

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



Comparación de datos de vientos de reanálisis y estaciones
meteorológicas en el golfo de California y Pacífico Subtropical
Mexicano

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

OEANÓLOGO

PRESENTA:

EDUARDO ASHIDA HERNÁNDEZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. AGOSTO, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

Comparación de datos de vientos de reanálisis y estaciones meteorológicas en el
Golfo de California y Pacífico Subtropical Mexicano

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

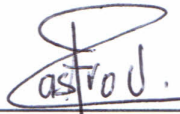
OEANÓLOGO

PRESENTA:

EDUARDO ASHIDA HERNÁNDEZ

APROBADA POR:

COMITÉ DE TESIS



Dr. Rubén Castro Valdez

Director



Dr. Bernardo Esquivel Trava

Sinodal



Dra. Ana Laura Flores Morales

Secretaria

Dedicatoria

A mis padres y hermanos, quienes han sido una parte fundamental en la formación de mi carácter. Gracias por todo el tiempo, dedicación y amor que me han dado. Logré llegar a este punto con muchas de las habilidades que me enseñaron, y como gesto de agradecimiento por todo lo que he recibido, les dedico este trabajo.

Agradecimientos

Siempre estaré agradecido con mi familia por otorgarme la oportunidad de seguir mi deseo de estudiar el océano. A mis padres Ricardo Ashida Cano y María Guadalupe Beatriz Hernández Diez Martínez por el sacrificio que han hecho por darme todas las posibilidades de poder triunfar en mi camino. A mis hermanos Ricardo Ashida Hernández y Gerardo Ashida Hernández por aconsejarme y guiarme.

A mi comité de tesis Dr. Ruben Castro Valdez, Dr. Bernardo Esquivel Trava y Dra. Ana Laura Flores Morales, gracias por interesarse en este trabajo y en los comentarios y conocimiento que me han aportado. Dr. Rubén, gracias por toda la paciencia y enseñanzas que me ha dado, estoy seguro que no habría logrado culminar este esfuerzo sin su continuo apoyo.

A los profesores que me han formado académicamente y que me han hecho crecer como persona: Karina Carmen Lugo Ibarra, Beatriz Martín Atienza, Sorayda Aimé Tanahara Romero, José Antonio Martínez Alcalá.

Quiero agradecer en especial a todos mis amigos, quienes me acompañaron por muchos años en buenos y malos ratos. Son ustedes los que me ayudaron en los momentos difíciles y con los que disfruté y celebré estos años de mi vida. Son personas que valoro mucho y espero que podamos seguir compartiendo buenas experiencias.

A mis amigos y compañeros de generación, que desde el inicio de la carrera establecimos una relación que ha perdurado: Mariana Ruiz, Mary Mar Ramirez, Eliot De La Cruz y Brandon Lopez.

A mis amigos que conocí durante mi camino en la licenciatura, y que me han dejado y siguen dando buenos recuerdos: Leah Alvarez, Mariana Sáenz, Giovanni Durante, Albert Salazar, Carolina Felix, Itzel González, Katia Torres, Camilo Medina, Miguel Marmolejo, Eduardo Karma Rocha, Diego Lomeli y André Ezeta.

Siempre disfruté y disfrutaré poder viajar a Guadalajara y pasar buenos momentos con ustedes: Luis Marquez, David Tavares, Carlos de Alba, Chiara Medina, Paloma Limón, Abraham Gamas, Adrián Angulo, Arturo Ascencio, Emilo Valdez, Mauricio Tenorio, Jordi Ariño, Kevin Oneal, Pedro Nuño, Sergio Morales y Zindel Zavala.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Objetivo general	3
1.2	Objetivos particular	3
1.3	Hipótesis	3
2	Área de estudio	4
3	Datos	5
3.1	Estaciones meteorológicas	6
3.2	Datos de reanálisis	6
3.2.1	CCMP Wind Vector Analysis Product (Versión-2.0) (CCMP2)	6
3.2.2	ECMWF Reanalysis 5th Generation (ERA5)	7
3.2.3	Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Versión-2 (MERRA2)	8
4	Metodología	9
4.1	Tratamiento previo	9
4.2	Métodos estadísticos	10
4.2.1	Cantidades estadísticas generales	10
4.2.2	Mediciones de error	11
4.3	Función de densidad de probabilidad (FDP)	13
4.4	Análisis de ejes principales (AEP)	14
4.5	Ajuste armónico	16
5	Resultados y discusión	17
5.1	Análisis estadístico	17
5.2	Comparación de FPD de Weibull	23
5.3	Análisis de ejes principales	27
5.4	Variabilidad estacional	33
5.4.1	Ajuste anual de series de tiempo	33
5.4.2	Climatología	39
5.4.3	Ajuste anual del área de estudio	42
6	Conclusión	43
7	Bibliografía	45

