauhtémoc, Chihuahua	0.87	0.89	0.90	0.87
La Ventosa, Oaxaca	0.95	0.97	0.92	0.94
Ojuelos, Jalisco	0.84	0.82	0.45*	0.35*
San Fernando, Tamaulipas	0.90	0.94	0.73	0.78
Tepexi, Puebla	0.81	0.98	0.61*	0.84

Tabla 8. Error absoluto medio (MAE) de la magnitud del viento promedio mensual a 100 m de altura durante 2018 con referencia a los mástiles de los siete sitios. Los valores en negritas indican el menor error en cada sitio.

Mástil eólico	MERRA2	ERA5	NARR	RegCM4.7.1
La Rumorosa, B.C.	3.19	3.42	2.50	0.39
Mérida, Yucatán	0.40	1.36	1.34	2.07
Cuauhtémoc, Chihuahua	0.72	1.01	0.52	1.90
La Ventosa, Oaxaca	2.43	3.68	1.11	1.09
Ojuelos, Jalisco	1.58	2.33	2.67	0.55
San Fernando, Tamaulipas	0.75	1.15	1.37	1.00
Tepexi, Puebla	1.01	1.58	0.71	1.28

3.2. Evaluación histórica del viento (1981-2010)

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación climatológica de las salidas de RegCM4.7.1 forzado con ERA-Int en el periodo histórico (1981-2010) con respecto al reanálisis ERA5. En la Sección 3.2.1 se describen los análisis históricos de la magnitud y distribución de viento en los puntos de malla más cercanos a los tres sitios de mayor interés (La Rumorosa, San Fernando y la Ventosa). En la Sección 3.2.2 se muestra la intercomparación de las climatologías estacionales del viento a 10 y 100 m de altura del modelo regional y los reanálisis en el dominio CORDEX Centroamérica y México (CORDEX-CAM). Por último, se analizan las climatologías estacionales de las salidas de RegCM4.7.1 forzado con tres modelos globales (GFDL-ESM2M, MPI-ESM-MR y HadGEM2-ES) en el mismo dominio espacial.

3.2.1. Intercomparación del viento cerca de las torres

De acuerdo con la evaluación del 2018 presentada en la sección anterior, las bases de datos que mejor reprodujeron el viento observado fueron el reanálisis ERA5 y el modelo regional RegCM. Por tal motivo y debido a que solo se pudo realizar la evaluación con las observaciones para ese año, que era el único disponible al inicio de esta tesis, se seleccionó al reanálisis ERA5 como referencia para comparar con las

salidas de RegCM4.7.1 forzado con ERA-Int (RegERAInt) en el periodo histórico. Cabe mencionar que en el análisis de los sitios no se inspeccionaron las diferencias en magnitud de las dos bases de datos, debido a que RegCM4.7.1 fue el de mejor desempeño en términos de magnitudes mensuales durante 2018.

La Figura 14a nos muestra el ciclo anual de las velocidades mensuales a 100 m de altura para el sitio de la Rumorosa en el periodo histórico (1981-2010). Se observa que no existe una similitud en el patrón del ciclo anual del viento de ERA5 y RegERAInt. Además, el análisis de la serie de velocidades mensuales del viento (30 años) muestra un coeficiente de correlación de Pearson casi nulo ($r=0.05$) para este sitio. La evaluación con las observaciones del 2018 mostró algo similar (Figura 6); ERA5 subestimó significativamente la intensidad de los vientos del 2018, mientras que RegERAInt capturó mejor la distribución de densidad de probabilidad observada. Los vientos de la climatología de RegERAInt varían entre 7.5 y 9.3 m/s y son en promedio 4 m/s mayores que en ERA5; la mayor diferencia en magnitud viene de los vientos del oeste. Al igual que en la evaluación de 2018, las distribuciones históricas de la dirección del viento en la Figura 14b muestran una concordancia adecuada entre ERA5 y RegERAInt con una dirección preferente del oeste en la Rumorosa; la ocurrencia de los vientos del oeste del modelo regional es 15% más frecuentes que en la de ERA5.

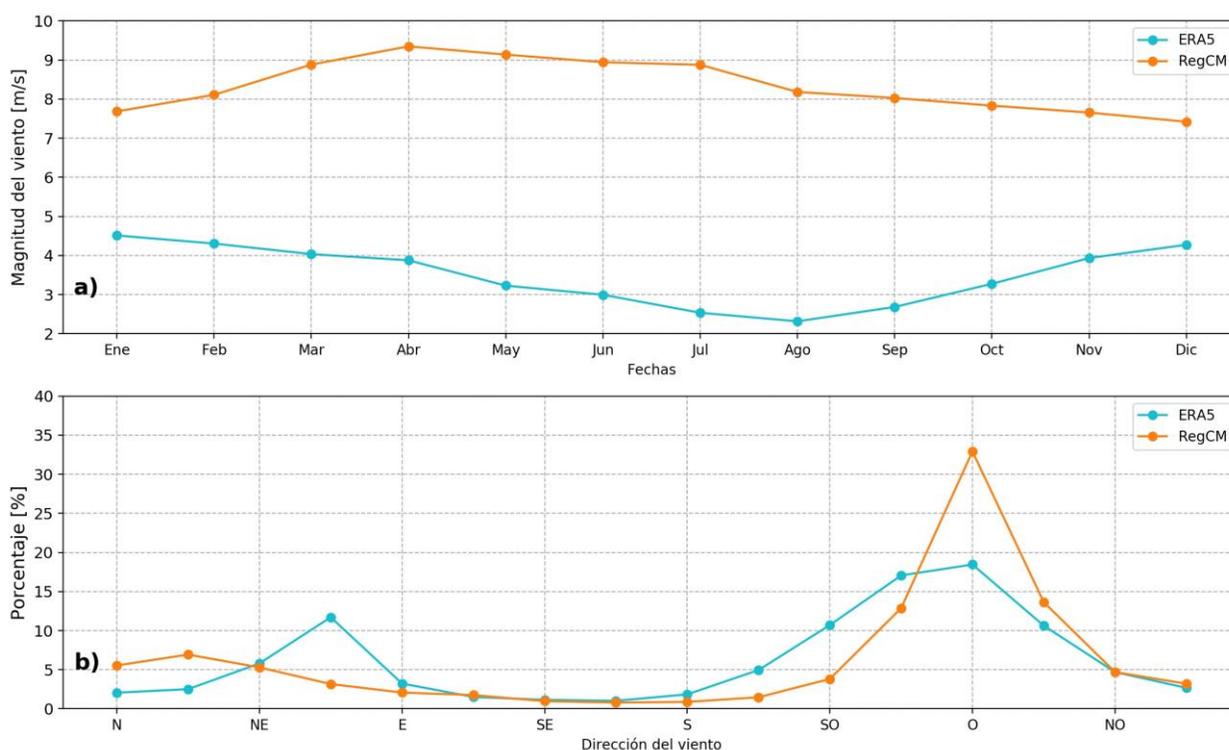


Figura 14. Ciclo anual (a) y porcentaje de la dirección del viento (b) a 100 m de altura del reanálisis ERA5 y el modelo RegCM forzado con ERA-Interim en el punto de malla más cercano a la Rumorosa, B.C., para el periodo 1981-2010.

En el sitio de San Fernando, ERA5 y RegERAInt lograron tener un mejor acuerdo en el comportamiento del ciclo anual (Figura 15a) además de una correlación de $r=0.70$ en las series mensuales. Por las características del terreno plano, las diferencias en la magnitud del viento son mucho menores que las observadas en la Rumorosa; a pesar de eso, ERA5 nuevamente simula intensidades del viento menores (1 m/s menor). Los vientos predominantes en San Fernando son los Alisios con dirección sur-sureste (Figura 15b).

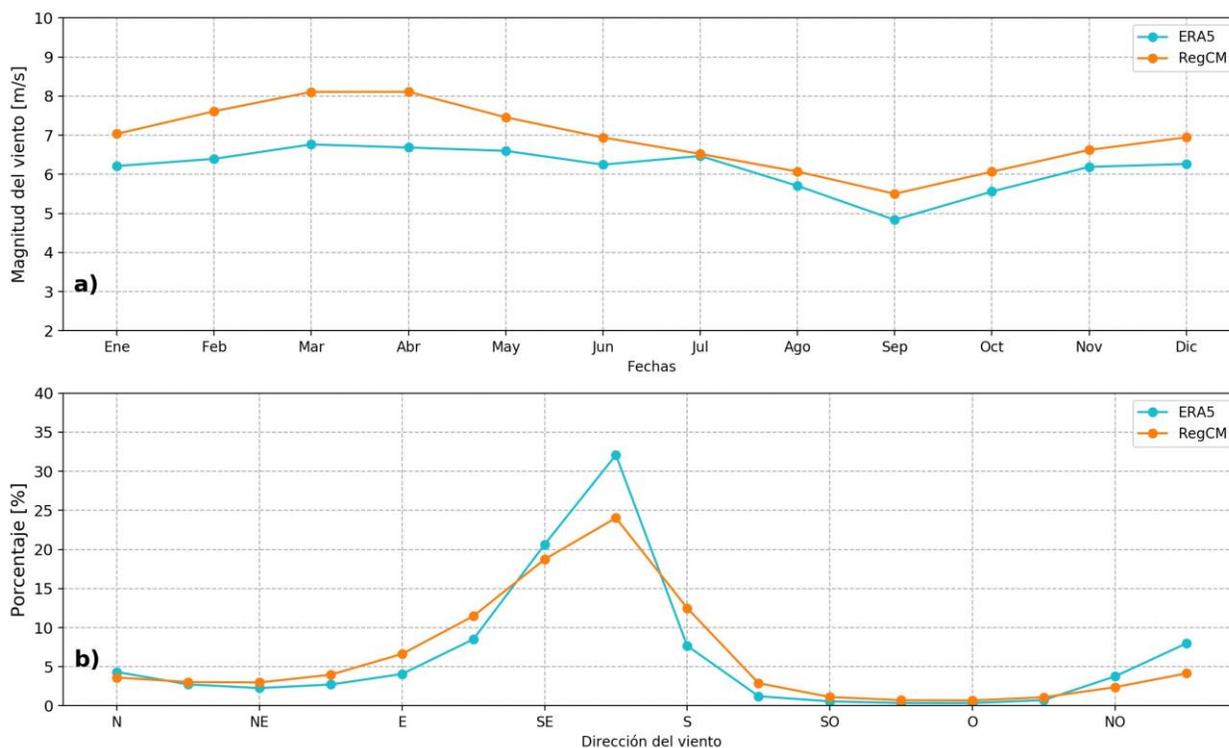


Figura 15. Igual que la Figura 14, pero para los puntos de malla cercanos a San Fernando, Tamaulipas.

En La Ventosa, el acuerdo de los dos ciclos anuales (de ERA5 y RegCM) también es relativamente similar logrando simular el comportamiento de los vientos más frecuentes del norte (Figura 16) en los meses de invierno y vientos relativamente más débiles del sur en los meses de verano. Asimismo, las dos series de promedios mensuales muestran un buen acuerdo ($r=0.83$). El comportamiento de la distribución de la dirección del viento de las dos bases es muy similar, con vientos más frecuentes del norte y del sur (Figura 16b). Para las demás torres (Figura 2), ERA5 y RegERAInt presentan correlaciones mensuales mayores a 0.68.

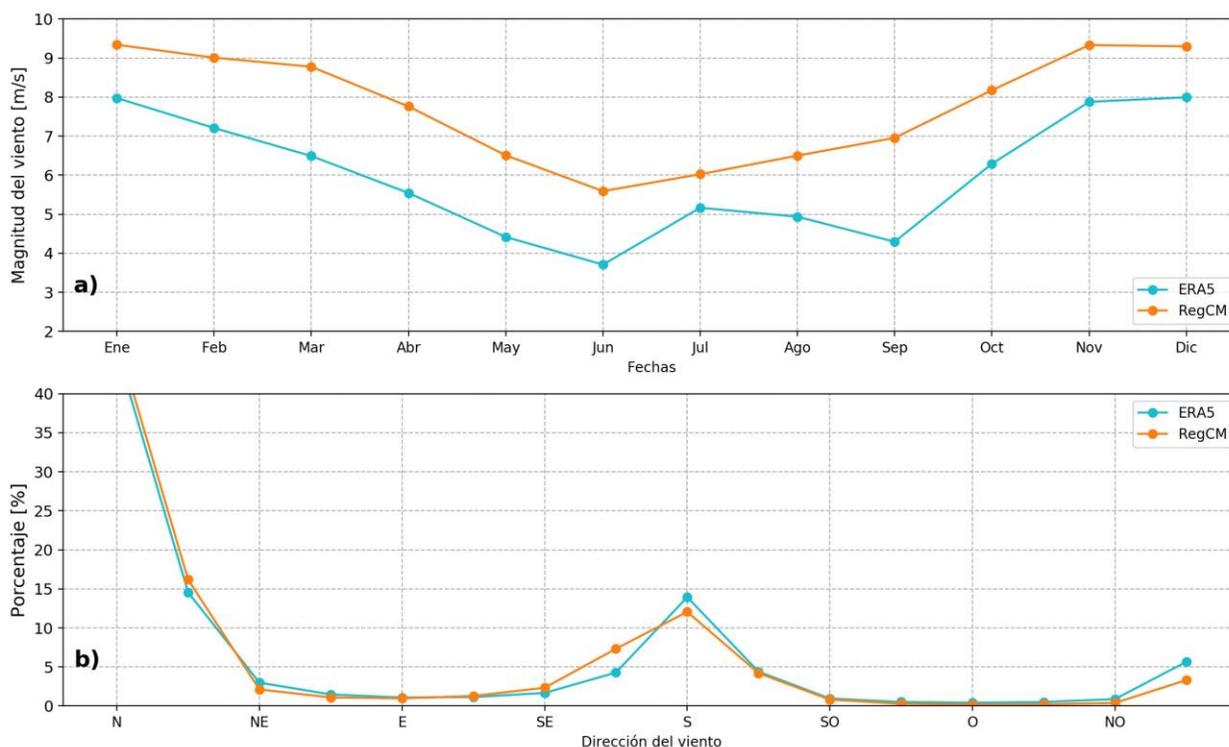


Figura 16. Igual que la Figura 14, pero para los puntos de malla cercanos a la Ventosa, Oaxaca.

3.2.2. Intercomparación espacial en el dominio CORDEX-CAM

Aunque nuestro principal interés son los vientos a 100 m de altura, pocos reanálisis tienen este nivel vertical. Únicamente el reanálisis ERA5 tiene disponible este nivel en el dominio de interés, por lo que para realizar una intercomparación con diversas bases de datos de vientos utilizamos el nivel de 10 m. La Figura 17 muestra la intercomparación de los vientos estacionales y anuales a 10 m de los reanálisis y RegERAInt en el dominio CORDEX-CAM para el periodo histórico. Se puede observar que los reanálisis y RegERAInt logran reproducir los diversos patrones de circulación del viento en el dominio, destacando principalmente los sistemas subtropicales de alta presión en el Pacífico Norte y Atlántico Norte (Alta de Hawái y Azores, respectivamente), los vientos alisios y los vientos intensos del jet del Caribe de niveles bajos (CLLJ, por sus siglas en inglés). El principal problema que presenta NARR es la dirección de los vientos ya que tiene direcciones muy distintas en algunas regiones, por ejemplo, la región del jet del Caribe, probablemente debido a la cercanía de la frontera sur del dominio. En general, durante el periodo climatológico (1981-2010) todas las bases de datos, a excepción del reanálisis NARR, son muy consistentes en la dirección del viento a 10 m y en especial en las regiones de los sistemas semipermanentes. Como era de esperarse, las mayores discrepancias en la dirección del viento son en las regiones del continente.

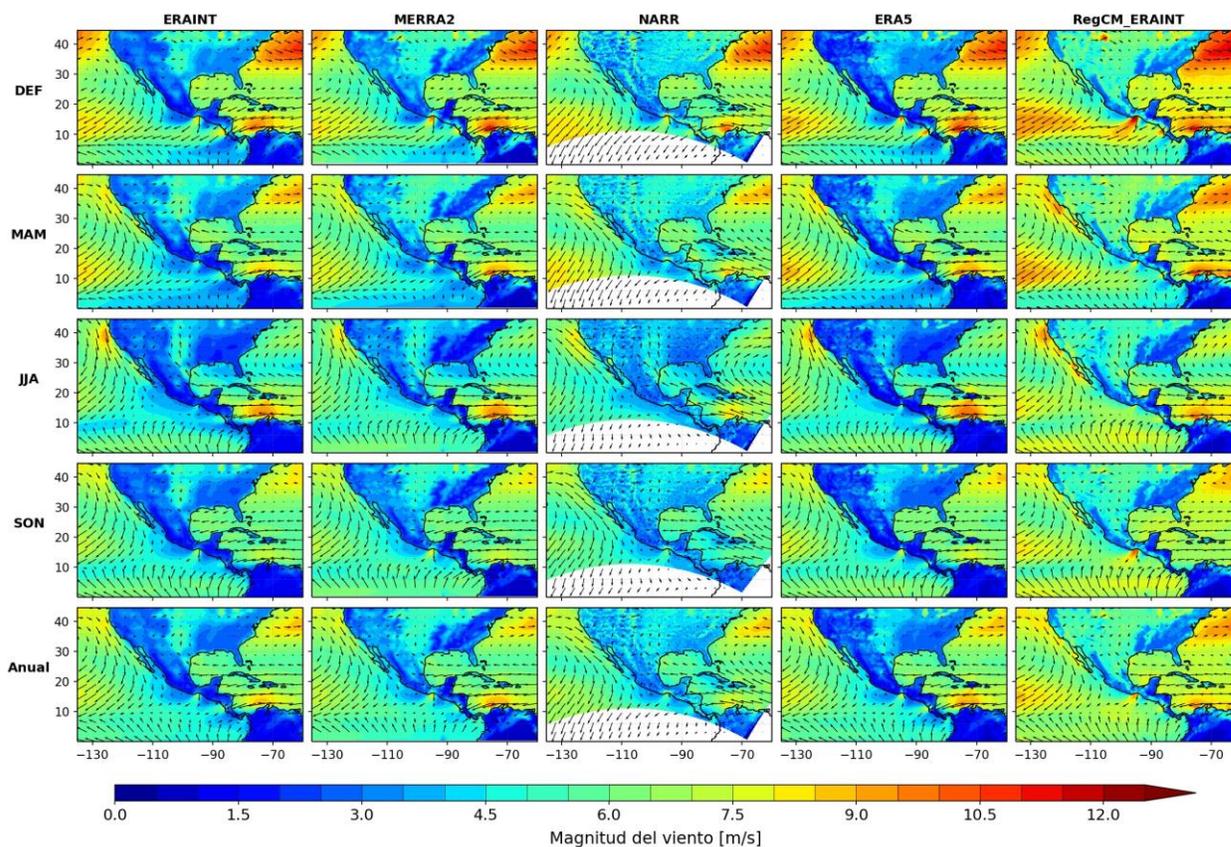


Figura 17. Intercomparación de la climatología promedio del viento estacional a 10 m de altura en el periodo de referencia (1981-2010) en el dominio CORDEX-CAM de cuatro reanálisis y el RegCM forzado con ERA Interim. Los vectores y colores indican la dirección y magnitud (m/s) del viento, respectivamente.

En relación a la magnitud del viento, RegERAInt difiere de las demás bases de datos ya que presenta magnitudes del viento mayores en las regiones continentales y mucho más intensas en las regiones con orografía compleja (región occidental de E.U.A. y las Sierras Madre de México). Para determinar estas diferencias, se calcularon los sesgos de la magnitud del viento a 10 m con respecto a cada uno de los reanálisis en el periodo histórico (Figura 18). En las regiones oceánicas se observan diferencias en magnitud del orden de 1 m/s, mientras que en continente varían desde 0.5 m/s en las zonas planas, hasta diferencias mayores a 4 m/s en regiones con orografía compleja. RegERAInt presenta menores diferencias con el reanálisis MERRA2 en la mayor parte del dominio y en las cuatro estaciones. Por el contrario, las mayores diferencias entre RegERAInt y ERA5 se encuentran especialmente en las regiones montañosas (> 4 m/s). Las diferencias espaciales que se observan entre RegERAInt y los reanálisis (ERA-Interim, MERRA2 y ERA5) son parecidas (p. ej. sesgos intensos en regiones montañosas). Sin embargo, el reanálisis NARR difiere de las demás comparaciones debido a que, en las regiones planas, la comparación de la intensidad del viento

con RegERAInt muestra diferencias negativas (de 1 hasta 2.5 m/s). Estos sesgos difieren de las demás comparaciones, ya que en las regiones planas los sesgos fueron pequeños (< 0.5 m/s).

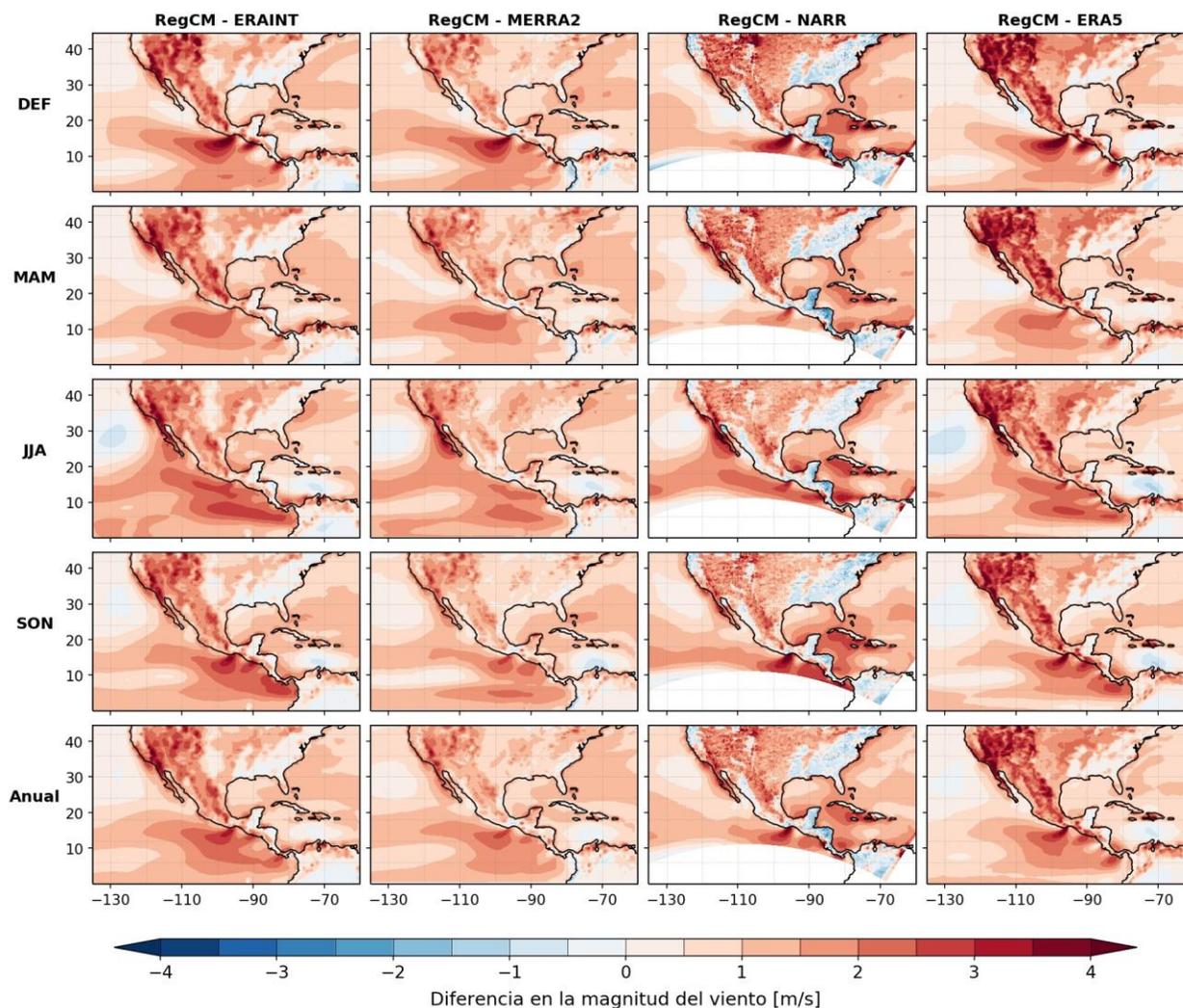


Figura 18. Diferencias en la climatología del viento promedio estacional a 10 m entre RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim menos los reanálisis en el periodo de referencia (1981-2010).

Además de las diferencias que se observan entre los diversos reanálisis, existen sesgos significativos por cada estación. Durante el periodo invernal los denominados vientos canalizados del sureste de México (vientos Tehuanos) y de Centroamérica (vientos de Papagayo y Panamá) se intensifican por el desplazamiento de sistemas de alta presión de latitudes medias a estas regiones (Chelton et al., 2000). Para esta estación y comparando con los reanálisis ERA-Interim, MERRA2 y ERA5, RegERAInt sobrestima los vientos Tehuanos (> 4 m/s), mientras que subestima los jets de Papagayo y Panamá (1 m/s). Por otro lado, en verano se observa la intensificación del cinturón de altas presiones subtropicales. En el Pacífico,

el anticiclón semipermanente de Hawái se expande y se desplaza hacia latitudes medias en esta estación (Hordon, 2005). Este comportamiento lo reproduce RegERAInt, no obstante, el campo de vientos asociado muestra intensidades menores (1 m/s) comparadas con los reanálisis. Durante las 4 estaciones se observa un sesgo importante en la región del CLLJ. En esta región se observa que RegERAInt muestra vientos menos intensos que los reanálisis con excepción de NARR.

Para la comparación del viento a 100 m, se obtuvieron los sesgos estacionales de RegERAInt menos el reanálisis ERA5 en el periodo histórico (Figura 19). Se observa que el comportamiento del viento a 100 m en el dominio CORDEX-Centroamérica es muy similar al de 10 m siendo prácticamente la misma dirección del viento, pero con magnitudes distintas. De igual forma que en la intercomparación a 10 m (Figura 18), la comparación entre RegERAInt y ERA5 indica diferencias positivas en la magnitud del viento en gran parte del dominio. Estos sesgos son ligeramente más marcados que en el caso de 10 m. Las diferencias más significativas y persistentes se observan en la región occidental de E.U.A. y Sierras Madre de México donde RegERAInt presenta diferencias positivas (> 4 m/s) en la magnitud del viento con respecto a ERA5. Por otro lado, RegERAInt subestima (< 1 m/s) los vientos intensos en la región del CLLJ en el Mar Caribe en las cuatro estaciones. Asimismo, en la temporada invernal, RegERAInt subestima la intensidad de los vientos canalizados de Papagayo y Panamá.

Después de la intercomparación con los vientos de los reanálisis a 10 y 100 m de altura se procedió con la evaluación de las salidas regionalizadas de los modelos del CMIP5. De acuerdo con el IPCC (2013), la intercomparación histórica de los diversos modelos de CMIP5 permite explorar el comportamiento individual de cada modelo, de esta manera se pueden determinar las fortalezas y debilidades de forma particular con referencia a observaciones establecidas (ej. reanálisis) permitiendo interpretar las diferencias entre cada modelo debido a los diversos esquemas y experimentos que conciernen a cada uno de ellos. Este mismo concepto se empleó al momento de intercomparar las salidas regionalizadas de los modelos del CMIP5. Debido a que las simulaciones históricas con RegCM4.7.1 se realizaron con la misma configuración y parametrizaciones para cada uno de los MGC, la intercomparación nos permitió analizar la sensibilidad del modelo regional ante diferentes condiciones iniciales y de frontera.

De acuerdo con los sesgos estacionales y anuales (Figura 20), los mayores sesgos se encuentran en las regiones oceánicas y los menores en el continente (< 1 m/s), a diferencia de lo observado con los reanálisis. Analizando individualmente a cada uno de los modelos, encontramos que RegHad presenta los errores más pequeños y RegGFDL es el que tiene las mayores diferencias. RegHad presenta sesgos positivos y negativos menores a 1 m/s en el continente; en regiones oceánicas llega a sobrestimar los vientos intensos del CLLJ donde se observan sesgos positivos mayores a 4 m/s en verano y otoño. Por su

parte, RegGFDL presenta sesgos positivos (2 m/s) en los vientos del anticiclón subtropical de Hawái. Asimismo, se observan sesgos positivos (> 2 m/s) en la región de los vientos alisios del Pacífico en tres estaciones, con excepción de verano donde se observan sesgos negativos (3 m/s). RegGFDL también sobrestima (> 3 m/s) los vientos canalizados del Istmo de Tehuantepec, de Papagayo y Panamá principalmente en invierno y primavera. Los sesgos de RegMPI representan un punto intermedio entre las comparaciones con RegGFDL y RegHad ya que no son tan intensas como RegGFDL ni tan tenues como RegHad. Sin embargo, el patrón espacial de los sesgos se asemeja más a los vistos por RegGFDL en las cuatro estaciones. El ensamble multimodelo atenúa las grandes diferencias que se observan en los modelos individuales prevaleciendo los sesgos positivos (1.5 m/s) observados en las regiones del anticiclón de Hawái y en los alisios del Pacífico. En el continente se observan sesgos pequeños que van desde los -0.5 m/s hasta 1 m/s en los 4 trimestres.

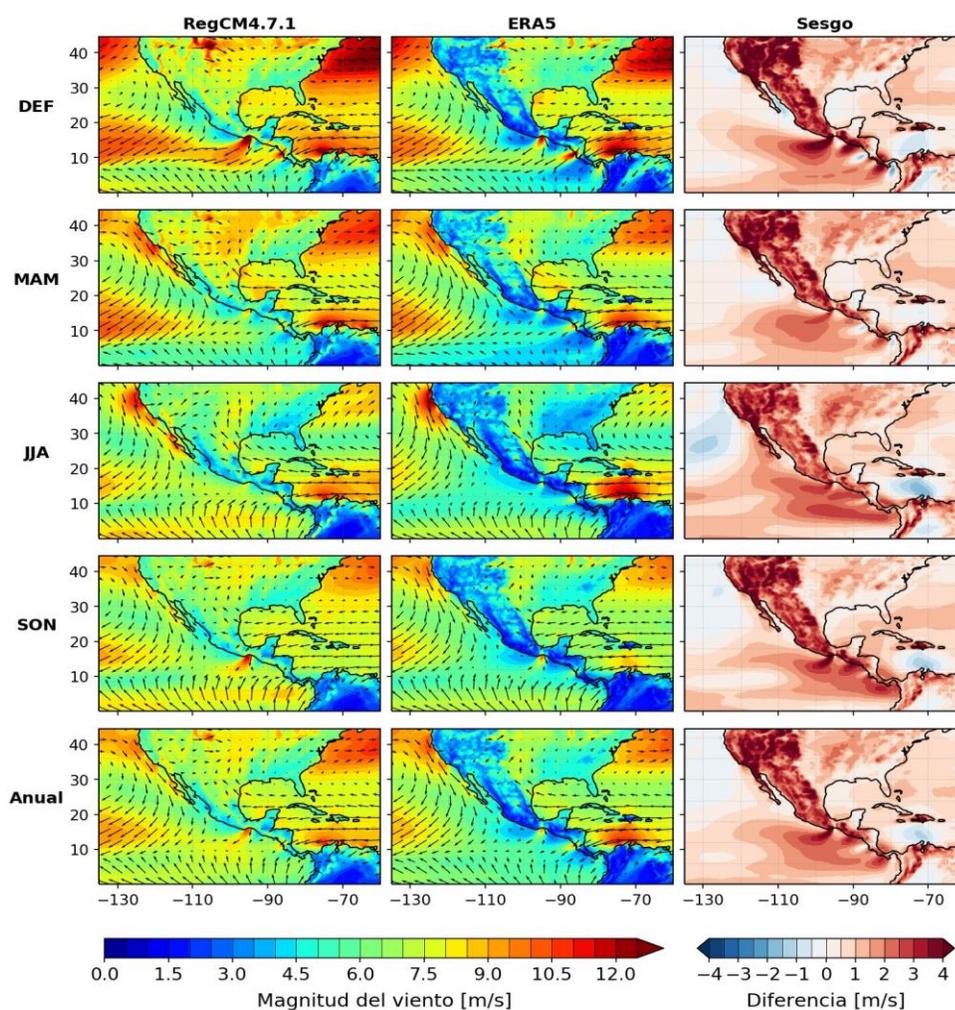


Figura 19. Climatologías promedio del viento estacional y anual a 100 m de altura de RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim (primera columna), el reanálisis ERA5 (segunda columna) y las diferencias entre ellos (tercera columna) con el reanálisis como referencia.

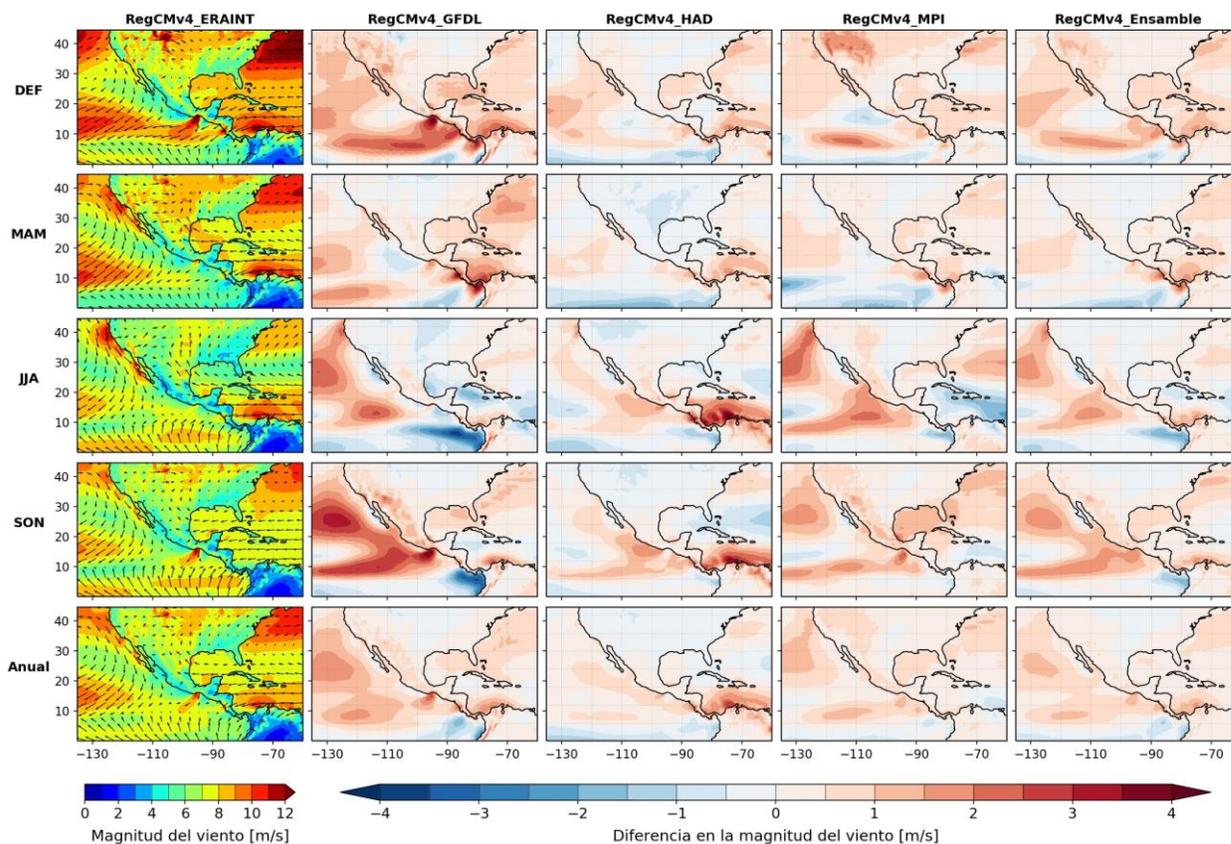


Figura 20. Climatología promedio del viento estacional y anual a 100 m de RegCM de las simulaciones realizadas con RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim (primera columna) y las diferencias con respecto a RegCM forzado por 3 modelos globales y con el ensamble de los modelos en el periodo de referencia (1981-2010).

3.3. Clasificación de vientos a 100 m con los mapas auto-organizados

Como se observó en las secciones anteriores el modelo regional RegCM demostró un buen desempeño al simular los vientos superficiales en el dominio CORDEX-CAM y en los puntos observacionales en el periodo histórico. Por tal motivo, se usaron las componentes del viento a 100 m de altura de las salidas trihorarias de RegCM forzado con ERA-Int 75 (RegERAInt) en el periodo 1981-2010, para obtener los patrones más frecuentes y más intensos del viento utilizando la metodología de los Mapas Auto-organizados (SOMs por sus siglas en inglés).

3.3.1 Clasificación de los vientos a 100 m de RegCM-ERAInt

El resultado del entrenamiento de los SOMs, con el viento de RegERAInt, consistió en un arreglo (4x3) de 12 nodos que sintetizan el rango de variabilidad de los patrones de viento a 100 m durante el periodo histórico en México. La Figura 21 muestra los compuestos del viento a 100 m derivado del análisis de los SOM; de ahora en adelante se referirá a los SOMs definidos por estos compuestos para describir los patrones de circulación. Los compuestos del viento a 100 m son muy similares al resultado del entrenamiento de los SOMs (no mostrado), pero en esta figura se muestran los promedios de cada nodo en un dominio más extenso para ver la circulación característica en todo México.

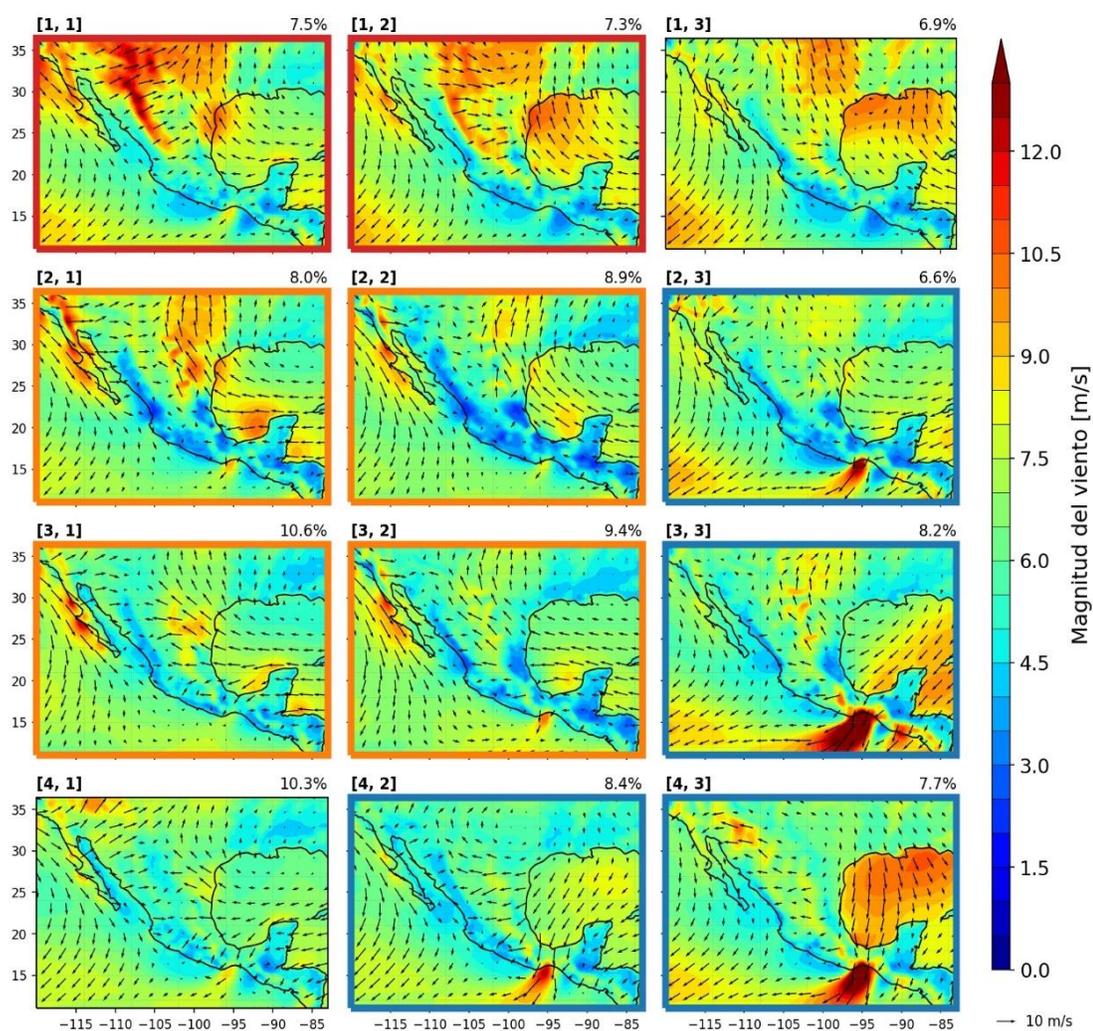


Figura 21. Compuestos promedios de vientos tri-horarios a 100 m de altura de las salidas de RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim de acuerdo a los nodos del SOM en el periodo histórico (1981-2010). Los colores (rojo, naranja y azul) que enmarcan algunos nodos indican diferentes tipos de vientos regionales dominantes de acuerdo a la estación del año; rojo: vientos en la Sierra Madre Occidental; naranja: vientos en la Península de B.C. y noreste de México; y azul: vientos Tehuanos. Los números de la izquierda superior de los mapas representa el número del nodo y el de la derecha el porcentaje de datos en el compuesto.

Los patrones del viento a 100 m, identificados por los SOMs (Figura 21), muestran los diversos tipos de circulación regional en México. Los patrones (o nodos) del SOM se clasifican de tal manera que los patrones más parecidos se colocan adyacentes entre sí, mientras que los más distintos aparecen en los extremos del arreglo. Para facilitar la discusión de cada uno de estos patrones, se subdividieron los SOMs en tres grupos principales (colores enmarcados en la Figura 21) considerando los vientos más intensos (> 10 m/s) en México. Para explicar los patrones de circulación regional del viento (clasificados por el SOM) de la Figura 21 y los mecanismos asociados a ellos, se analizaron las fechas de los compuestos de cada nodo para determinar los meses y horas de ocurrencia, y para hacer compuestos con temperaturas superficiales y presión a nivel del mar.

En la Figura 21 se observa que las frecuencias de ocurrencia de los 12 patrones tienen un rango de 6.6 a 10.6%. Los patrones más frecuentes del SOM son los cuatro nodos en color naranja (nodos [2,1], [2,2], [3,1] y [3,2]) que representan vientos intensos con componente oeste en la Península de Baja California y los vientos Alisios en el noreste de México, especialmente en Tamaulipas, y que en conjunto representan el 36.9% del periodo total. Estos vientos son más frecuentes durante el verano (Figura 22). Por su parte, los vientos Tehuanos tienen una ocurrencia del 30.9% (cuatro nodos de color azul) y se observan principalmente durante los meses de invierno y en menor medida en los meses de otoño y primavera (Figura 22). Los vientos de componente oeste en la Sierra Madre Occidental tienen una ocurrencia del 14%, los cuales aparecen en los dos nodos de la esquina superior izquierda enmarcados en rojo de la Figura 21 y ocurren principalmente durante la primavera, especialmente en abril (Figura 22).

La Figura 23 muestra la distribución tri-horaria de las salidas de RegERAInt en el periodo histórico. Para los patrones de la Sierran Madre Occidental, el nodo [1,1] presenta mayores frecuencias en las horas de la tarde, mientras que el nodo [1,2] no tiene una hora predominante. En los patrones de vientos típicos de verano en Baja California y el noreste de México (nodos naranjas en la Figura 21), las horas de ocurrencia se presentan mayormente en las horas de la madrugada y mañana, además, los patrones de este grupo presentan los mayores porcentajes de ocurrencia para una hora en específico siendo los nodos [2,1] con más del 50% para la hora 00:00 (local) y el nodo [3,1] con más del 40% para la hora 15:00 (local). En algunos casos, los vientos Tehuanos presentan mayor ocurrencia en las horas de la madrugada y mañana, mientras que en otros se observan en la tarde (nodo [4,2]) y a todas horas (nodo [4,3]). Los vientos débiles del nodo [4,1] es uno de los pocos patrones con predisposición para las horas de la tarde, mientras que los del nodo [1,3] no tiene una hora predilecta.

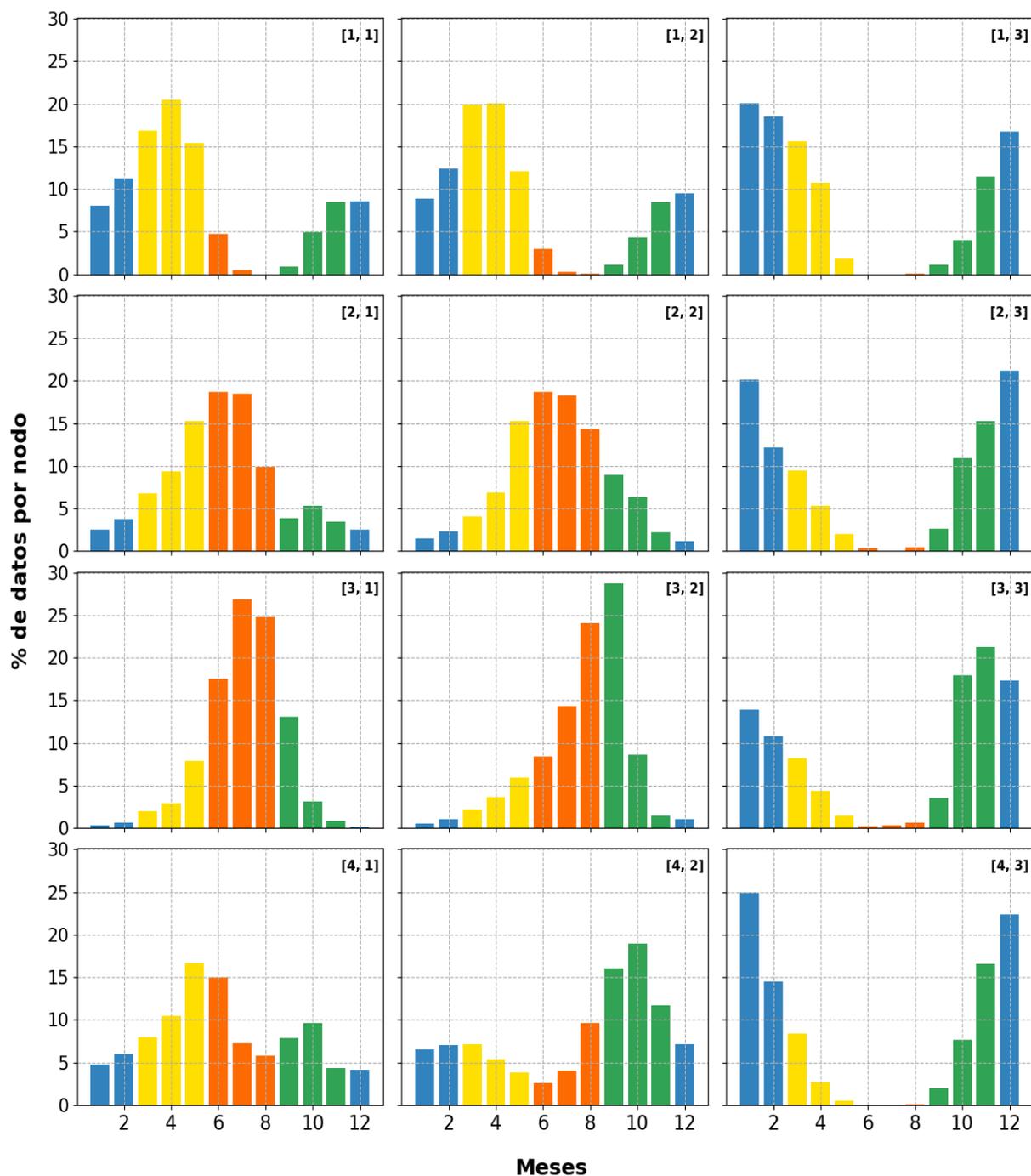


Figura 22. Distribución mensual de las frecuencias tri-horarias de los vientos en los nodos del SOM de la Figura 21. Los colores azul, amarillo, naranja y verde representan las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño, respectivamente.

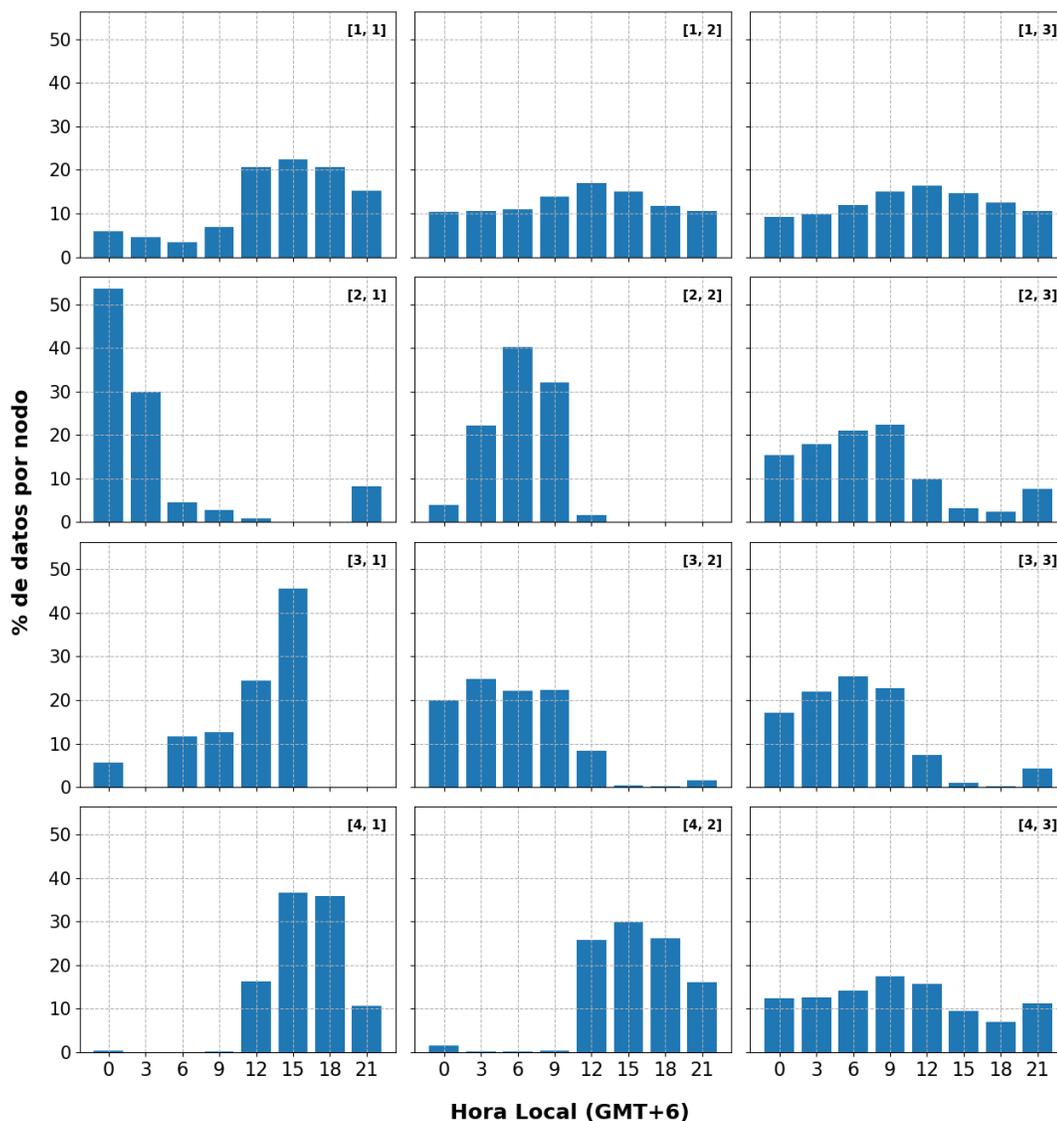


Figura 23. Ocurrencias promedio (%) tri-horarias del viento en los nodos del SOM de la Figura 21 por hora.

3.3.2 Mecanismos sinópticos asociados a los patrones de viento a 100 m

Para entender mejor los posibles mecanismos sinópticos asociados a los patrones de viento de la Figura 21, se hicieron compuestos del viento a 100 m para el dominio extendido de CORDEX-CAM, como se muestra en la Figura 24, así como los compuestos correspondientes de presión a nivel del mar (Figura 25) y temperatura superficial del aire (Figura 26). En esta sección también se evaluaron los patrones para determinar qué condiciones sinópticas son las más favorables para los tres sitios de interés (La Rumorosa, San Fernando y La Ventosa).

Los nodos [1,1] y [1,2] representan, del lado noroeste de México, vientos intensos a sotavento de la Sierra Madre Occidental (Figura 24) asociados por un lado a la circulación anticiclónica del Pacífico y, por otro a una circulación ciclónica en las Montañas Rocosas y temperaturas relativamente frías (Figuras 25 y 26, respectivamente). En los mismos patrones, pero del lado del Golfo de México, domina la circulación anticiclónica del Atlántico (Figura 25) con vientos Alisios del suroeste en Tamaulipas y Texas; el calentamiento en las planicies costeras (Figura 26) genera un gradiente de presión y vientos intensos en Tamaulipas y en las Grandes Planicies, los cuales convergen con la circulación ciclónica de las Montañas Rocosas (Figura 24). Autores como Whittaker y Horn (1981) sugieren que la circulación ciclónica típica de primavera, como la que vemos en este patrón de vientos (Figura 22), es causada por la interacción de la corriente en chorro con las Montañas Rocallosas.

En ambos nodos, los patrones de presión y viento son similares, pero existen diferencias en el comportamiento de los sistemas de presión que afectan la dirección del viento. En el nodo [1,2] (Figura 25), la extensión de la alta de las Bermudas se ve reducida en comparación con el nodo [1,1]. Por la costa oeste de E.U.A se observa un incremento en presión, posiblemente atribuido al paso tardío de frentes fríos en la región. Estas diferencias generan que la confluencia de los vientos se desplace al sureste de E.U.A (nodo [1,2], Figura 24).

Respecto a México, los vientos intensos en el sotavento de la Sierra Madre Occidental se deben a la extensión de la baja presión en las Grandes Planicies, estos vientos del oeste, al momento de interactuar con la Sierra Madre Occidental, se aceleran y calientan adiabáticamente al descender, favoreciendo vientos intensos en Chihuahua. La Figura 27 muestra que en estos dos patrones (nodos [1,1] y [1,2]) se dan las velocidades más intensas en San Fernando, Tamaulipas, con una dirección predominante del viento del sur-sureste.

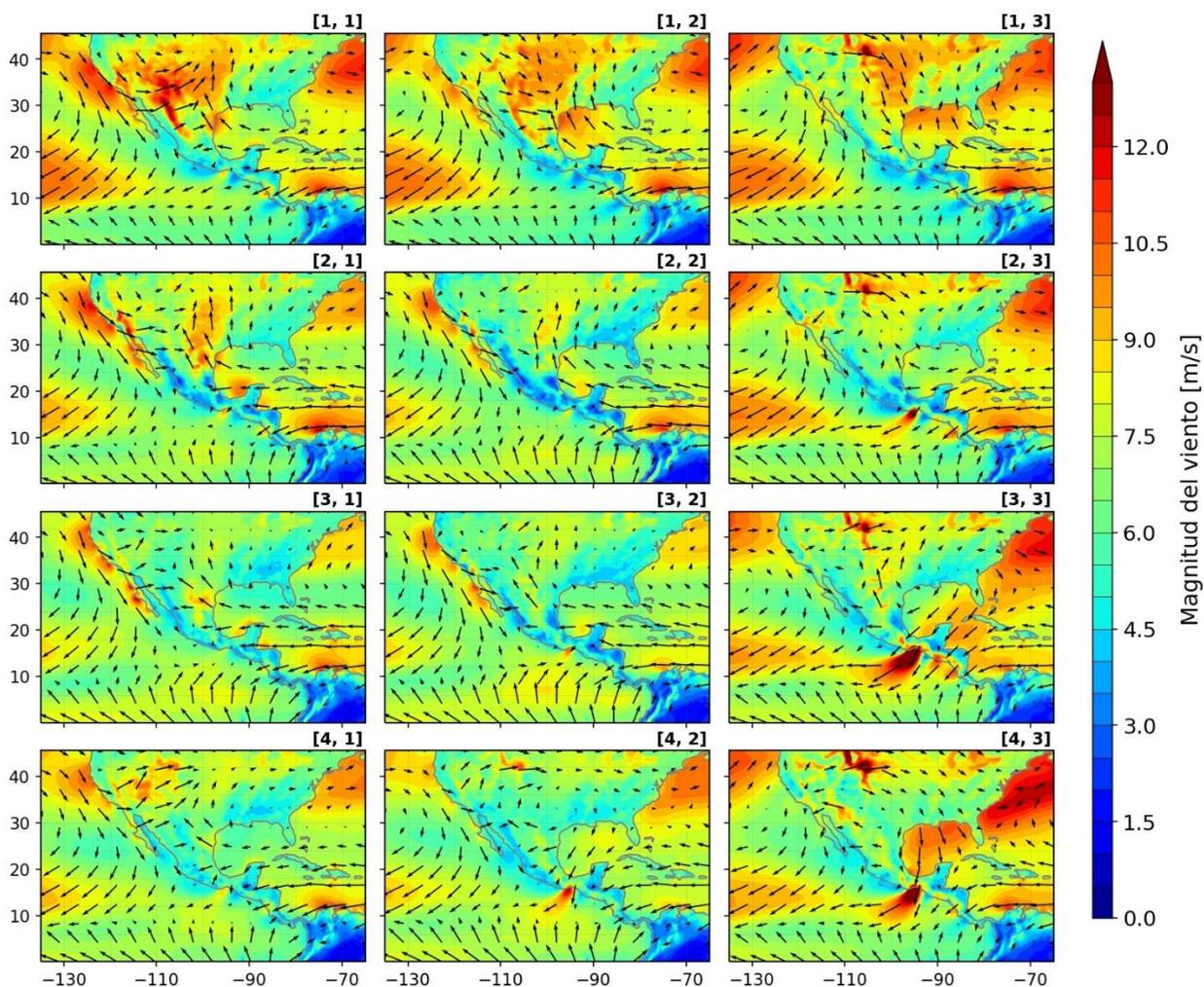


Figura 24. Compuestos del viento a 100 m de las salidas de RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim en el periodo histórico igual a la Figura 21, pero para el dominio extendido de CORDEX-CAM.

Los patrones de viento enmarcados en color naranja (nodos [2,1], [2,2], [3,1] y [3,2]), representan vientos intensos en la región noreste de México y en la Península de Baja California. En el noreste de México, al igual que en los nodos [1,1] y [1,2], el principal mecanismo asociado a la generación de los vientos en esta región, como en Tamaulipas, se debe a gradientes de presión entre la baja de las Grandes Planicies de E.U.A y la alta de las Bermudas. Los vientos que se observan en estos patrones son menos intensos a los observados en los nodos [1,1] y [1,2] debido a que los gradientes de presión son menos intensos (Figura 25). Estos patrones son predominantes en los meses de verano cuando se observa un desplazamiento al norte de los sistemas de alta presión semipermanentes y el debilitamiento de la baja presión en el centro de E.U.A. es más notorio. De acuerdo con el análisis de las Figuras 22, 23, 24 y 25, los nodos [2,1], [2,2], [3,1] sugieren un comportamiento diurno de un mismo patrón de vientos debido a que la circulación, sistemas de presión y meses son muy similares entre cada nodo, pero con distintas horas de

ocurrencia. Estos patrones presentan una distribución de horas muy marcada (Figura 23) con horas predominantes en la noche (nodo [2,1]), en la mañana (nodo [2,2]) y en las horas de tarde (nodo [3,1]). Los vientos más intensos que se pueden observar en este conjunto de patrones, es en el nodo [2,1] en las horas de la noche. Por un lado, en este patrón se observan fuertes vientos del sur en la región central de E.U.A. que pueden ser asociados al jet nocturno de las Grandes Planicies en niveles bajos (GPLLJ, por sus siglas en inglés). El GPLLJ se forma en el tope de la capa límite estable que se genera por la inversión térmica debido al enfriamiento en superficie de las Grandes Planicies; este enfriamiento nocturno genera gradientes de presión entre las laderas de las Rocallosas con las planicies del este de E.U.A. (Blackadar, 1957; Bonner, 1968). El aumento en la cizalladura del viento provoca que los vientos máximos se observan alrededor de los 800 m de altura (Bonner, 1968), pero su influencia llega hasta la superficie como en el patrón de vientos de la Figura 24 (nodo [2,1]).

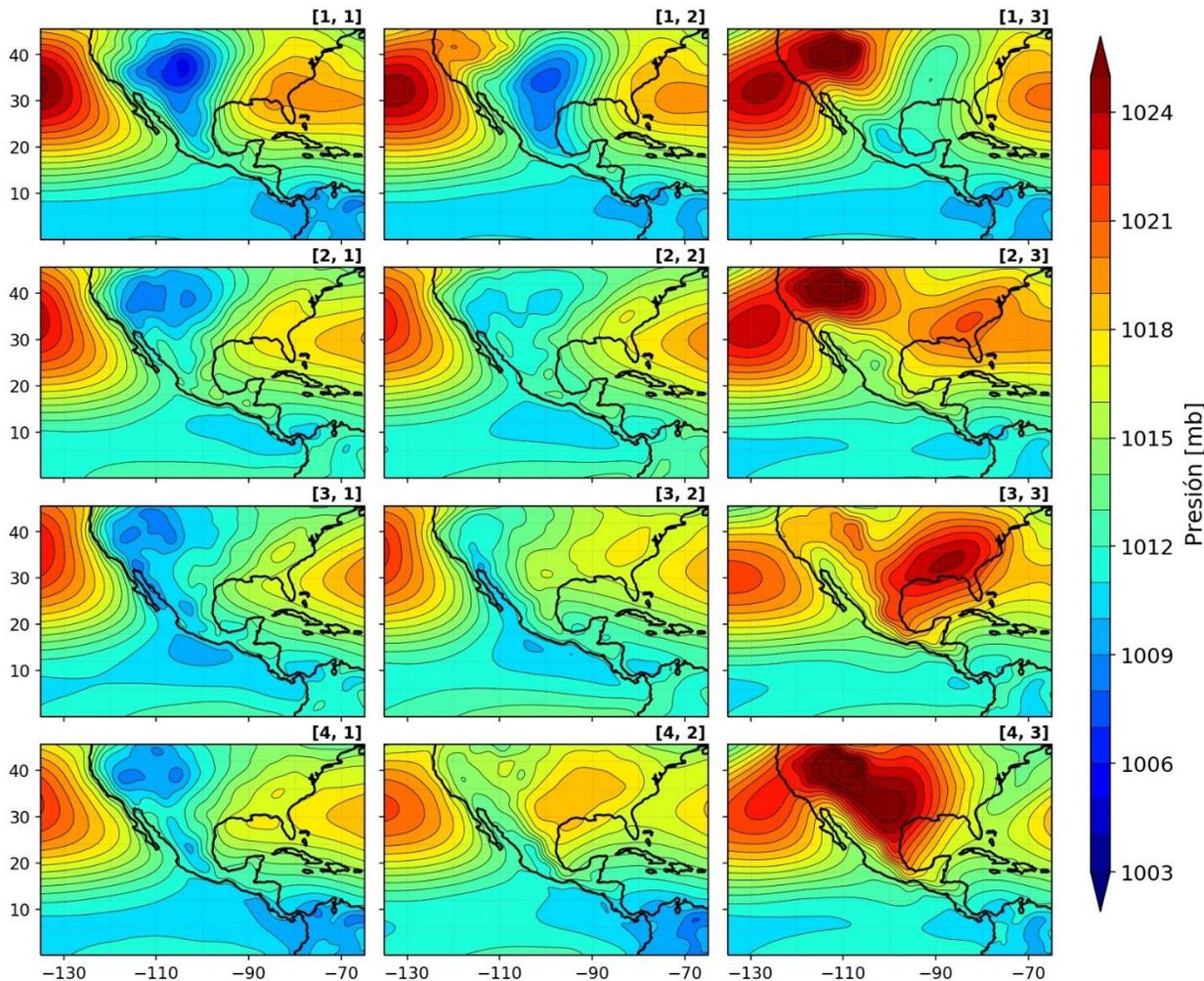


Figura 25. Igual que la Figura 24, pero para la variable de presión al nivel del mar.

Otros vientos intensos de este patrón (nodo [2,1]) se encuentran en la Península de Baja California. Como se observa en la Figura 28, en este nodo se presentan los vientos más intensos y frecuentes cerca del sitio de la Rumorosa donde se pueden llegar a observar vientos intensos (> 16 m/s) del oeste. Para la región central de la Península de B.C., los vientos intensos que se observan en la noche se deben a la orografía de la región junto con las diferencias térmicas (Figura 27) que hay entre las masas de agua del Pacífico (más frías) con las del Golfo de California (más cálidas) (Turrent y Zaitsev, 2014).

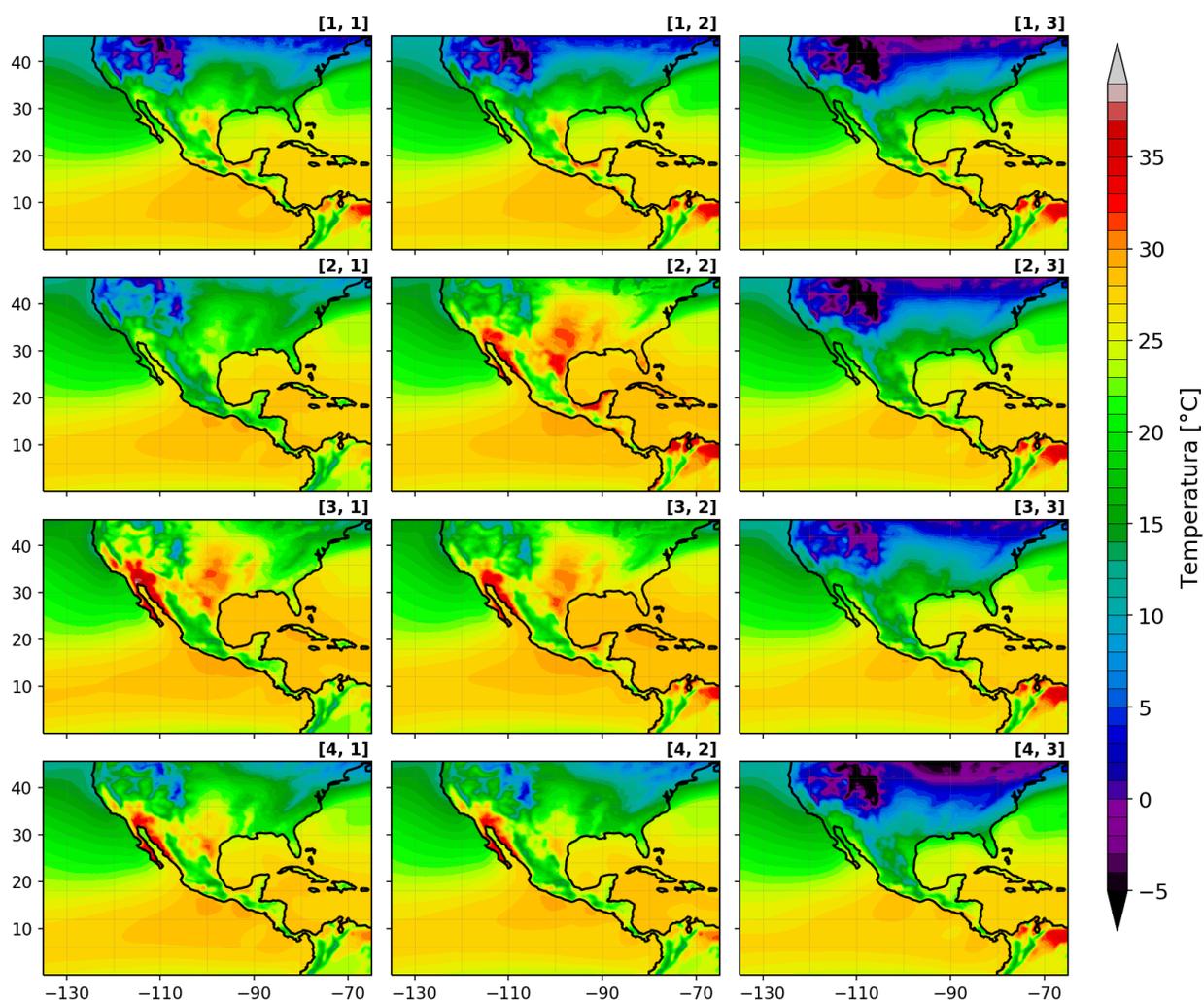


Figura 26. Igual que la Figura 24, pero para la temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$) a 2 m.

Los nodos [2,3], [3,3], [4,2] y [4,3] representan los denominados vientos Tehuanos (nodos enmarcados de color azul de la Figura 21) que tienen como principales mecanismos de generación los fuertes gradiente de presión entre el Golfo de México y el Pacífico especialmente en otoño e invierno durante el paso de sistemas frontales (Luna-Niño y Cavazos, 2018). Lo anterior se puede corroborar inspeccionando los compuestos de presión a nivel del mar y temperatura (Figuras 25 y 26 respectivamente) que indican una

alta presión intensa en continente y descensos en la temperatura, característicos de estos sistemas. El análisis mensual de frecuencias (Figura 22) también corroboran que la ocurrencia de estos patrones se da en los meses invernales y de otoño. La intensidad y circulación del viento en estos cuatro patrones, varía en función del desplazamiento del sistema frontal a través de las regiones del continente. Por ejemplo, en el nodo [2,3], el sistema de alta presión intensa del lado de la costa oeste de E.U.A. y la alta menos intensa por el lado este generan un circulación anticiclónica de los vientos en ambos lados. En el nodo [3,3], el paso de los frentes que pasan por la costa sureste de E.U.A. deja un sistema de alta presión con una circulación anticiclónica en el Golfo de México. Por último, el nodo [4,3] representa el patrón típico de frentes que cruzan a través de México y que a su paso dejan un incremento en la presión y un descenso en la temperatura para la región norte y centro del país. En este último patrón, la configuración de los vientos es distinta a los observados por los patrones [2,3] y [3,3] que se caracterizan por la circulación anticiclónica de los vientos con componente norte. De acuerdo a la Figura 30 el patrón más favorable para la generación de vientos Tehuanos intensos en el sitio de la Ventosa es el patrón de los eventos norte (nodo [4,3]) producidos por el mecanismo mencionado anteriormente y el efecto de encañonamiento de los vientos en el Istmo de Tehuantepec.

Por último, los nodos individuales [1,3] y [4,1] representan patrones de circulación del viento con intensidades menores a 10 m/s en México. Por un lado, el nodo [4,1] representa un patrón de circulación parecido al conjunto de nodos enmarcados de color naranja de la Figura 21. Sin embargo, a diferencia de los patrones de vientos de verano (nodos enmarcados color naranja de la Figura 21), este patrón no muestra una ocurrencia específica predominante para alguna estación del año. La distribución horaria indica que la frecuencia de ocurrencia se da principalmente en las horas de la tarde. Lo anterior, aunado a que es uno de los nodos con mayor frecuencia (10.3 %), sugiere que esta circulación es el patrón recurrente que se da en las horas tardías a lo largo del año. Por otro lado, de acuerdo con la distribución de los meses (Figura 22) y los compuestos de presión (Figura 25) y temperatura (Figura 26), el nodo [1,3] representa un patrón de sistemas frontales que afectan el suroeste de E.U.A. y noroeste de México. Estos sistemas frontales se presentan principalmente en los meses invernales y principios de primavera (Figura 22). Los vientos más importantes en este patrón se encuentran en las Grandes Planicies que se generan por la alta presión del lado oeste de E.U.A. con la baja presión del lado este. Los vientos son principalmente de componente noroeste, lo cual se ve reflejado en las rosas de viento en San Fernando (Figura 27) donde se llegan a observar vientos mayores a 16 m/s. En la región oeste de México, para este mismo nodo, los vientos generados por esta circulación generan un cambio de la dirección de los vientos en la Rumorosa (Figura 28) que pasan a ser de dirección noreste cuando comúnmente los vientos son del oeste.

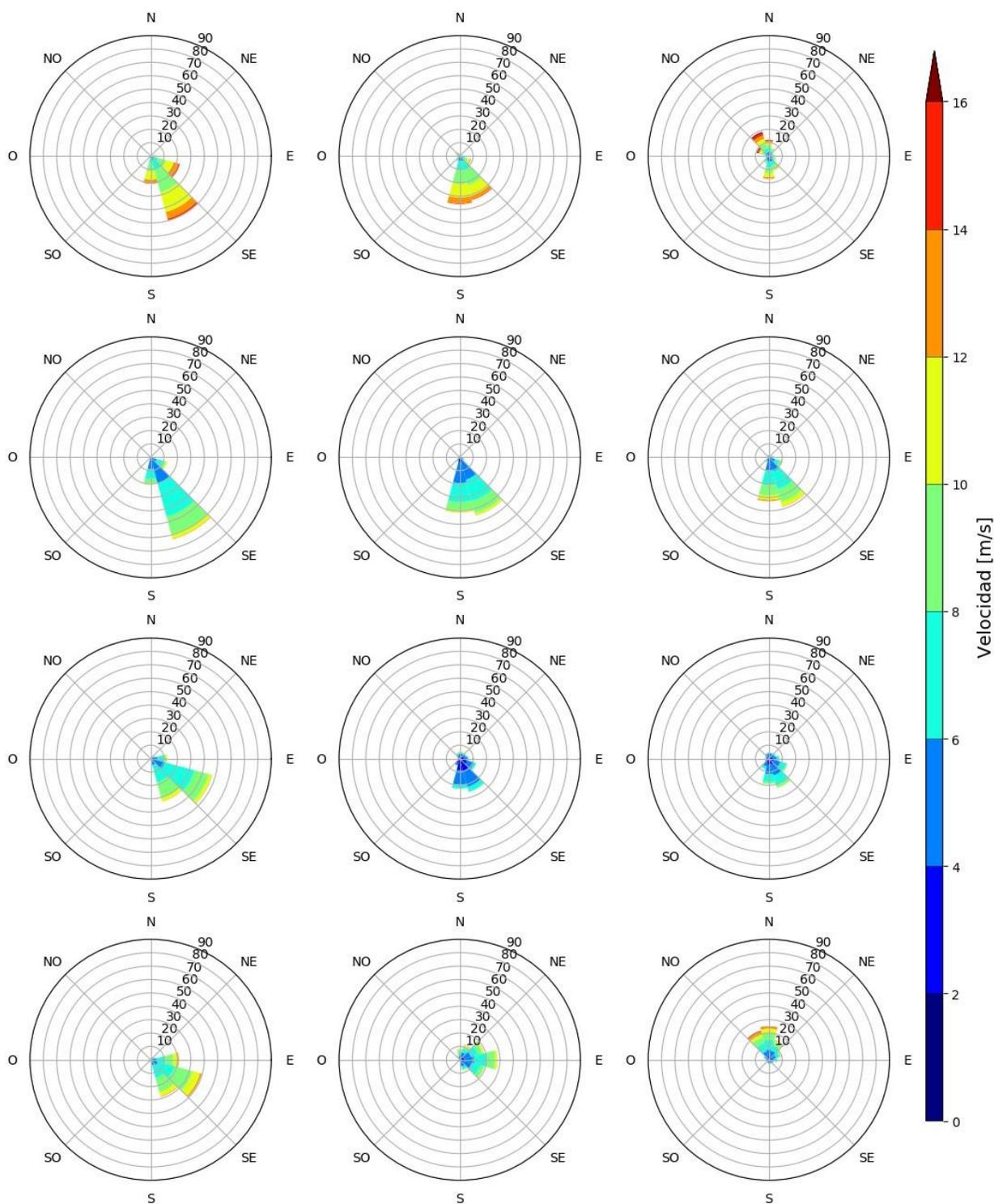


Figura 27. Distribución promedio de las rosas de viento a 100 m de altura del punto de malla más cercano a San Fernando, Tamaulipas por cada nodo del SOM de la Figura 21. Datos de RegCM4.7.1 forzado con ERA-Interim en el periodo 1981-2010. Los círculos internos de las rosas representan la frecuencia (%) del viento y los colores, la intensidad del viento (m/s).

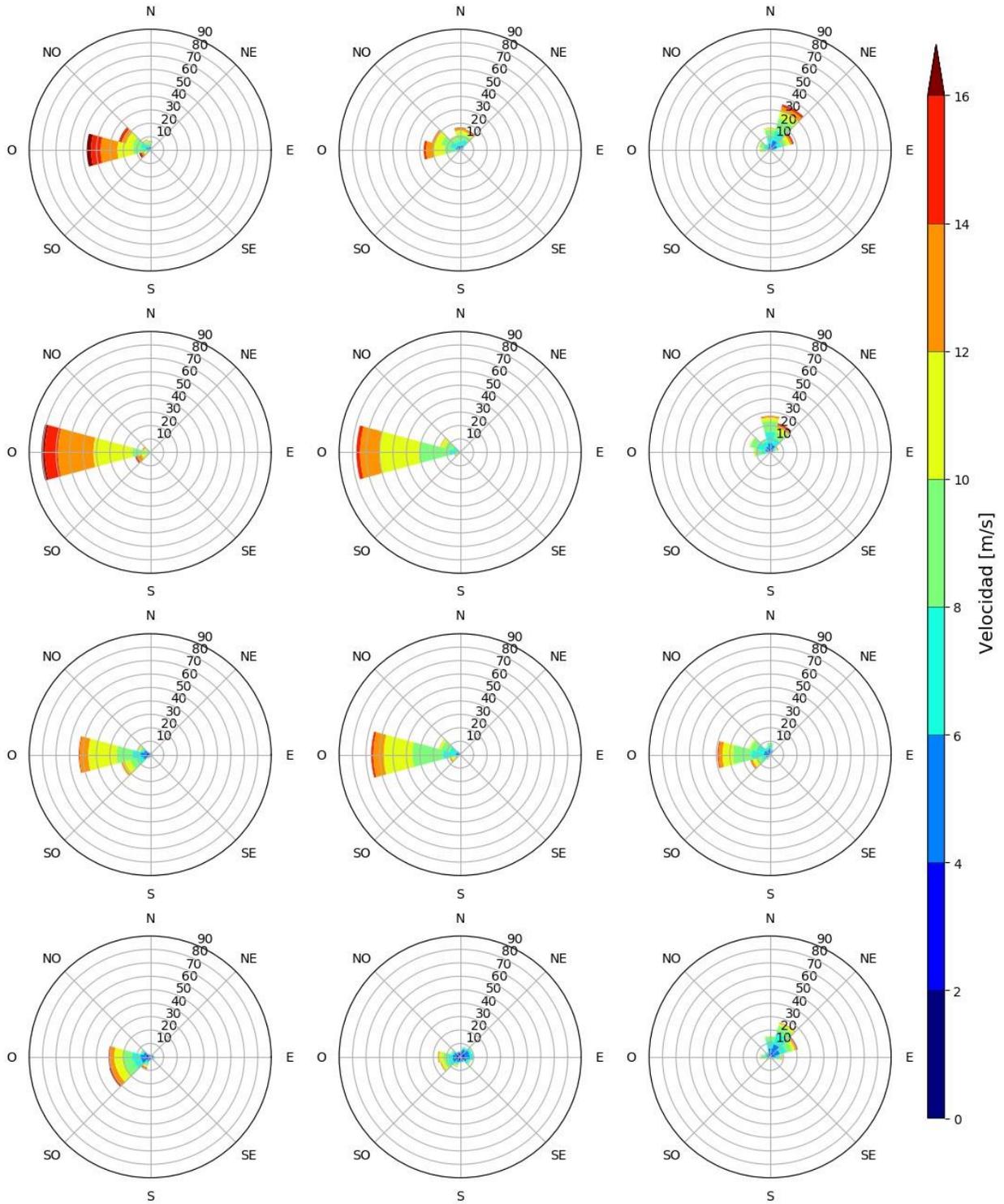


Figura 28. Igual que la Figura 27, pero para el sitio de La Rumorosa, B.C.

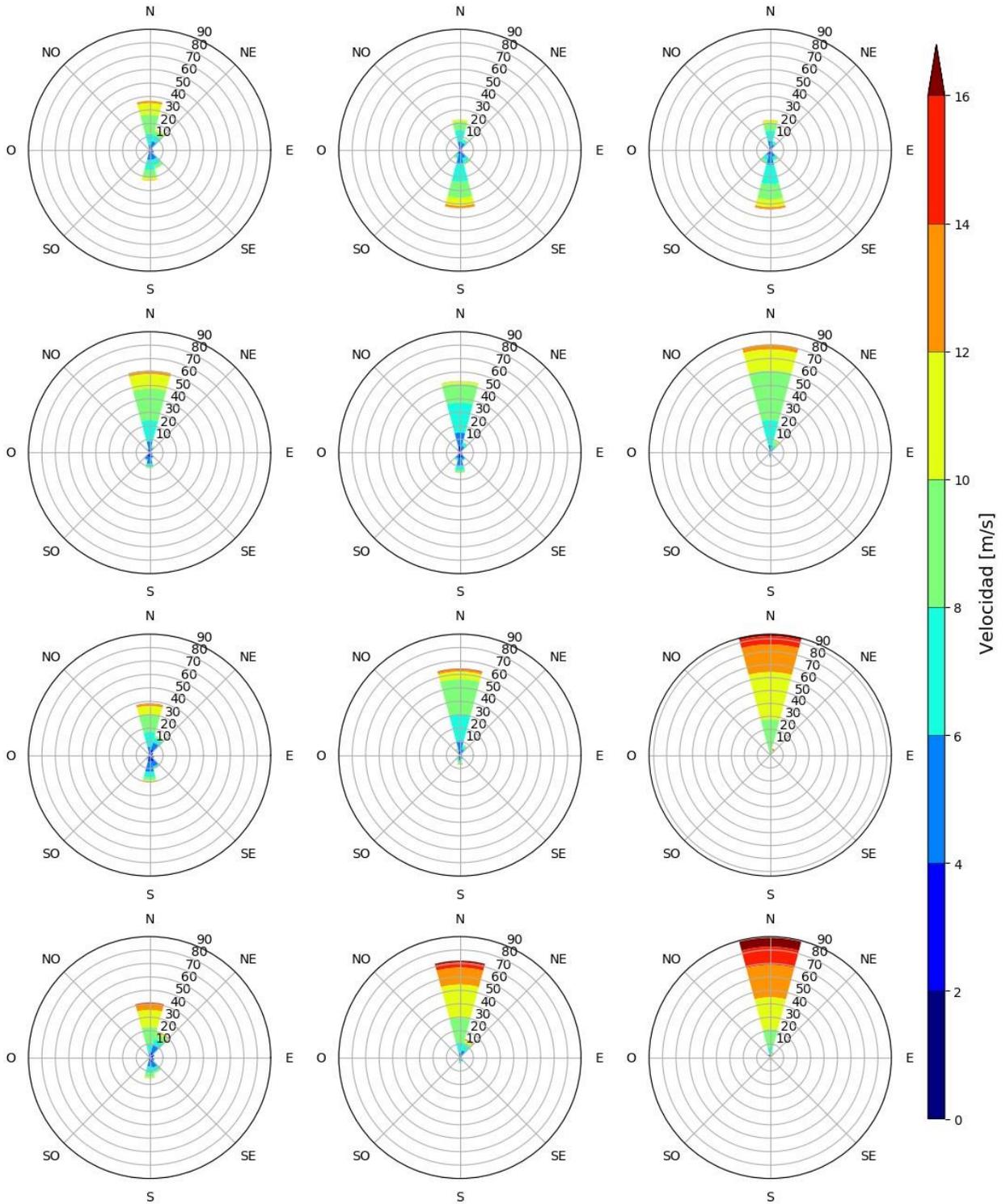


Figura 29. Igual que la Figura 27, pero para el sitio de La Ventosa, Oaxaca.

3.3.3. Clasificación de vientos de RegCM4.7 forzado con los modelos globales

A demás de la caracterización de los patrones de circulación del viento a 100 m en México descritos en la sección anterior, uno de los objetivos de este trabajo es encontrar los posibles cambios en el futuro cercano de estos patrones bajo escenarios de cambio climático. Por tal motivo, fue necesario realizar una evaluación de los patrones identificados por las salidas regionalizadas de los modelos del CMIP5 en el periodo histórico utilizando los SOMs. Los patrones identificados por el SOM (Figura 21) con las salidas de RegERAInt en el periodo histórico, son considerados como los patrones de referencia para la evaluación de las salidas regionalizadas del CMIP5. Se clasificaron las salidas tri-horarias del viento a 100 m de RegGFDL, RegMPI y RegHad a cada uno de los patrones del SOM de referencia (Figura 21). La clasificación de las salidas consistió en buscar la menor distancia euclidiana entre las salidas y los patrones (ver sección 2.5). Sin embargo, el uso de las distancias euclidianas como métrica considera la influencia de los sesgos y errores sistemáticos en los modelos. De acuerdo con la evaluación histórica de estas salidas en la sección 3.2.2, los modelos, en la mayor parte del dominio CORDEX-CAM presentaron sesgos positivos con respecto a las salidas de referencia (RegERAInt). Considerando lo anterior, fue necesario normalizar cada una las salidas de RegGFDL, RegMPI y RegHad para evitar la influencia de los sesgos. Con esto, la clasificación se centró únicamente en identificar patrones de circulación de los vientos a 100 m, independientemente de los errores sistemáticos que presentan las simulaciones.

Al igual que con las salidas de RegERAInt, la clasificación de RegGFDL, RegMPI y RegHad nos dan las fechas que fueron clasificadas a cada nodo del SOM maestro. Por lo tanto, también se crearon compuestos y análisis de distribución de ocurrencias para cada uno de las simulaciones. El ensamble de los compuestos del viento a 100 m (Figura 30) de RegGFDL, RegMPI y RegHad, muestra que los patrones /nodos son muy similares a los obtenidos por los SOMs de RegERAInt, con la diferencia que los patrones observados en el ensamble presentan mayores magnitudes del viento que en los SOMs de referencia. Debido a que las salidas regionalizadas de los modelos del CMIP5 tienen distintos tipos de calendario (Tabla 3), los análisis de distribución de frecuencias mensuales y horarias se obtuvieron individualmente para cada experimento ya que las fechas no eran compatibles para realizar un ensamble. Al realizar la comparación de las frecuencias mensuales y horarias de las salidas de RegGFDL, RegMPI y RegHad en el periodo histórico, se encontró que eran muy parecidas a las de RegERAInt. Por tal motivo, la evaluación de los patrones con las salidas de RegCM forzada con los MGC, encontradas por los SOMs, se centró en la distribución de ocurrencia de los patrones por experimento.

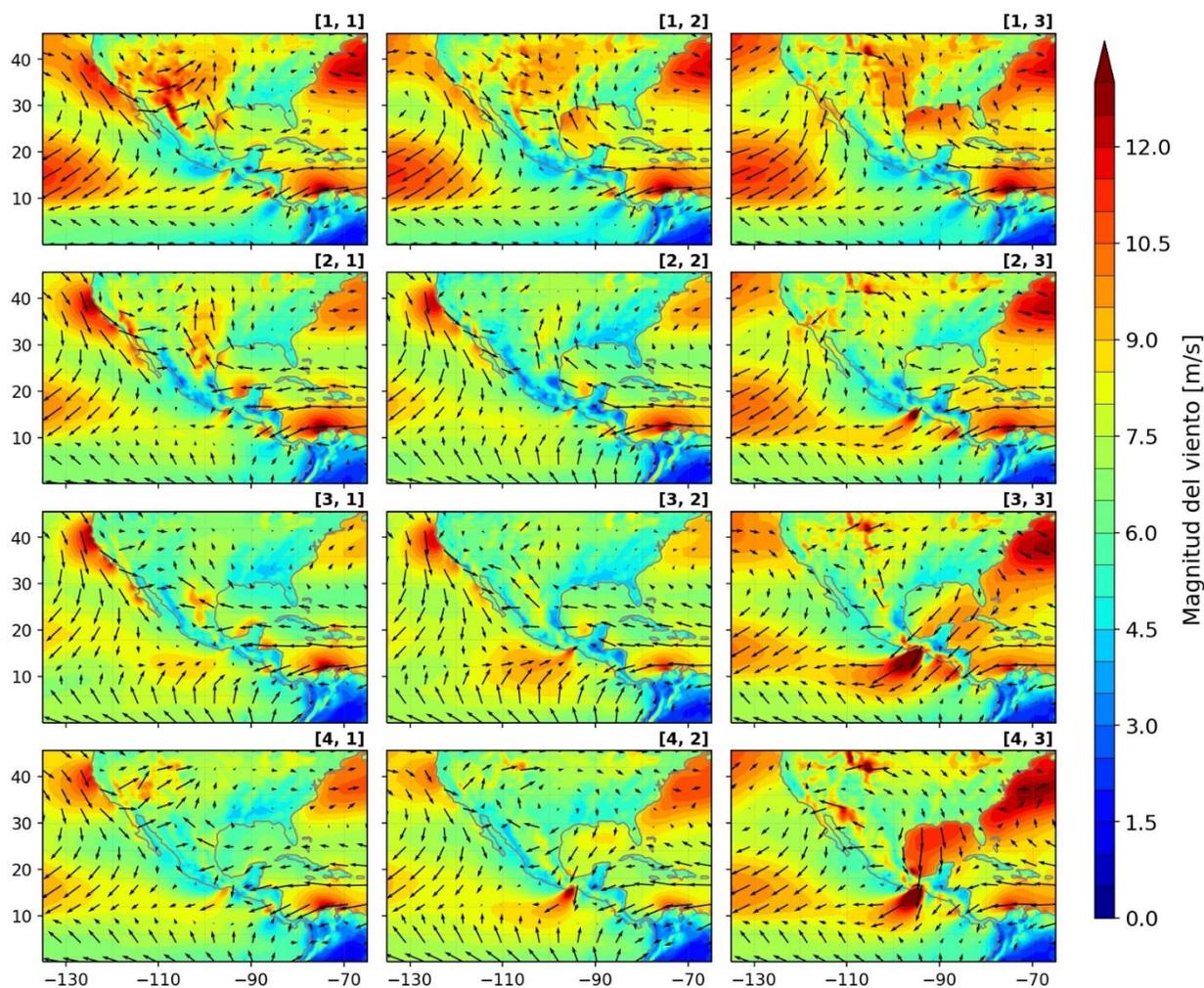


Figura 30. Compuestos del viento a 100 m del ensamble las salidas de RegCM4.7.1 forzado con los tres MGCs en el periodo histórico para el dominio CORDEX-CAM.

La Figura 31 muestra la distribución de frecuencias de ocurrencia de cada nodo por modelo, menos las distribuciones encontradas con las salidas de RegEralnt (porcentajes de la Figura 21) en el periodo histórico. Considerando la clasificación de los patrones en subgrupos de la Figura 21, se evaluó la capacidad de RegCM, con diversos forzamientos, de simular la cantidad de eventos por patrón. En general, se observan diferencias en las ocurrencias, que varían desde los -5.6% hasta 5% de ocurrencia/nodo. Individualmente, RegGFDL (Figura 31.a) presenta las mayores diferencias en la frecuencia de ocurrencia de los patrones de eventos de norte en México (nodo [4,3]) con un 5 % más. Otro patrón donde el mapeo de RegGFDL identificó mayores frecuencias, fue en los vientos intensos a sotavento de la Sierra Madre Occidental (nodo [1,2]) con un 3.2% más que RegERAInt. Por otro lado, RegGFDL identifica en menor medida los patrones característicos de verano (nodos enmarcados en naranja de la Figura 21) llegando a tener diferencias negativas de -4.5% a -1.3%. A diferencia de las salidas de RegGFDL, las salidas del RegHad

(Figura 31.b) muestran menor rango de diferencias con respecto a las salidas de RegERAInt. RegHad presenta pequeñas diferencias en casi todos los patrones que van desde -0.8% hasta 1.9%. A pesar de ello, el patrón donde se observa mayor diferencia (1.9%) es el patrón de los vientos intensos en el noreste de México y la Península de B.C. (nodo [1,1]) que se observan principalmente en las noches de verano. Las mayores diferencias en la ocurrencia de los patrones del viento de las salidas de RegGFDL (Figura 31.a) se observan en los patrones de los eventos de norte. Se observa que RegGFDL presenta 5% más eventos de norte en México en comparación con los observados por RegERAInt. Otro patrón donde el mapeo de RegGFDL identificó mayores ocurrencias es en los vientos intensos en el sotavento de la Sierra Madre Occidental (nodo [0,1]) con un 3.2% más que RegERAInt. Los patrones de verano (nodos enmarcados en color naranja de la Figura 21) de las salidas de RegGFDL, son identificados en menor medida llegando a tener diferencias negativas de -4.5% hasta -1.3%. A diferencia de las salidas de RegGFDL, las salidas del RegHad (Figura 31.b) muestran menor rango de diferencias con respecto a las salidas de RegERAInt que van desde -0.8% hasta 1.9%. RegHad presenta pequeñas diferencias en casi todos los patrones con respecto a las observadas con RegERAInt. A pesar de ello, el patrón donde se observa una diferencia considerable (1.9%) es el patrón de los vientos intensos en el noreste de México y la Península de B.C. (nodo [1,1]) que se observan principalmente en las noches de verano. Finalmente, las salidas de RegMPI (Figura 31.c) muestran diferencias parecidas a las observadas por RegGFDL. RegMPI muestra mayores eventos de norte que RegERAInt, pero menores a RegGFDL en el periodo histórico. RegMPI, al igual que RegGFDL, también muestra mayores frecuencias en el nodo [1,2] con diferencias positivas de 2.6%. Por otro lado, el patrón de viento de RegMPI con mayor diferencia (-5.6%) fue el patrón de vientos en verano por la tarde (nodo [3,1]).

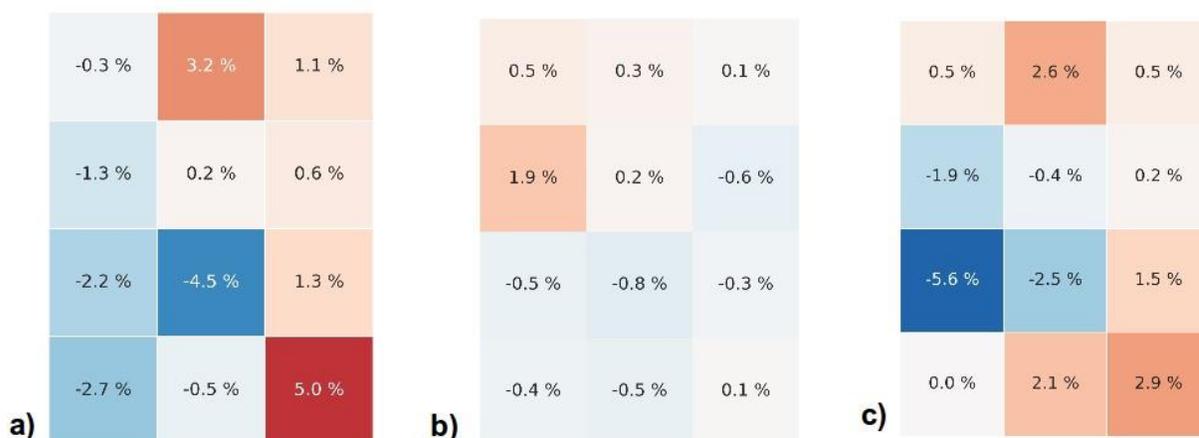


Figura 31. Diferencias en el porcentaje de frecuencias de ocurrencia de cada nodo del SOM (Figura 21) de las salidas de RegCM4.7 forzado con los modelos globales: GFDL-ESM2M (a), HadGEM2-ES (b) y MPI-ESM-MR (c); menos RegCM.4.7 forzado con ERA-Interim (Figura 22) en el periodo histórico.

En general, las salidas de RegGFDL y RegMPI tienden a simular más patrones invernales (tercera columna del arreglo) y menos de verano (patrones enmarcados en naranja de la Figura 21). El mapeo de las salidas RegGFDL y RegMPI, identificó más eventos de norte (5.0 y 2.9% respectivamente) y de igual forma para los vientos intensos en primavera (nodo [1,2]) con 3.2 y 2.6% (RegGFDL y RegMPI) más que las frecuencias de RegERAInt. Debido a que las diferencias de frecuencias con RegHad son muy pequeñas, se sugiere que RegHad identifica casi la misma cantidad de patrones que los observados por RegERAInt.

3.4. Proyecciones futuras del viento a 100 m

En esta sección se presentan los resultados de los cambios de la circulación de los vientos a 100 m en el futuro cercano (2021-2050) bajo el escenario de altas emisiones (RCP8.5), utilizando las salidas de RegCM4.7.1 forzado con tres modelos globales del CMIP5: GFDL-ESM2M, MPI-ESM-MR y HadGEM2-ES (RegGFDL, RegMPI y RegHad respectivamente). La presentación de las proyecciones futuras del viento se divide en tres secciones. En la sección 3.4.1, se utilizó el ensamble multimodelo para describir los cambios futuros en la magnitud y dirección del viento a 100 m en los puntos de malla más cercanos a los tres sitios de mayor interés (La Rumorosa, San Fernando y la Ventosa). En la sección 3.4.2 se muestra la intercomparación de los cambios estacionales del viento a 100 m de altura de las salidas de RegCM4.7.1 forzado con tres modelos globales. Asimismo, se analiza con mayor detalle el resultado del ensamble multimodelo (RegEnsamble) a la altura de 100 y 10 m. Por último, la sección 3.4.3 nos presenta las diferencias en las frecuencias de ocurrencia de los patrones identificados por el SOM (Figura 21) en el futuro cercano. Principalmente, los resultados presentados en esta sección se presentan como sesgos relativos al periodo de referencia 1981-2010.

3.4.1. Torres eólicas

La Figura 32 muestra la comparación del ciclo anual de la magnitud del viento a 100 m del futuro cercano y el periodo histórico de las salidas del ensamble (RegEnsamble) en el punto de malla más cercano al sitio de La Rumorosa, B.C. Como se puede observar, los promedios mensuales de la magnitud del viento

a 100 m del periodo histórico y futuro, son prácticamente los mismos. Las diferencias en magnitud que se podrían llegar a presentar a lo largo del ciclo anual son menores a 0.2 m/s. Por otro lado, las diferencias que existen entre los ciclos anuales de las salidas de RegEnsamble y las salidas de referencia (RegERAInt) en el periodo histórico, muestran que el ensamble logra capturar las máximas velocidades promedio en el periodo de primavera (9 m/s); no obstante, llegan a subestimar la magnitud del viento (-0.7 m/s) en la estación de otoño y sobrestimar en los meses de invierno (0.5 m/s). En cuanto a la dirección del viento, la Figura 33 muestra las rosas de viento climatológicas (1981-2010) del viento a 100 m del punto más cercano a La Rumorosa, B.C. por cada uno de los modelos (RegGFDL, RegMPI y RegHad) y sus respectivos cambios relativos en el futuro cercano (rosas inferiores). En el periodo histórico, se observa que los modelos tienen un acuerdo en simular la dirección predominante del viento de componente oeste en el sitio de La Rumorosa, vistos en la Figura 14.b. Los cambios relativos en el futuro cercano sugieren cambios muy pequeños en la dirección del viento (Figura 33, rosas inferiores). Los tres modelos indican que en el futuro cercano se espera un aumento en la frecuencia de los vientos predominantes del oeste con aumentos del 0.6% (RegHad) y 1.4% (RegMPI).

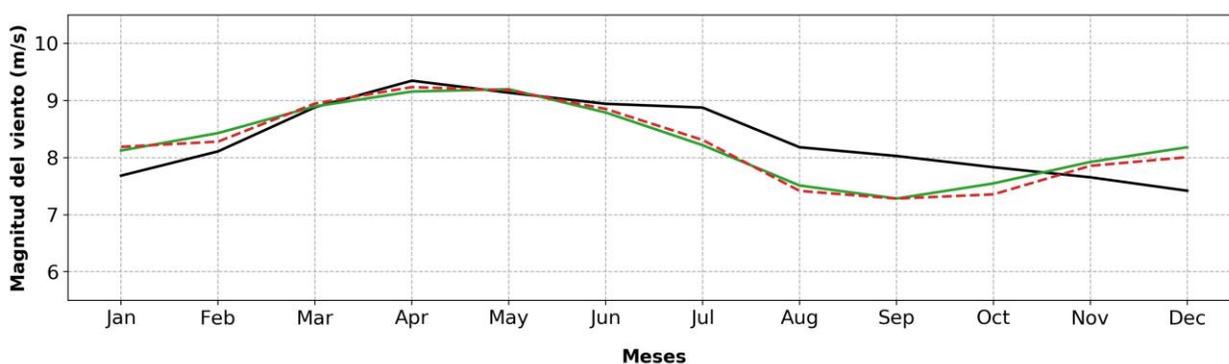


Figura 32. Ciclos anuales del viento a 100 m en el punto de malla cercano a la Rumorosa, B.C. Comparación entre las salidas de RegERAInt en el periodo histórico (línea sólida negra), RegEnsamble en el periodo histórico (línea sólida verde) y RegEnsamble en el futuro cercano (2021-2050) (línea segmentada roja).

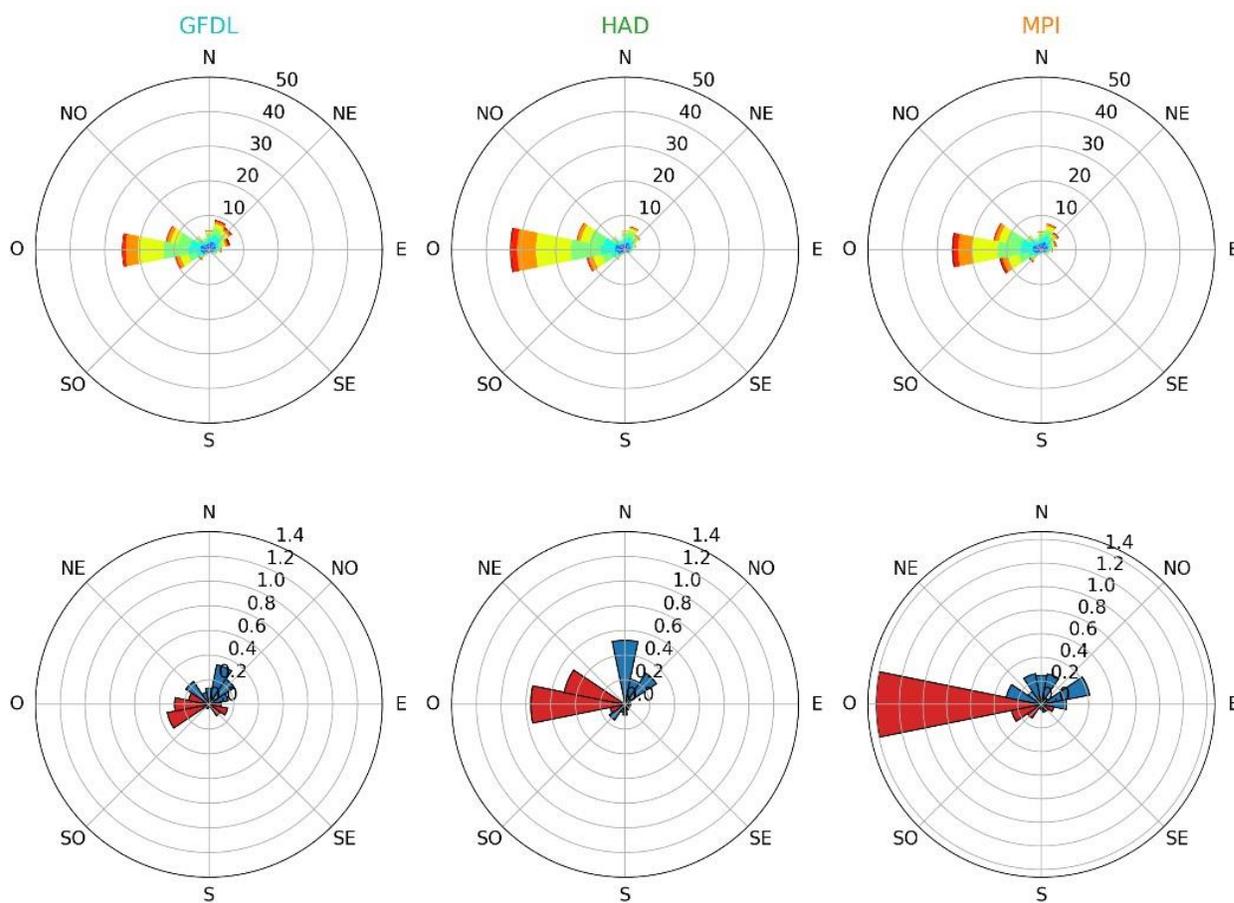


Figura 33. Rosas de viento a 100 m en el punto de malla cercano a la Rumorosa, B.C. de las salidas de RegGFDL, RegHad y RegMPI. Rosas superiores: climatología 1981-2010. Rosas inferiores: Diferencias en frecuencias (%) del periodo futuro (2021-2050) menos el histórico; tonalidades rojas indican un aumento y azules reducción.

Para el sitio de San Fernando, Tamaulipas, la comparación de los ciclos anuales del viento del ensamble futuro y el histórico, muestran prácticamente que no existen cambios en la magnitud del viento a 100 m en el futuro cercano (Figura 34). Por otro lado, la evaluación de las salidas del ensamble en el periodo histórico, muestra un buen desempeño con respecto a las salidas de RegERAInt tomando en cuenta que San Fernando es el sitio con el terreno más plano de los tres. Los vientos predominantes en el sitio de San Fernando (Figura 15) son de dirección sur-sureste. Esta dirección es simulada adecuadamente por los tres modelos en el periodo histórico, con rosas de viento prácticamente similares (Figura 35, rosas superiores). Los tres modelos concuerdan que en el futuro cercano la frecuencia de los vientos del sur se incrementará muy poco (Figura 35, rosas inferiores). RegGFDL indica que este tipo de viento aumentará en 1%, mientras que RegHad y RegMPI en un 0.5% y un 0.9% respectivamente.

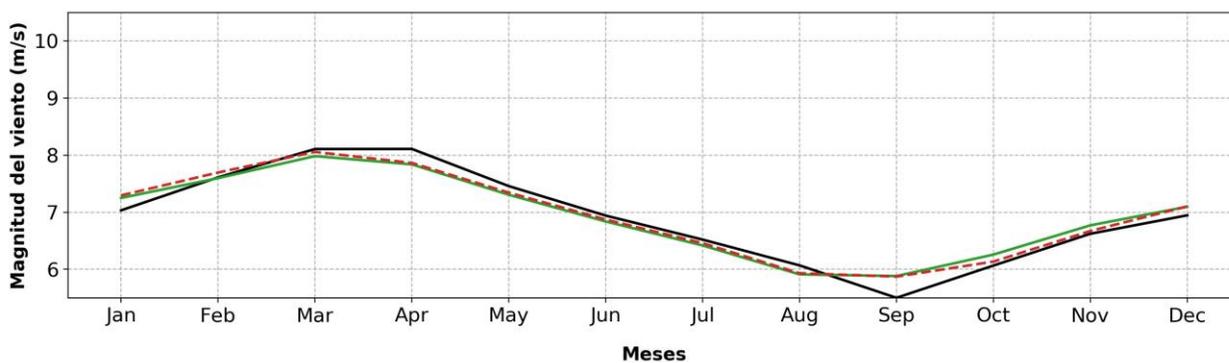


Figura 34. Igual que la Figura 32, pero para el punto de malla cercano a San Fernando.

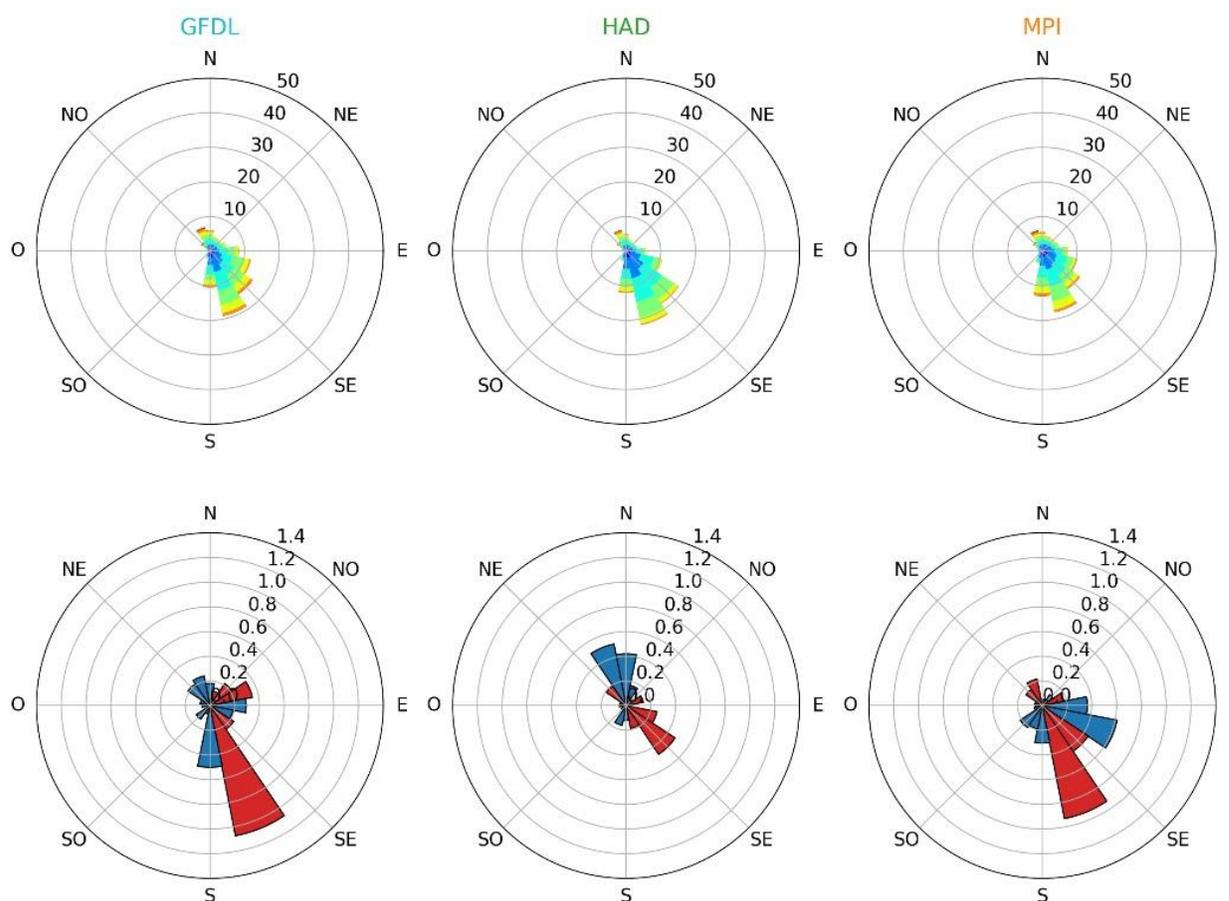


Figura 35. Igual que la Figura 33, pero para el punto de malla cercano a San Fernando

En la Ventosa, los ciclos anuales del ensamble y RegERAInt en el periodo histórico muestran un buen acuerdo en el comportamiento del ciclo (Figura 36). El ensamble logra simular los máximos de velocidad en la época invernal y los mínimos en los meses de verano, pero tiene un error sistemático positivo de aproximadamente 0.5 m/s. Al comparar las magnitudes en el futuro cercano con el histórico, observamos,

como en los demás sitios, que los cambios no son significativos en magnitud. Para la dirección del viento RegGFDL, RegHad y RegMPI concuerdan en la simulación de los vientos intensos de componente norte en el periodo histórico (Figura 37, rosas superiores). Sin embargo, en el futuro cercano (Figura 37, rosas inferiores) RegGFDL y RegMPI indican un aumento en la ocurrencia de los vientos de componente norte, mientras que RegHad no muestra cambios significativos en esta dirección, pero sí incrementos de los vientos del sur (0.8% más).

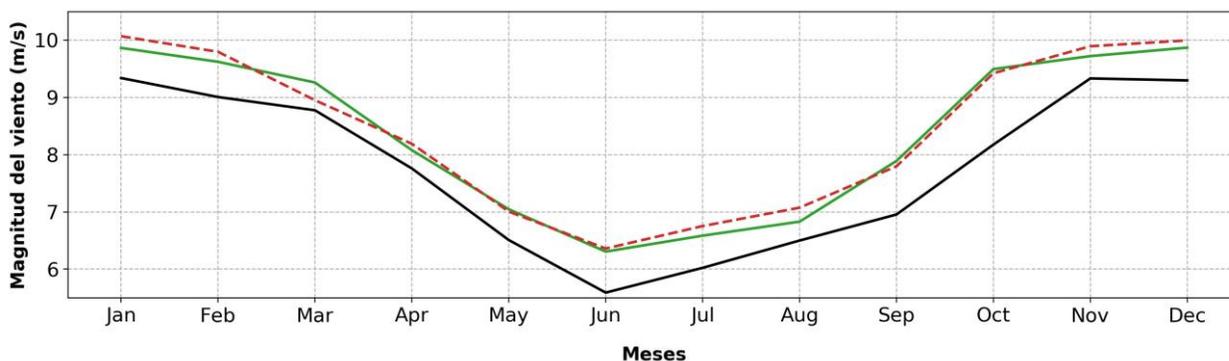


Figura 36. Igual que la Figura 32, pero para el punto de malla cercano a La Ventosa.

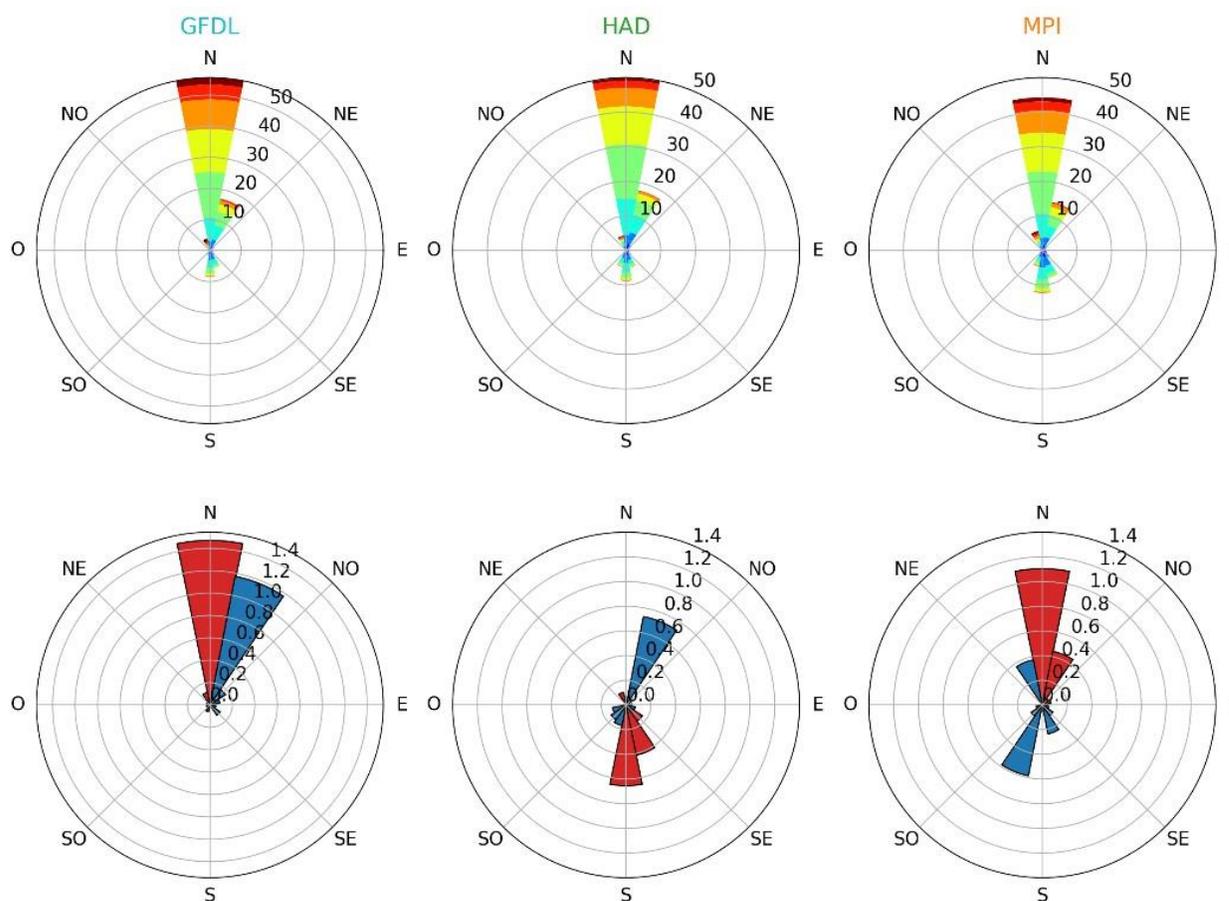


Figura 37. Igual que la Figura 33, pero para el punto de malla cercano a La Ventosa.

3.4.2. Cambio en los patrones sinópticos de circulación en el dominio CORDEX-CAM

La Figura 38 muestra los cambios estacionales del viento a 100 m en el futuro cercano (2021-2050) con respecto al periodo histórico (1981-2010) para RegGFDL, RegMPI y RegHad en el dominio CORDEX-CAM. En general, los mayores cambios positivos de la magnitud del viento a 100 m se observan en el océano (~ 8%) principalmente en el Caribe, la región de los alisios del Pacífico y el oeste del Pacífico Mexicano. Por otro lado, los mayores cambios negativos (~ 7%) se observan en el sur del Pacífico Mexicano, principalmente en la estación de verano. En continente, las mayores diferencias se pueden observar en el norte de Colombia, por la posible intensificación de los vientos alisios. En invierno se observan los menores cambios en el futuro para todo el dominio de estudio; en las tres simulaciones se observa un incremento en la magnitud del viento en la región del Istmo de Tehuantepec (~ 4%) y en el noreste de México (~ 2%). El verano presenta los mayores cambios positivos en la región del Jet del Caribe y el norte de Colombia. Además, RegHad y RegMPI indican en esta estación, una posible reducción en la intensidad de los vientos alisios en el sur del Pacífico Mexicano sugiriendo un aumento en la actividad ciclónica en esa zona. Anualmente, las diferencias positivas (intensificación de los alisios) en el norte de Colombia y en la región del Jet del Caribe persisten a lo largo del año; asimismo, se observa un cambio positivo muy ligero (~ 2%) en los alisios del noreste de México.

El análisis individual de los modelos indica que RegMPI es el modelo que presenta los mayores cambios en el futuro a lo largo del año, los cuales se observan en primavera, verano y otoño, siendo verano el de los mayores cambios. En esta estación, se puede observar que RegMPI muestra un cambio positivo considerable (> 8%) en las regiones del Jet del Caribe y norte de Colombia. Por otro lado, los cambios más importantes en el futuro cercano de RegHad podrían ocurrir en primavera y verano. La intensidad de los vientos podría incrementarse > 10% en primavera en la región de la confluencia de los vientos alisios, mientras que en verano los mayores cambios se observan al sur del Pacífico Mexicano (reducción de un 8% en la magnitud del viento).

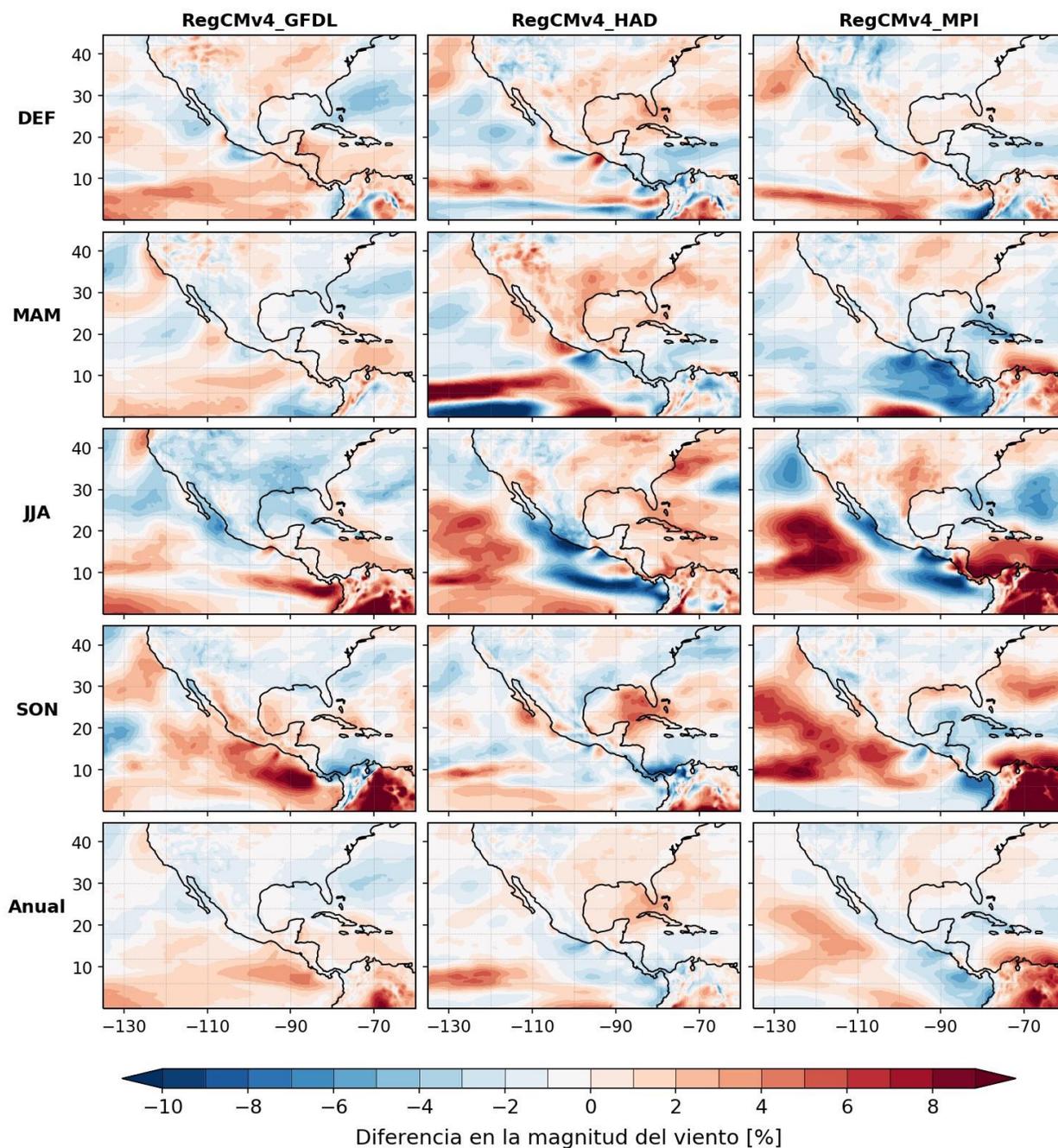


Figura 38. Cambios relativos (%) estacionales del viento a 100 m del futuro cercano (2021-2050) menos el periodo histórico (1981-2010). Datos de RegGFDL (primera columna), RegHad (columna de en medio) y RegMPI (última columna).

Para sintetizar el rango de variabilidad de los distintos modelos, la Figura 39 muestra las diferencias estacionales en la magnitud del viento a 100 m del ensamble de los modelos RegGFDL, RegMPI y RegHad en el futuro cercano (2021-2050) menos el periodo histórico (1981-2010). En la mayor parte del dominio CORDEX-CAM, los cambios futuros son menores al 10%, con excepción del norte de Colombia en las

estaciones de verano y otoño (Figura 39.c y 39.d, respectivamente). Se distinguen tres regiones en donde el ensamble de los tres modelos identifica cambios del mismo orden en la intensidad del viento en el futuro: la región de los alisios en el oeste del Pacífico Mexicano ($\sim 10^\circ$ norte) con sesgos positivos del 5%; la región del Caribe con cambios positivos del 4% en las estaciones de primavera y verano (Figura 39.b y 39.c); y la región de las costas del Pacífico Mexicano y de Centroamérica, donde podría haber una reducción de la magnitud del viento ($\sim 8\%$) en los meses de primavera y verano (Figura 39.b y 39.c). Específicamente para México en el mes de invierno, se espera un aumento muy pequeño (entre 1 y 2%) en la magnitud del viento a 100 m en las regiones del noreste de México, Istmo de Tehuantepec, Cabo Corrientes y Golfo de México; mientras que a Península de B.C., Sonora y Sinaloa muestran una reducción del 1%. En verano se esperan las mayores diferencias ($\sim 8\%$) en México, destacando la disminución de la intensidad del viento en el centro y norte de México, junto con la costa del Pacífico Central Mexicano. En E.U.A. las diferencias encontradas son menores a 4%, durante invierno, primavera y verano. Los escenarios futuros muestran un patrón polarizado en E.U.A., con aumentos en la magnitud del viento en el lado este y disminuciones en el oeste, mientras que para otoño se espera una disminución de 1% en la intensidad de viento en casi todo E.U.A. Para Centroamérica las proyecciones indican, en general, una disminución de la magnitud del viento a 100 m en invierno (1%), primavera (1%), otoño (4%), y en verano un aumento generalizado del 2%.

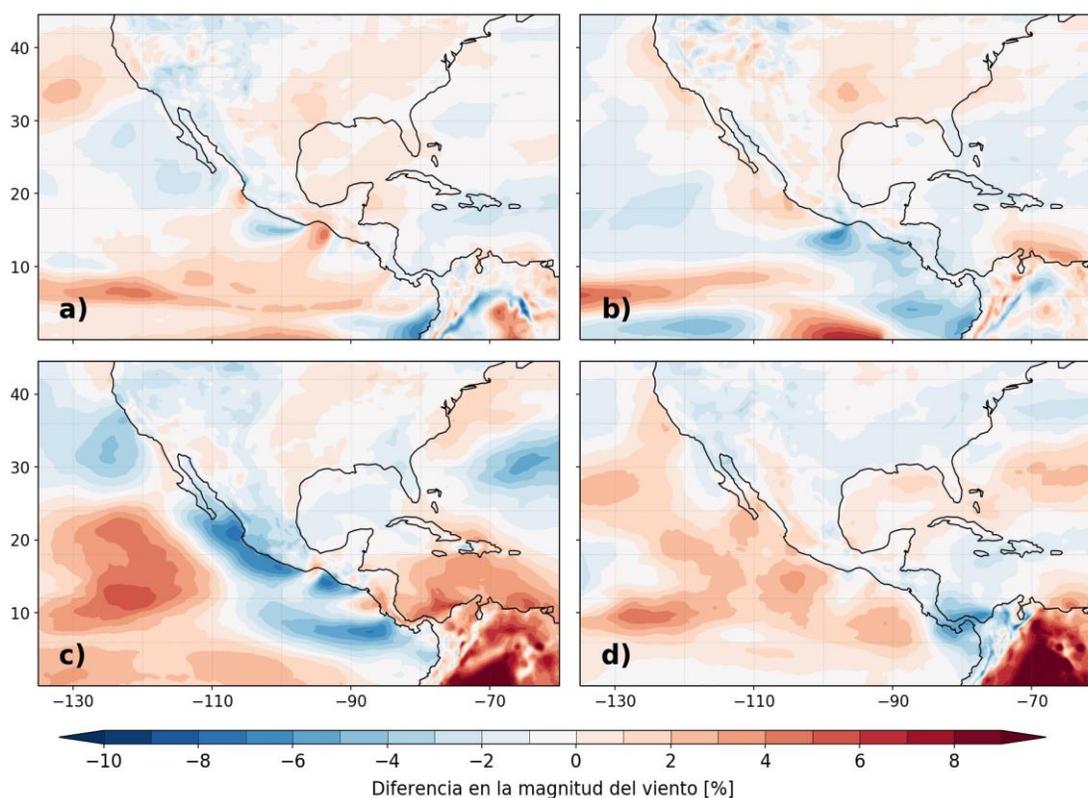


Figura 39. Cambios relativos (%) estacionales (invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d)) del viento a 100 m de altura del futuro cercano (2021-2050) menos el periodo histórico (1981-2010) del ensamble multimodelo.

La Figura 40 muestra las diferencias estacionales en la magnitud del viento a 10 m (%) del ensamble de los modelos RegGFDL, RegMPI y RegHad en el futuro cercano (2021-2050) menos el periodo histórico (1981-2010). En general, las diferencias a 10 m tienen los mismos patrones que los observados en la Figura 39, pero con ligeros cambios. Los cambios futuros en los vientos a 10 m son ligeramente más intensos (~ 1% más) en las regiones de continente que las diferencias a 100 m, especialmente en las regiones con orografía compleja. Por otro lado, los cambios observados en los vientos a 10 m en las regiones oceánicas, son ligeramente menos intensos (1% menos) que los vistos a la altura de 100 m (Figura 39).

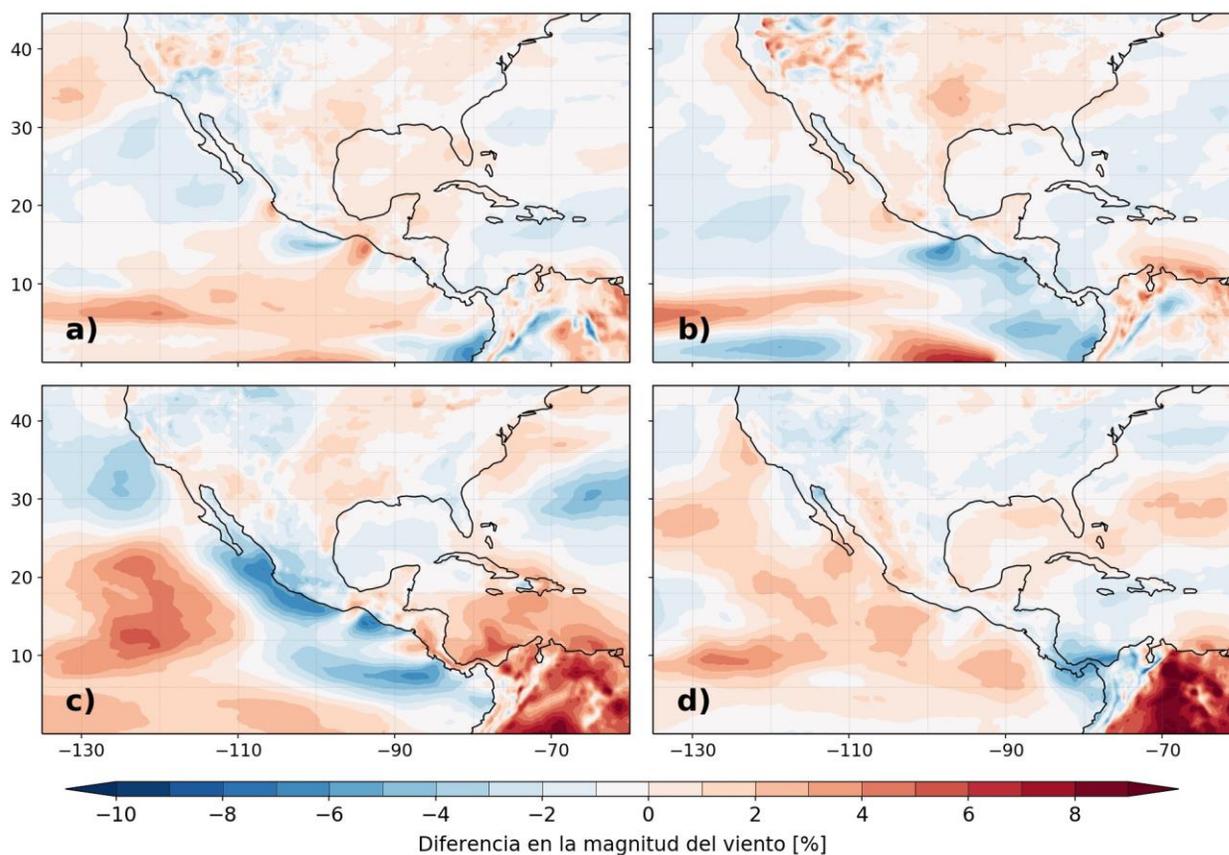


Figura 40. Igual que la Figura 39 pero para una altura de 10 m.

3.4.3. Cambios en los patrones de circulación

De la misma manera como se realizó en la sección 3.3.1, se mapearon las salidas futuras de RegGFDL, RegMPI y RegHad a los patrones identificados en el periodo histórico (Figura 21). De esta forma, solo se muestra el cambio en la ocurrencia de estos patrones y no el cambio en magnitudes y direcciones del

viento. El motivo de que se realizara de esta manera, fue debido a que los cambios en el futuro cercano del viento a 100 m fueron muy pequeños en dirección y magnitud (resultados de las secciones 3.4.1 y 3.4.2). Al no haber cambios sustanciales del viento, como para suponer la existencia de nuevos patrones de circulación en el futuro cercano, sería innecesario entrenar los SOMs con las salidas futuras ya que posiblemente se encontrarían los mismos patrones.

La Figura 41 muestra los cambios relativos entre los patrones encontrados en el futuro cercano (2021-2050) y el periodo histórico (1981-2010) por cada experimento (RegGFDL, RegMPI y RegHad). Al igual que los resultados de las secciones 3.4.1 y 3.4.2, los cambios relativos por experimento son muy pequeños. Las diferencias relativas se encuentran en los rangos de -2.4 hasta los 2.6% para los diversos patrones identificados. En varios de los patrones por modelo, no se observa un común acuerdo en la tendencia del cambio en las frecuencias. Para los cambios relativos por modelos, RegGFDL (Figura 41.a) presenta los mayores cambios en la frecuencia de ocurrencia de los vientos Tehuanos (nodos [4,2] y [4,3]) y los vientos intensos en primavera (nodo [1,2]). Estos cambios relativos sugieren que RegGFDL observa un incremento en la actividad frontal en la estación de otoño (2.4% más) y una mayor incidencia de los frentes en México (2.3% más); además de una reducción de los sistemas frontales a principios de la estación de primavera (-1.7%). Para RegHad (Figura 41.b), los cambios relativos son aun menores que los observados en las salidas de RegGFDL. El rango de los cambios observados por RegHad van desde los -0.9 hasta el 1.0% con este último siendo el patrón de vientos intensos en primavera (nodo [1,2]). Finalmente, la frecuencia de los patrones identificados en el futuro de las salidas de RegMPI (Figura 41.c), muestran mayor incidencia de eventos de norte en México (1.3% más) y una mayor frecuencia de paso de sistemas frontales en la región sureste de E.U.A. (2.6% más, nodo [2,3]). Por otro lado, se observa una reducción en la frecuencia (2.4% menos) del patrón recurrente de los vientos en las horas de la tarde (nodo [4,3]).

En general, los modelos RegGFDL y RegMPI presentan los mayores cambios relativos por patrones, mostrando un acuerdo en el aumento de eventos de norte en México. Sin embargo, en la evaluación histórica, estos modelos fueron los que presentaron los mayores sesgos. Por otro lado, RegHad fue el modelo con los menores cambios en todos los patrones y el de mejor desempeño en la evaluación histórica y en el análisis de los SOMs históricos.

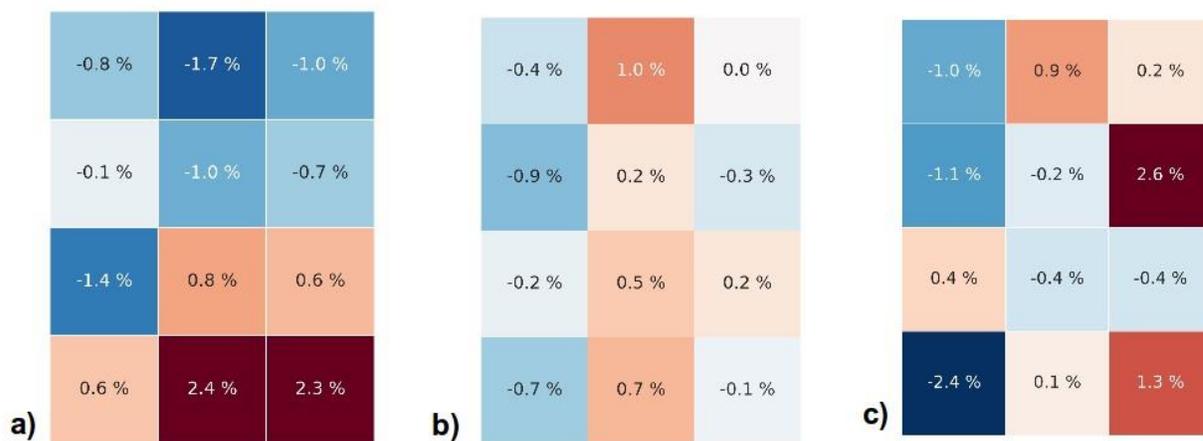


Figura 41. Diferencias relativas en el futuro cercano (2021-2050) del porcentaje de frecuencias de ocurrencia de cada nodo del SOM utilizando las salidas de RegCM4.7 forzado con los modelos globales: RegGFDL (a), RegHad (b) y RegMPI (c).

Capítulo 4. Discusión y conclusiones

El objetivo general de la tesis fue determinar el cambio en la circulación de mesoescala de los vientos a 100 y 10 m de altura en México ante escenarios de cambio climático con el modelo regional RegCM4.7.1. Para esto, primero se analizaron los vientos observados durante 2018 de siete torres eólicas de México. Esto permitió hacer una caracterización de los vientos observados en varias escalas de tiempo (horaria, diaria y mensual) y también sirvió para evaluar los reanálisis de MERRA2, ERA5 y NARR, así como el modelo regional forzado con ERA-Int 75 (RegERAInt). RegERAInt mostró un mejor desempeño que los reanálisis en la simulación de la distribución de las magnitudes promedio y los ciclos diurno y anual del viento en los 7 sitios observacionales, mientras que ERA5 fue el reanálisis que reprodujo mejor las características del viento en los 7 sitios.

Para esta evaluación se descartó una interpolación horizontal de las salidas de los reanálisis y el modelo regional a las observaciones de las torres de medición debido a que no se consideraron los efectos locales de la topografía y rugosidad (factores importantes en el viento local). En vez de ello se seleccionó el punto de malla más cercano a las torres de medición (Figura 42). Al utilizar los puntos de malla más cercanos se resalta el impacto de la simplificación del terreno por parte del modelo regional y los reanálisis en la intensidad del viento. Por lo tanto, consideramos que una de las razones por las que RegCM simuló mejor la magnitud de los vientos locales, fue debido a su mayor resolución espacial. Sin embargo, es importante distinguir en un futuro si este mejor desempeño se atribuye a la cercanía del punto de malla o a una mejor representación de la topografía en el modelo regional (Rife et al., 2004). Aunque RegCM mostró un buen desempeño en general, los resultados de RegERAInt muestran errores grandes en la magnitud y dirección del viento en los sitios con orografía muy compleja, como era de esperarse, sugiriendo la necesidad de una modelación con resolución más fina en la horizontal (< 25 km) y en la vertical (> 23 niveles) para resolver adecuadamente los efectos de las estructuras topográficas en la velocidad del viento. Sin embargo, no en todos los casos un aumento en la resolución conlleva a una mejora en la magnitud del viento promedio (Pryor et al., 2012b).

Los reanálisis ERA5 y NARR, que tienen resoluciones espaciales de ~31 y 32 km, respectivamente, comparables a las de RegERAInt (~25 km), presentaron los mayores sesgos en magnitud con respecto a las observaciones, especialmente NARR que incluso tuvo mayores errores que el reanálisis MERRA2 que tiene una resolución más gruesa (0.5° x 0.65°). Esto sugiere que, factores como la rugosidad y la orografía empleadas en los reanálisis y la representación de la capa límite planetaria podrían generar un mayor impacto en la simulación de vientos que la resolución espacial. Por ejemplo, consideramos que ERA5

resuelve de manera adecuada los procesos en la capa límite planetaria debido a su alta resolución vertical (137 niveles) en niveles sigma. Sin embargo, el esquema de capa límite de ERA5 utiliza una parametrización de arrastre orográfico para estructuras mayores a 5 km (ECMWF, 2013; Sandu et al., 2016). Este esquema aumenta la rugosidad del terreno por medio de una *rugosidad efectiva* (Beljaars et al., 2004) que reduce considerablemente la magnitud del viento. Esto podría ser la causa de que ERA5 subestime considerablemente la magnitud del viento en los sitios de observación. No obstante, ERA5 reproduce muy bien la dirección del viento y la forma de los ciclos diurnos y anuales en los 7 sitios observacionales. De no ser por los problemas en la magnitud del viento, ERA5 podría ser el mejor referente en los vientos a 100 m para este estudio.

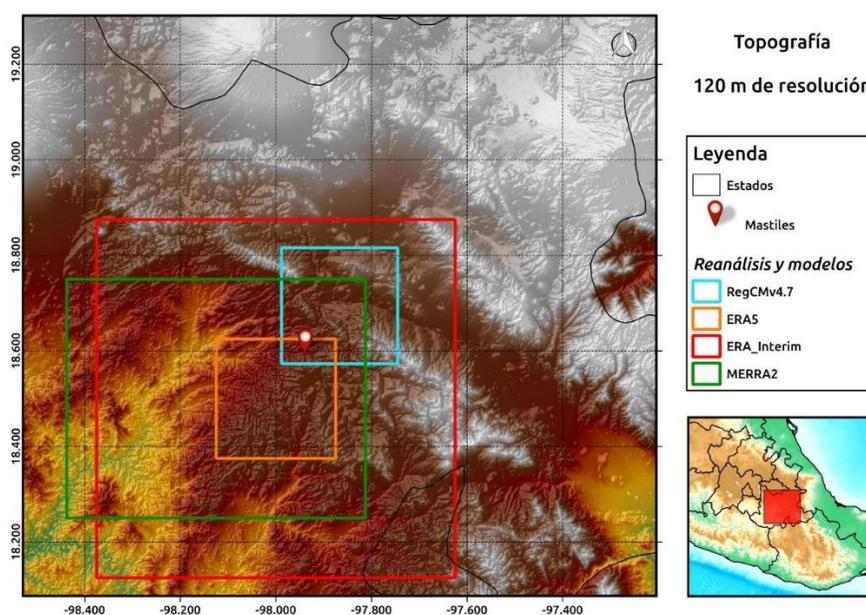


Figura 42. Ejemplo de simplificación del terreno en el modelo regional y los reanálisis. Los cuadros de colores representan los puntos de malla más cercanos a la torre de viento en Tepexi, Puebla. Modelo de Elevación Digital de INEGI (2013).

Otra fuente de incertidumbre en la evaluación con las observaciones fue la extrapolación vertical de la magnitud del viento. Debido a que no en todos los casos se contaba con información de la rugosidad o estabilidad atmosférica, se optó por realizar regresiones del perfil del viento en todas las bases de datos para ser consistentes. La extrapolación se hizo considerando una estabilidad atmosférica neutra. Aunque hacer una corrección por estabilidad seguramente mejoraría los valores de la magnitud promedio del viento, las discrepancias en la magnitud promedio de los reanálisis y el modelo regional se atribuyen más a los factores descritos anteriormente (diferentes orografías, rugosidades y esquemas).

De acuerdo con la intercomparación histórica de RegERAInt con los reanálisis en el dominio CORDEX-Centroamérica, RegERAInt sobreestimó la magnitud del viento a 10 y 100 m de altura en casi todo el dominio con respecto a los reanálisis principalmente en las regiones con orografía compleja. En diversas regiones del continente, los sesgos se consideraron como sistemáticos debido a que fueron persistentes en los análisis estacionales. Estas diferencias sistemáticas podrían asociarse al valor agregado que conlleva una resolución espacial más fina en el reescalamiento dinámico. Aunque RegERAInt sobreestimó la magnitud del viento en el continente con respecto a los reanálisis durante el periodo histórico, en la evaluación con las observaciones de las siete torres, los reanálisis subestimaron considerablemente la magnitud de los vientos observados en el 2018, mientras que RegERAInt mostró mayores intensidades y fue el de mejor desempeño en la mayoría de los sitios y en diferentes escalas de tiempo. Por otra parte, con excepción del reanálisis NARR, la intercomparación espacial de los patrones de circulación del viento en las regiones de los sistemas de altas semipermanente y en los océanos mostró un buen acuerdo entre el modelo regional y los otros reanálisis. En cuestión de magnitud del viento, las menores discrepancias se obtuvieron entre RegERAInt y MERRA2, consistente con lo observado en el 2018. Por lo tanto, este trabajo mostró que RegCM forzado con ERA-Int 75 representó mejor el viento histórico en México que los reanálisis utilizados. No obstante, es necesario realizar, en un futuro, una evaluación más detallada de los reanálisis y el modelo regional utilizando más observaciones para corroborar lo anterior. Esto involucraría el uso de las redes de observaciones automáticas cerca de superficie o de productos derivados de satélites como escaterómetros o radares de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés).

Al comparar los experimentos de RegCM forzado con los tres MGCs (GFDL-ESM2M, MPI-ESM-MR y HadGEM2-ES) en el periodo histórico con respecto a RegERAInt encontramos que fueron capaces de simular los patrones promedio estacionales y anual del viento superficial y a 100 m en el dominio CORDEX-CAM. Sin embargo, los tres experimentos presentan sesgos positivos en la intensidad del viento en la mayor parte del dominio principalmente en el océano y en algunas regiones montañosas (Figura 20, Capítulo 3) siendo RegHad el que presentó las diferencias más pequeñas y RegGFDL las mayores. En la misma figura se muestra que el ensamble promedio de los tres experimentos logra reducir significativamente los sesgos. A diferencia de la intercomparación con los reanálisis, en la evaluación de las tres salidas regionalizadas se encontró que los sesgos de la magnitud del viento son mayores en el océano que en continente. Debido a que se usó la misma configuración en el modelo regional (misma topografía, rugosidad y parametrizaciones) para realizar las tres simulaciones es posible que las diferencias en los sesgos de las tres simulaciones estén mayormente asociadas a los forzamientos laterales (circulación) y de superficie (temperatura superficial del mar) de los modelos; es decir, a la representación dinámica y física del sistema climático en los modelos globales y su variabilidad interna (Giorgi, 2010; Giorgi

y Francisco, 2000). Por lo que, para complementar la evaluación de las salidas de RegCM forzada con los tres MCGs se sugiere realizar una comparación directa con el modelo global forzante y su salida regionalizada con RegCM. De esta comparación se espera que los MCGs y las salidas regionalizadas muestren congruencia en los sistemas de gran escala, mientras que el modelo regional aporte un valor agregado en la simulación de variables (p. ej. viento superficial) o fenómenos de mesoescala influenciados por la topografía de la región (Flato et al., 2013).

Para caracterizar y sintetizar mejor los patrones principales de viento en CORDEX-CAM, se utilizaron los mapas auto-organizados (SOMs) durante el periodo histórico. A diferencia de otros estudios realizados con los SOMs entrenados con forzantes dinámicos a escala diaria para inferir indirectamente la variabilidad de una variable climática (e.g., Cavazos, 1999, 2000; Cavazos et al., 2002; Díaz-Esteban y Raga, 2018), en este trabajo se entrenó a los SOMs directamente con la variable de interés (el viento). Se realizaron experimentos donde se consideraron las variables forzantes (presión al nivel del mar y temperatura) para entrenar los SOMs, pero los compuestos del viento generados a partir de este entrenamiento no mostraron un rango de variabilidad significativo entre los modos resultantes. Al entrenar los SOMs directamente con las componentes del viento (U y V) y con datos semi-horarios, encontramos directamente los modos de variación de los patrones de vientos más intensos y frecuentes en México y en tres regiones de interés por su importancia en la producción de energía eólica: La Rumorosa, B.C., San Fernando Tamaulipas y La Ventosa, Oaxaca. Para entender los patrones sinópticos de circulación del viento encontrados en los modos de variabilidad de los SOMs, se crearon compuestos semi-horarios de presión a nivel del mar y temperatura superficial para cada patrón. Los SOMs entrenados con las salidas de RegERAInt en el periodo histórico identificaron cuatro grupos principales de regímenes de viento a 100 m que presentan intensidades mayores a 10 m/s (relevantes en la generación de energía) en diversas partes de México: (1) vientos intensos a sotavento de la Sierra Madre Occidental asociados a una circulación ciclónica en el centro de E.U.A en primavera; (2) vientos del oeste y noroeste en la Península de B.C. observados principalmente en verano debido a la interacción del sistema semipermanente del Pacífico Norte con la orografía de la península aunado a gradientes térmicos entre las aguas frías del Pacífico con aguas relativamente más cálidas del Golfo de California; (3) vientos alisios en el noreste de México observados en primavera asociados a fuertes gradientes de presión y gradientes térmicos entre el océano y el continente en primavera; y (4) vientos Tehuanos generados por el paso de sistemas frontales, principalmente en invierno en el Golfo de México y el sureste del país.

Para el análisis futuro, se analizó el ensamble promedio de RegCM4 forzado con tres modelos globales en un periodo cercano (2021-2050) bajo el escenario RCP8.5. Los cambios relativos del viento a 100 m de

altura en el dominio CORDEX-CAM y en los tres sitios de interés (La Rumorosa, San Fernando y la Ventosa) son pequeños (del orden de 0.25 m/s) en magnitud y en las distribuciones de probabilidad (no mostrado). En el océano es donde se observan cambios más grandes. Los cambios en el continente son comparables con los encontrados por Reboita et al., (2018) para CORDEX-Sur América; ellos utilizaron el mismo modelo regional (RegCM4), mismo escenario futuro (2020-2050 y RCP8.5) y forzamientos similares (GFDL-ESM2M, MPI-ESM-MR y HadGEM2-ES). Consideramos que las pequeñas diferencias encontradas se pueden atribuir al periodo de estudio seleccionado (2021-2050). De acuerdo con Kirtman et al. (2013), en el futuro cercano (2016-2035) las proyecciones de los modelos del CMIP5 tienden a simular patrones similares de cambio climático independientemente del escenario utilizado e incluso señalan que la variabilidad interna de los modelos globales tiene mayor peso en este periodo, que la propia configuración de los escenarios. Esto se debe a que las diferencias en los forzamientos radiativos entre los distintos escenarios son relativamente pequeñas hasta el 2030, pero se vuelven significativas a finales del año 2100 (Gunnar et al., 2013). Por otro lado, con los SOMs encontramos que individualmente RegCM forzado con GFDL-ESM2M, MPI-ESM-MR y HadGEM2-ES (RegGFDL, RegMPI y RegHad respectivamente) también mostraron cambios muy pequeños en la frecuencia de los patrones de circulación del viento a 100 m para el futuro cercano. RegGFDL y RegMPI presentaron los mayores cambios relativos, mientras que con RegHad mostró los cambios más pequeños.

En este estudio se investigaron los posibles cambios en el futuro del campo de vientos a 10 y 100 m de altura en México ante escenarios de cambio climático desde un punto de vista puntual, estacional y por patrones de circulación. Los resultados indican que, bajo el escenario de altas emisiones (RCP8.5), los cambios máximos en la magnitud del viento a 10 y 100 m de altura son menores a 10% en el dominio CORDEX-CAM. Por otro lado, de la metodología de esta investigación se obtuvo como resultado una caracterización de los vientos en bajos niveles en un periodo climatológico, resaltando la variabilidad espacial y temporal de los vientos en las distintas regiones de México. Esta es una contribución importante debido a que, en México, existen pocos trabajos enfocados en los vientos, siendo este estudio, uno de los primeros en realizar una caracterización de los patrones del viento de mesoescala a 100 m y su relación con mecanismos dinámicos forzantes.

Como trabajo futuro, se planea realizar un reescalamiento a microescala para verificar si los cambios pequeños en los vientos de mesoescala, encontrados en este trabajo, repercutirían sustancialmente en la generación de energía eólica en los sitios de interés. Asimismo, se planea cuantificar la incertidumbre de las simulaciones para tomarla en cuenta al realizar la simulación a microescala.

Literatura citada

- Badger, J., Frank, H., Hahmann, A. N., Giebel, G. 2014. Wind-climate estimation based on mesoscale and microscale modeling: Statistical-dynamical downscaling for wind energy applications. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(8), 1901–1919. doi:10.1175/JAMC-D-13-0147.1
- Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A., Gómez, J. 2011. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753–1766. doi:10.1016/j.rser.2010.12.008
- Beljaars, A. C. M., Brown, A. R., Wood, N. 2004. A new parametrization of turbulent orographic form drag. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130(599), 1327–1347.
- Blackadar, A. K. 1957. Boundary Layer Wind Maxima and Their Significance for the Growth of Nocturnal Inversions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 38(5), 283–290. doi:10.1175/1520-0477-38.5.283
- Bonner, W. D. 1968. Climatology of the Low Level Jet. *Monthly Weather Review*, 96(12), 833–850. doi:10.1175/1520-0493(1968)096<0833:cotllj>2.0.co;2
- Bruckner, T., Bashmakov, I. A., Mulugetta, Y., Chum, H., la Vega Navarro, A., Edmonds, J., Faaij, A., Fungtammasan, B., Garg, A., Hertwich, E., others. 2014. Energy Systems. En O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, & J. Minx (Eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. pp. 511–597.
- Bukovsky, M. S., Carrillo, C. M., Gochis, D. J., Hammerling, D. M., McCrary, R. R., Mearns, L. O. 2015. Toward assessing NARCCAP regional climate model credibility for the North American monsoon: Future climate simulations. *Journal of Climate*, 28(17), 6707–6728. doi:10.1175/JCLI-D-14-00695.1
- Cavazos, T. 1999. Large-scale circulation anomalies conducive to extreme precipitation events and derivation of daily rainfall in northeastern Mexico and southeastern Texas. *Journal of Climate*, 12(5 II), 1506–1523.
- Cavazos, T. 2000. Using self-organizing maps to investigate extreme climate events: An application to wintertime precipitation in the Balkans. *Journal of Climate*, 13(10), 1718–1732. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1718:USOMTI>2.0.CO;2
- Cavazos, T., Comrie, A. C., Liverman, D. M. 2002. Intraseasonal variability associated with wet monsoons in southeast Arizona. *Journal of Climate*, 15(17), 2477–2490. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<2477:IVAWWM>2.0.CO;2
- Chelton, D. B., Freilich, M. H., Esbensen, S. K. 2000. Satellite observations of the wind jets off the pacific coast of Central America. Part I: Case studies and statistical characteristics. *Monthly Weather Review*, 128(7 I), 1993–2018. doi:10.1175/1520-0493(2000)128<1993:SOOTWJ>2.0.CO;2
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I.,

- Wiltshire, A., Woodward, S. 2011. Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development Discussions*, 4(2), 997–1062. doi:10.5194/gmdd-4-997-2011
- Colorado-Ruiz, G., Cavazos, T., Salinas, J. A., De Grau, P., Ayala, R. 2018. Climate change projections from Coupled Model Intercomparison Project phase 5 multi-model weighted ensembles for Mexico, the North American monsoon, and the mid-summer drought region. *International Journal of Climatology*, 38(15), 5699–5716. doi:10.1002/joc.5773
- Copernicus Climate Change Service (C3S). 2017. ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Consultado el 1 de febrero de 2019, de Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS) website: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Coppola, E., Giorgi, F., Raffaele, F., Fuentes-Franco, R., Giuliani, G., Llopart-Pereira, M., Mangain, A., Mariotti, L., Diro, G. T., Torma, C. 2014. Present and future climatologies in the phase I CREMA experiment. *Climatic Change*, 125(1), 23–38. doi:10.1007/s10584-014-1137-9
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., ... Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. doi:10.1002/qj.828
- Díaz-Esteban, Y., Raga, G. B. 2018. Weather regimes associated with summer rainfall variability over southern Mexico. *International Journal of Climatology*, 38(1), 169–186. doi:10.1002/joc.5168
- Díaz-Esteban, Y., Raga, G. B., Díaz-Rodríguez, O. O. 2020. A Weather-Pattern-Based Evaluation of the Performance of CMIP5 Models over Mexico. *Climate*, 8(5). doi:10.3390/cli8010005
- Diputados, C. de. 2008. Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética. de <http://www.cre.gob.mx/documento/3870.pdf>
- Dorrego Portela, J. R., Lastres Danguillecourt, O., Núñez Rodríguez, A., Hernández Galvez, G., Miranda, U., Saldaña, R. 2011. Wind Energy Generation Potential in Union Hidalgo , Mexico : A preliminary Study. *Journal Of Energy and Power Engineering*, 5, 149–154.
- Dunne, J. P., John, J. G., Adcroft, A. J., Griffies, S. M., Hallberg, R. W., Shevliakova, E., Stouffer, R. J., Cooke, W., Dunne, K. A., Harrison, M. J., Krasting, J. P., Malyshev, S. L., Milly, P. C. D., Phillipps, P. J., Sentman, L. T., Samuels, B. L., Spelman, M. J., Winton, M., ... Zadeh, N. 2012. GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *Journal of Climate*, 25(19), 6646–6665. doi:10.1175/JCLI-D-11-00560.1
- ECMWF. 2013. Part IV: Physical Processes. En IFS Documentation. IFS Documentation CY38R1. de <https://www.ecmwf.int/node/9245>
- Elguindi, N., Giorgi, F., Turuncoglu, U. 2014. Assessment of CMIP5 global model simulations over the subset of CORDEX domains used in the Phase I CREMA. *Climatic Change*, 125(1), 7–21. doi:10.1007/s10584-013-0935-9
- Elliott, D. L., Schwartz, M. N. 1993. Wind energy potential in the United States. En *Project energy '93: real energy technologies, 1993*, Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States), pp. 10. de

<https://www.osti.gov/servlets/purl/10189966>

- Emeis, S. 2013. Wind Energy Meteorology. En Springer. doi:10.2174/97816080528511060101
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., Rummukainen, M. 2013. Evaluation of Climate Models. En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. doi:10.1017/CBO9781107415324.020
- Geil, K. L., Serra, Y. L., Zeng, X. 2013. Assessment of CMIP5 model simulations of the North American monsoon system. *Journal of Climate*, 26(22), 8787–8801. doi:10.1175/JCLI-D-13-00044.1
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A. M., ... Zhao, B. 2017. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30(14), 5419–5454. doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1
- Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., ... Stevens, B. 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 572–597. doi:10.1002/jame.20038
- Giorgi, F. 2010. Uncertainties in climate change projections, from the global to the regional scale. *EPJ Web of Conferences*, 9, 115–129. doi:10.1051/epjconf/201009009
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G. T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U. U., Cozzini, S., Güttler, I., O'Brien, T. A., Tawfik, A. B., Shalaby, A., Zakey, A. S., Steiner, A. L., ... Brankovic, C. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52(1), 7–29. doi:10.3354/cr01018
- Giorgi, F., Francisco, R. 2000. Evaluating uncertainties in the prediction of regional climate change. *Geophysical Research Letters*, 27(9), 1295–1298.
- Giorgi, F., Gutowski, W. J. 2015. Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1), 467–490. doi:10.1146/annurev-environ-102014-021217
- Giorgi, F., Jones, C., Asrar, G. R. 2009. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *World Meteorological Organization Bulletin*, 58(3), 175–183.
- Giorgi, F., Marinucci, M. R., Bates, G. T. 1993. Development of a Second-Generation Regional Climate Model (RegCM2). Part I: Boundary-Layer and Radiative Transfer Processes. *Monthly Weather Review*, Vol. 121. doi:10.1175/1520-0493(1993)121<2794:DOASGR>2.0.CO;2
- Gross, M., Magar, V. 2016. Offshore wind energy climate projection using UPSCALE climate data under the RCP8.5 emission scenario. *PLoS ONE*, 11(10), 1–12. doi:10.1371/journal.pone.0165423

- Gryning, S.-E., Badger, J., Hahmann, A. N., Batchvarova, E. 2014. Current status and challenges in wind energy assessment. En *Weather matters for energy*. Springer. pp. 275–293.
- Gunnar, M., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. doi:10.1017/CBO9781107415324.018
- GWEC. 2017. *Global Wind Report 2017*.
- Hersbach, H., de Rosnay, P., Bell, B., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Alonso-Balmaseda, M., Balsamo, G., Bechtold, P., Berrisford, P., Bidlot, J.-R., de Boissésón, E., Bonavita, M., Browne, P., Buizza, R., Dahlgren, P., Dee, D., ... Zuo, H. 2018. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP. doi:10.21957/tkic6g3wm
- Holtzlag, a. a. M., De Bruijn, E. I. F., Pan, H.-L. 1990. A High Resolution Air Mass Transformation Model for Short-Range Weather Forecasting. *Monthly Weather Review*, Vol. 118. doi:10.1175/1520-0493(1990)118<1561:AHRAMT>2.0.CO;2
- Hordon, R. M. 2005. Pacific (Hawaiian) High. En J. E. Oliver (Ed.), *Encyclopedia of World Climatology*. doi:10.1007/1-4020-3266-8_156
- IEA. 2015. *World Energy Outlook 2015*. En *World Energy Outlook 2015*. doi:http://dx.doi.org/10.1787/weo-2015-en
- IEA. 2016. *Mexico Energy Outlook*. En International Energy Agency, Paris, France. de <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/MexicoEnergyOutlook.pdf>
- INEGI. 2013. *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Consultado el 23 de agosto de 2019, de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- International Energy Agency. 2016. *Mexico Energy Outlook*. En International Energy Agency, Paris, France. de <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/MexicoEnergyOutlook.pdf>
- IPCC, van Oldenborgh, G. J., Collins, M., Arblaster, J., Christensen, J. H., Marotzke, J., Power, S. B., Rummukainen, M., Zhou, T. 2013. Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections . En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. doi:10.1017/CBO9781107415324.029
- Jaramillo, O. A., Saldana, R., Miranda, U. 2004. Wind power potential of Baja California Sur, México. *Renewable Energy*, 29(13), 2087–2100. doi:10.1016/j.renene.2004.03.004
- Johansson, E. E. 2019. *The future of wind power resourced in Denmark predicted by downscaling global circulation models Wind Energy Master Report*. Technical University of Denmark. 66 pp.
- Jones, P. W. 1999. First- and second-order conservative remapping schemes for grids in spherical coordinates. *Monthly Weather Review*, 127(9), 2204–2210. doi:10.1175/1520-

0493(1999)127<2204:FASOCR>2.0.CO;2

- Karnauskas, K. B., Lundquist, J. K., Zhang, L. 2018. Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions. *Nature Geoscience*, 11(1), 38–43. doi:10.1038/s41561-017-0029-9
- Kiehl, J. T., Hack, J. J., Bonan, G. B., Boville, B. A., Briegleb, B. P., Williamson, D. L., Rasch, P. J. 1996. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). NCAR Technical Note NCAR/TN-420+STR, (September), 159. doi:DOI: 10.5065/D6FF3Q99
- Kirtman, B., Power, S. B., Adedoyin, A. J., Boer, G. J., Bojariu, R., Camilloni, I., Doblas-Reyes, F., Fiore, A. M., Kimoto, M., Meehl, G., Prather, M., Sarr, A., Schär, C., Sutton, R., van Oldenborgh, G. J., Vecchi, G., Wang, H. J. 2013. Near-term climate change: Projections and predictability. En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. doi:10.1017/CBO9781107415324.023
- Kohonen, T. 2001. Self-Organizing Maps (3a ed.; T. S. Huang, T. Kohonen, M. R. Schroeder, Eds.). doi:10.1111/j.1530-0277.2007.00437.x
- Kohonen, T., Hynninen, J., Kangas, J., Laaksonen, J. 1996. SOM PAK: The Self-Organizing Map Program Package. Report A31, Helsinki University of Technology, Laboratory of Computer and Information Science, (February). de <http://www.cis.hut.fi/nnrc/nnrc-programs.html>
- Kumar, D., Mishra, V., Ganguly, A. R. 2015. Evaluating wind extremes in CMIP5 climate models. *Climate Dynamics*, 45(1–2), 441–453. doi:10.1007/s00382-014-2306-2
- Luna-Niño, R., Cavazos, T. 2018. Formation of a coastal barrier jet in the Gulf of Mexico due to the interaction of cold fronts with the Sierra Madre Oriental mountain range. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(710), 115–128.
- Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P. C., Ebisuzaki, W., Jović, D., Woollen, J., Rogers, E., Berbery, E. H., Ek, M. B., Fan, Y., Grumbine, R., Higgins, W., Li, H., Lin, Y., Manikin, G., Parrish, D., Shi, W. 2006. North American regional reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(3), 343–360. doi:10.1175/BAMS-87-3-343
- Pal, J. S., Small, E. E., Eltahir, E. A. B. 2000. Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D24), 29579–29594. doi:10.1029/2000JD900415
- Pereira de Lucena, A. F., Szklo, A. S., Schaeffer, R., Dutra, R. M. 2010. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. *Renewable Energy*, 35(5), 904–912. doi:10.1016/j.renene.2009.10.022
- Pryor, S. C., Barthelmie, R. J. 2010. Climate change impacts on wind energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 430–437. doi:10.1016/j.rser.2009.07.028
- Pryor, S. C., Barthelmie, R. J., Clausen, N. E., Drews, M., MacKellar, N., Kjellström, E. 2012. Analyses of possible changes in intense and extreme wind speeds over northern Europe under climate change scenarios. *Climate Dynamics*, 38(1–2), 189–208. doi:10.1007/s00382-010-0955-3
- Pryor, S. C., Nikulin, G., Jones, C. 2012. Influence of spatial resolution on regional climate model derived

- wind climates. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(3), 1–11. doi:10.1029/2011JD016822
- Reboita, M. S., Amaro, T. R., de Souza, M. R. 2018. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. *Climate Dynamics*, 51(1–2), 187–205. doi:10.1007/s00382-017-3913-5
- Reyers, M., Moemken, J., Pinto, J. G. 2016. Future changes of wind energy potentials over Europe in a large CMIP5 multi-model ensemble. *International Journal of Climatology*, 36(2), 783–796. doi:10.1002/joc.4382
- Rife, D. L., Davis, C. A., Liu, Y., Warner, T. T. 2004. Predictability of low-level winds by mesoscale meteorological models. *Monthly Weather Review*, 132(11), 2553–2569. doi:10.1175/MWR2801.1
- Saidur, R., Rahim, N. A., Islam, M. R., Solangi, K. H. 2011. Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2423–2430. doi:10.1016/j.rser.2011.02.024
- Sandu, I., Bechtold, P., Beljaars, A., Bozzo, A., Pithan, F., Shepherd, T. G., Zadra, A. 2016. Impacts of parameterized orographic drag on the Northern Hemisphere winter circulation. *Journal of advances in modeling earth systems*, 8(1), 196–211.
- Santos, F., Gómez-Gesteira, M., deCastro, M., Añel, J. A., Carvalho, D., Dias, J. M. 2018. On the accuracy of CORDEX RCMs to project future winds over the Iberian Peninsula and surrounding ocean. *Applied Energy*, 228. doi:10.1016/j.apenergy.2018.06.086
- Torres-Alavez, A., Cavazos, T., Turrent, C. 2014. Land-sea thermal contrast and intensity of the North American monsoon under climate change conditions. *Journal of Climate*, 27(12), 4566–4580. doi:10.1175/JCLI-D-13-00557.1
- Troen, I., Lundtang Petersen, E. 1989. *European Wind Atlas*. En Risø National Laboratory. doi:10.1016/0014-2999(86)90768-5
- Tuller, S. E., Brett, A. C. 1984. The characteristics of wind velocity that favor the fitting of a Weibull distribution in wind speed analysis. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(1), 124–134.
- Turrent, C., Zaitsev, O. 2014. Seasonal cycle of the near-surface diurnal wind field over the Bay of La Paz, Mexico. *Boundary-layer meteorology*, 151(2), 353–371.
- Whittaker, L. M., Horn, L. H. 1981. Geographical and seasonal distribution of North American cyclogenesis, 1958--1977. *Monthly Weather Review*, 109(11), 2312–2322.

Anexo

Se muestra la evaluación con las observaciones de las 4 torres restantes para el año 2018, similar a lo presentado en la Sección 3.1 para La Ventosa, San Fernando y la Rumorosa.

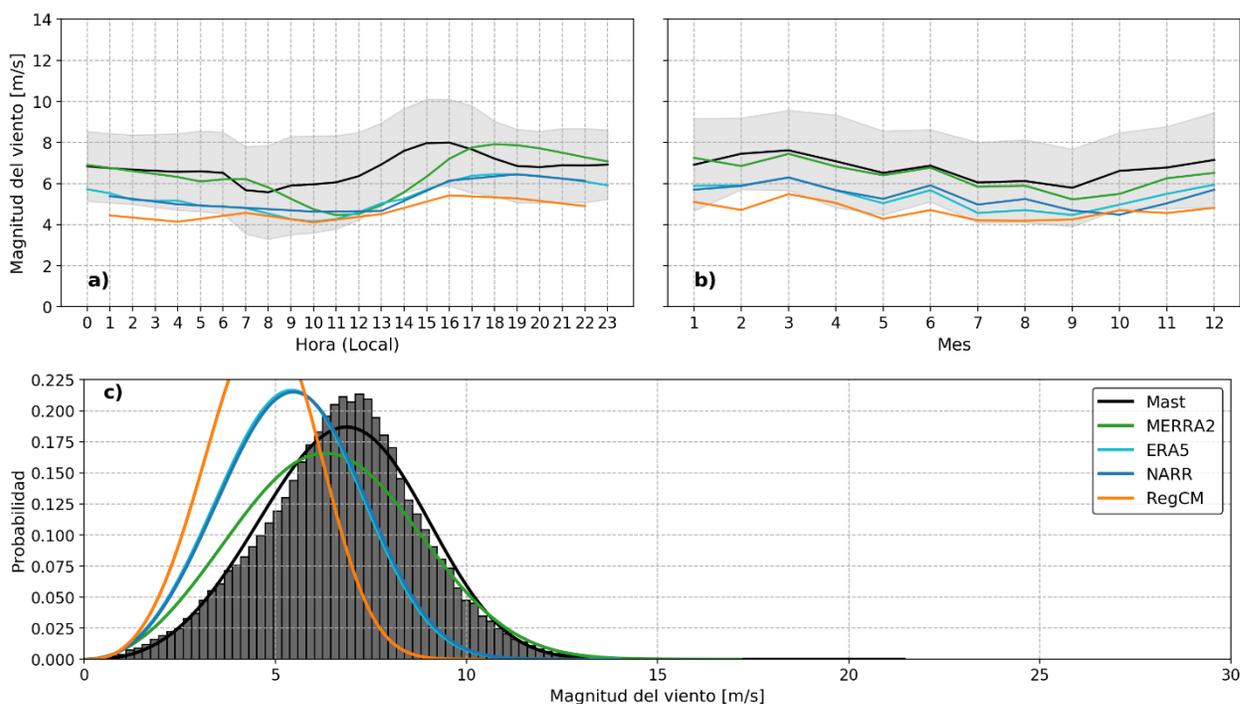


Figura 43. Intercomparación del viento a 100 m de altura en el mástil de Mérida, Yucatán durante 2018 con los datos de los puntos de malla más cercanos de los reanálisis (MERRA2, ERA5 y NARR) y el modelo regional RegCM4.7 forzado con ERAInt. (a) Ciclo diario, (b) ciclo anual y (c) distribución de densidad de probabilidad Weibull del viento. La región sombreada en (a) y (b) representa la desviación estándar de las observaciones. El histograma en (c) representa a las observaciones del mástil (Mast) y la curva negra, su ajuste.

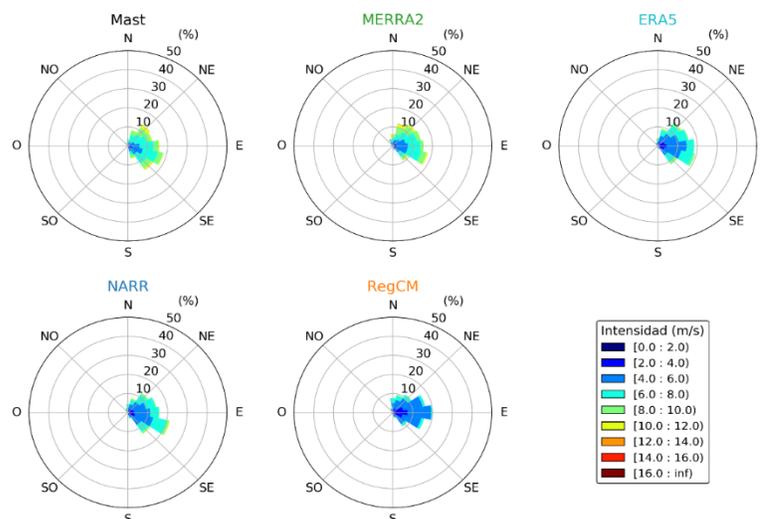


Figura 44. Comparación de rosas de viento (con datos horarios y tri-horarios) a 100 m de altura en el mástil de Mérida, Yucatán, los reanálisis, el modelo regional RegCM durante el año 2018.

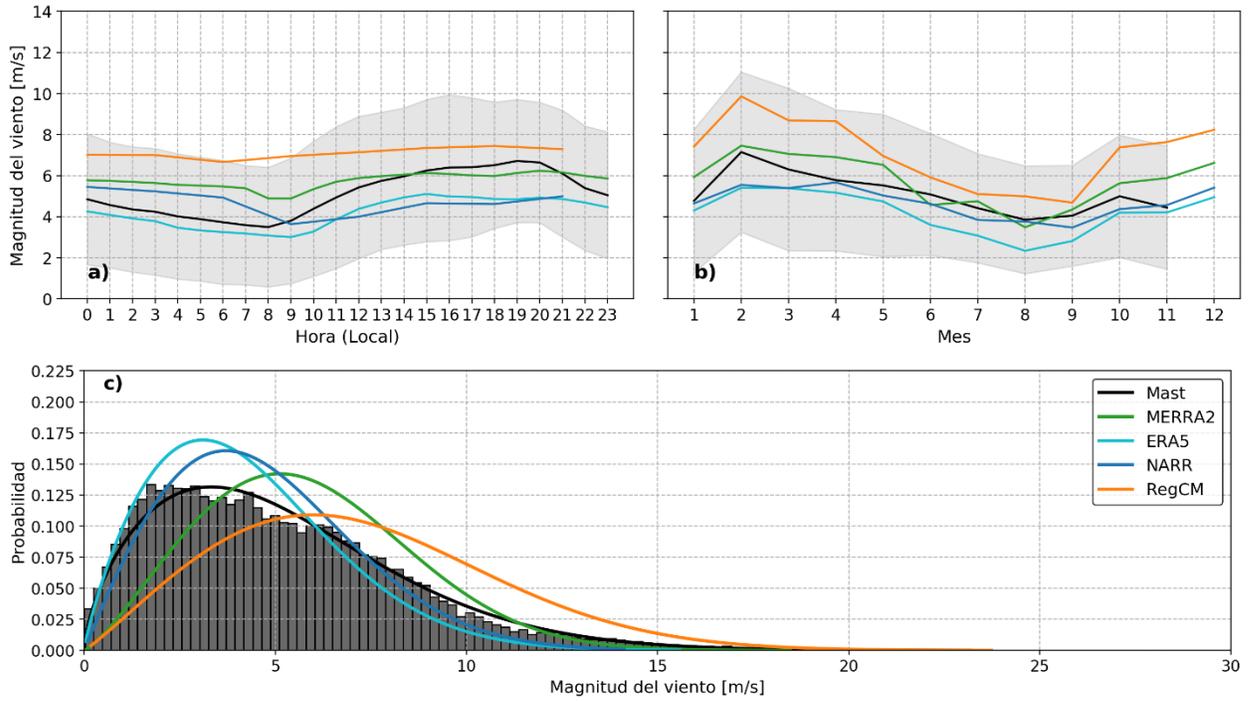


Figura 45. Igual que la Figura 43, pero para el mástil de Cuauhtémoc, Chihuahua.

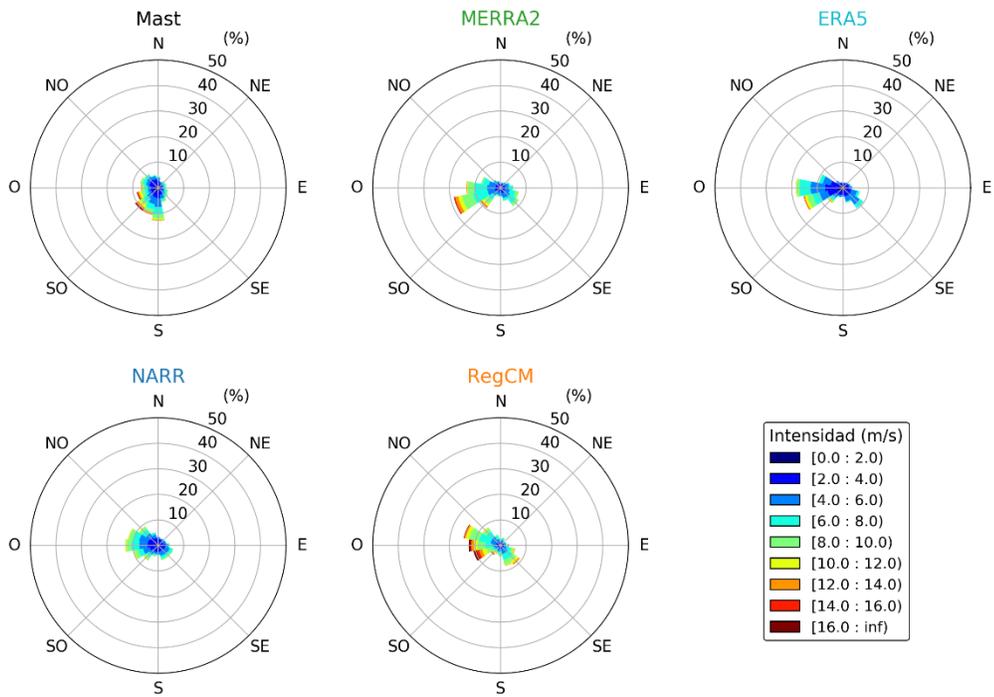


Figura 46. Igual que igual que la Figura 44, pero para el mástil de Cuauhtémoc, Chihuahua.

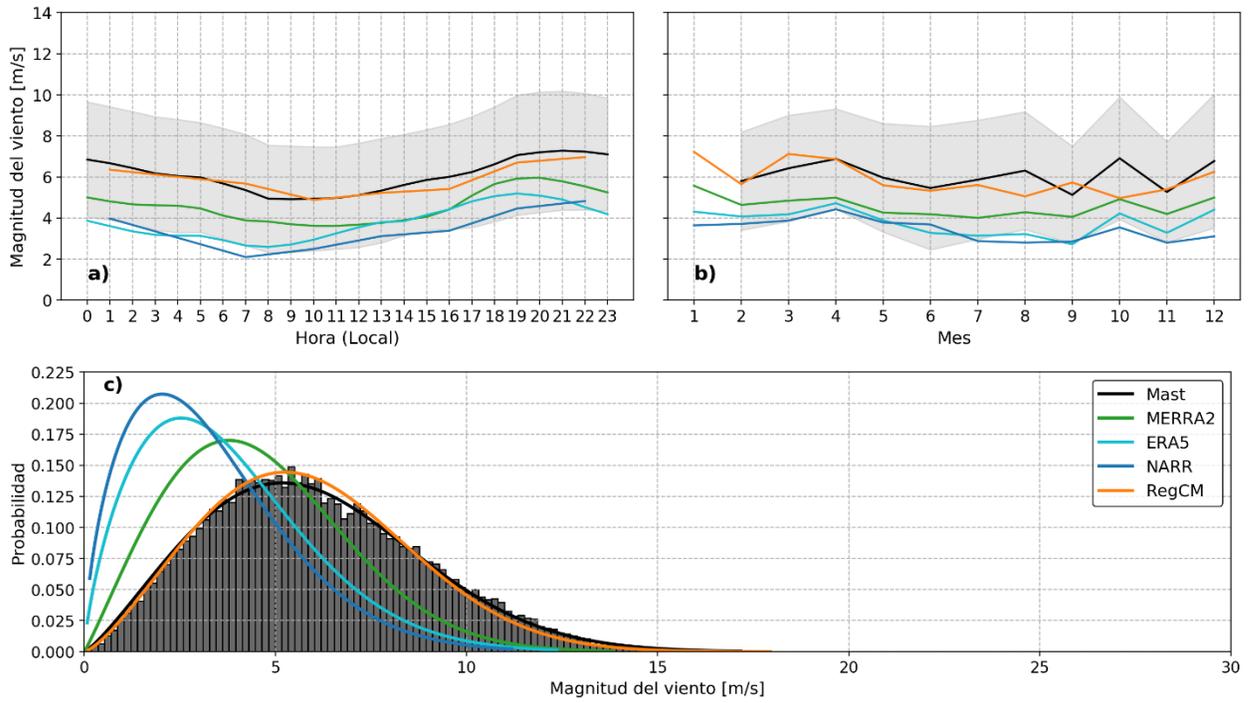


Figura 47. Igual que la Figura 43, pero para el mástil de Ojuelos, Jalisco.

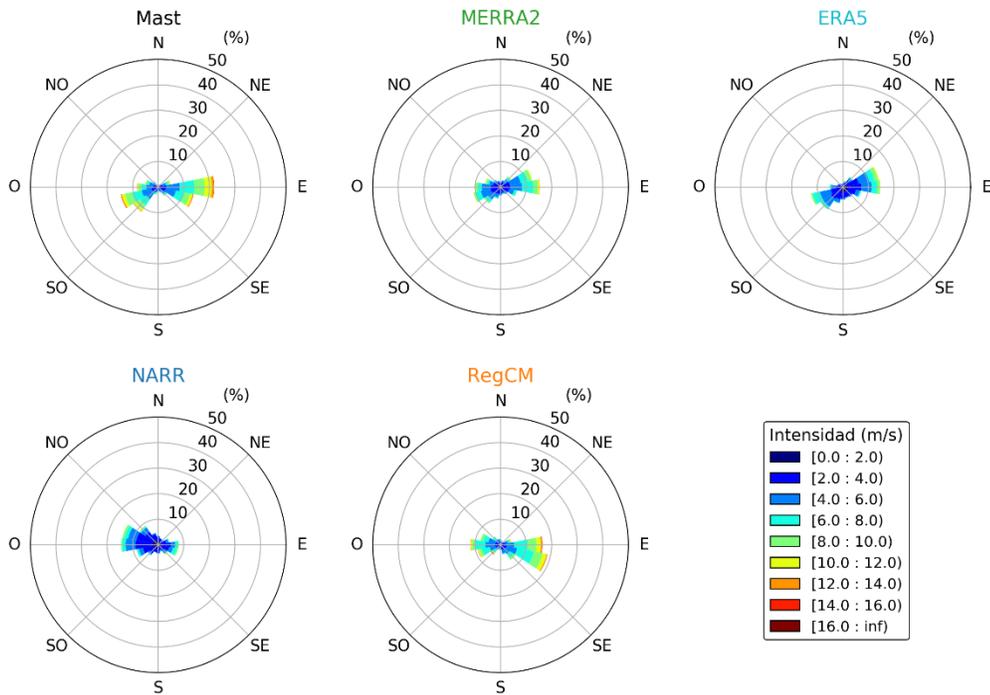


Figura 48. Igual que la Figura 44, pero para el mástil de Ojuelos, Jalisco.

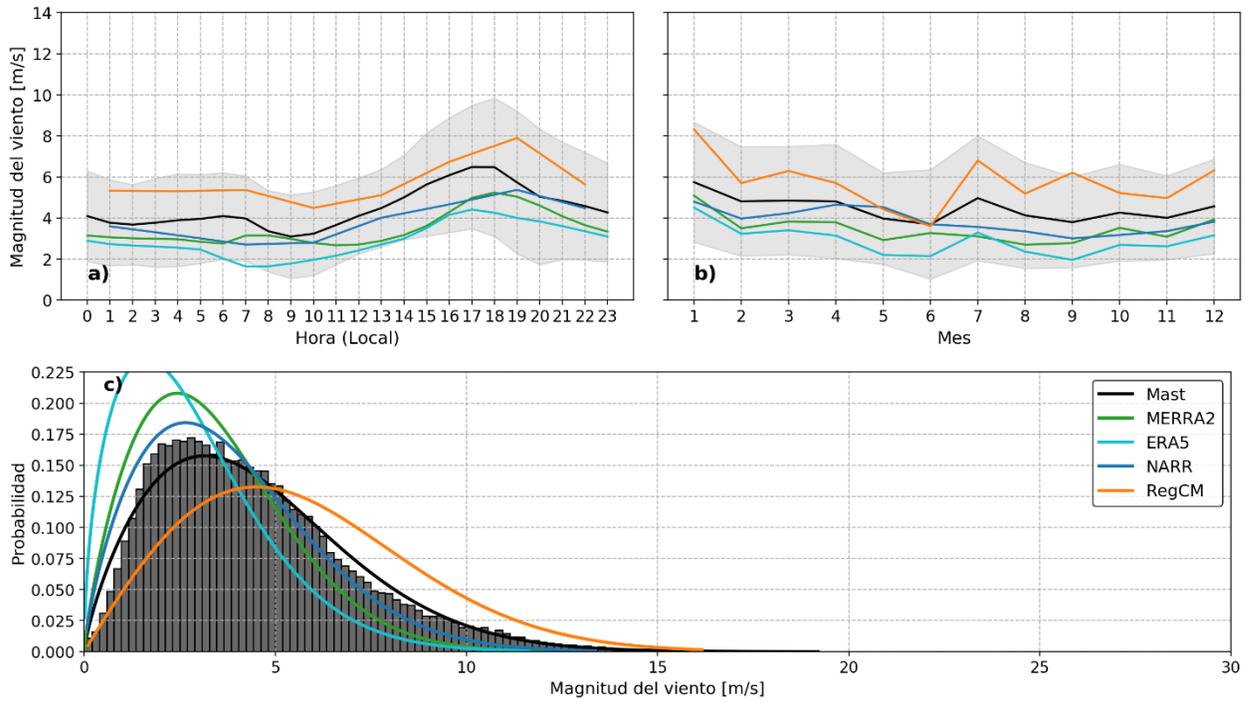


Figura 49. Igual que la Figura 43, pero para el mástil de Tepexi, Puebla.

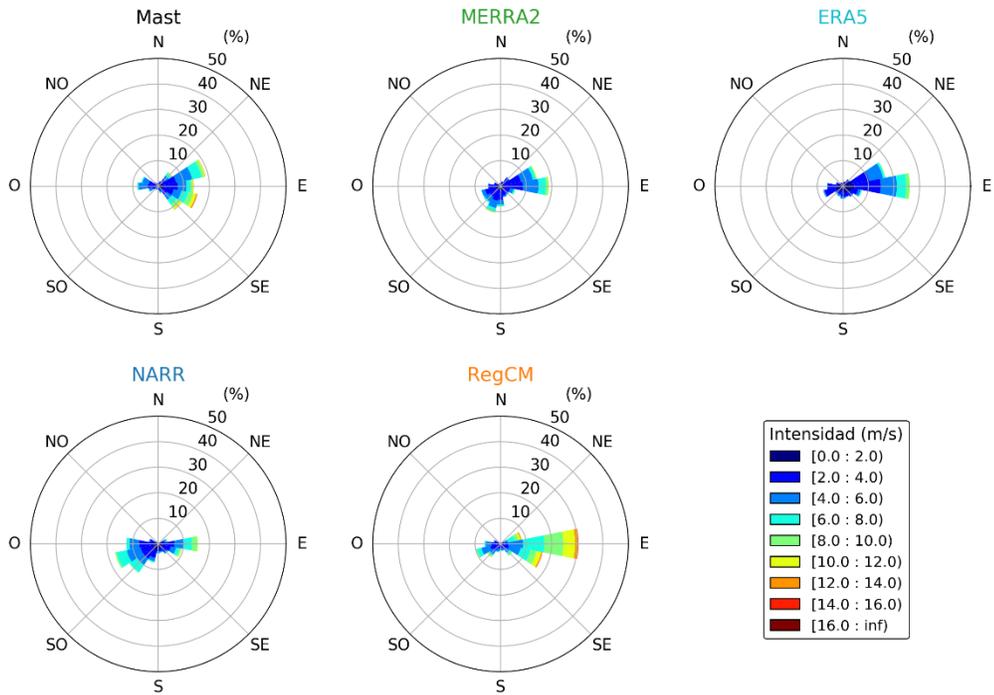


Figura 50. Igual que la Figura 44, pero para el mástil de Tepexi, Puebla.