Índice de figuras

1	Área de estudio. Las estaciones utilizadas son marcadas como círculos rojos; CP: Cabo Pulmo; EMP: Empalme; IG: Isla Guadalupe; ITS: Isla de Todos Santos; SF: San Felipe; SQ: San Quintín. Se divide el golfo de California en tres secciones: Norte del GC (NGC), Centro del GC (CGC) y Sur del GC (SGC).	4
2	Cobertura temporal de las estaciones y productos de reanálisis utilizados.	5
3	Diagramas de Taylor de la rapidez del viento para cada estación. El coeficiente de correlación se indica con las líneas radiales punteadas, la RECM centrada con las líneas continuas y la desviación estándar con una línea discontinua. El punto de referencia señala la estación evaluada y los puntos de colores los resultados de los datos de reanálisis.	18
4	Correlación de la rapidez del viento de las estaciones de Cabo Pulmo (A1-A3), Empalme (B1-B3) e Isla de Guadalupe (C1-C3) con las series de tiempo de CCMP2 (A1, B1, C1), ERA5 (A2, B2, C2) y MERRA2 (A3, B3, C3). La línea continua (—) representa una correlación ideal, mientras que la línea puntuada (···) es el 50 % del error, la línea interlineada (- -) es el 100 % del error respecto a la correlación ideal. La barra de colores indica el número de valores que caen dentro de cada pixel (pixel cada 0.25 ms^{-1}).	22
5	Correlación de la rapidez del viento de las estaciones de Isla Todos Santos (A1-A3), San Felipe (B1-B3) e San Quintín (C1-C3) con las series de tiempo de CCMP2 (A1, B1, C1), ERA5 (A2, B2, C2) y MERRA2 (A3, B3, C3). La línea continua (—) representa una correlación ideal, mientras que la línea puntuada (···) es el 50 % del error, la línea interlineada (- -) es el 100 % del error respecto a la correlación ideal. La barra de colores indica el número de valores que caen dentro de cada pixel (pixel cada 0.25 ms^{-1}).	23
6	Distribuciones de Weibull de los datos de estaciones y de las series de tiempo en el punto de máxima de correlación de CCMP2, ERA5 y MERRA2.	24
7	Elipses de variabilidad de la estación de Cabo Pulmo (A) y Empalme (B). La flecha que surge del centro de cada elipse indica el vector promedio para cada base de datos.	28
8	Elipses de variabilidad de la estación de Isla Guadalupe (A) e Isla Todos Santos (B). La flecha que surge del centro de cada elipse indica el vector promedio para cada base de datos.	28

9	Elipses de variabilidad de la estación de San Felipe (A) y San Quintín (B). La flecha que surge del centro de cada elipse indica el vector promedio para cada base de datos.	29
10	Elipses de variabilidad de Cabo Pulmo (A1-A4), Empalme (B1-B4), Isla Guadalupe (C1-C4) y de los datos de reanálisis. Los puntos en cada figura señalan la dispersión de los vectores para cada base de datos. El conjunto de datos utilizado es presentado en cada renglón con un color distinto.	31
11	Elipses de variabilidad de Isla Todos Santos (A1-A4), San Felipe (B1-B4), San Quintín (C1-C4) y de los datos de reanálisis. Los puntos en cada figura señalan la dispersión de los vectores para cada base de datos. El conjunto de datos utilizado es presentado en cada renglón con un color distinto.	32
12	Ajuste armónico de las series de tiempo de las componentes u y v de Cabo Pulmo y Empalme. El color de las series de tiempo indica que base de datos es usada: negro para estaciones, azul para CCMP2, rojo para ERA5 y verde para MERRA2. La línea continua negra indica el ajuste anual estimado.	36
13	Ajuste armónico de las series de tiempo de las componentes u y v de Isla Guadalupe e Isla Todos Santos. El color de las series de tiempo indica que base de datos utilizada: negro para estaciones, azul para CCMP2, rojo para ERA5 y verde para MERRA2. La línea continua negra indica el ajuste anual estimado.	37
14	Ajuste armónico de las series de tiempo de las componentes u y v de San Felipe y San Quintín. El color de las series de tiempo indica que base de datos utilizada: negro para estaciones, azul para CCMP2, rojo para ERA5 y verde para MERRA2. La línea continua negra indica el ajuste anual estimado.	38
15	Promedios mensuales de la rapidez del viento (mapa de color: ms^{-1}) y de vectores de dirección (flechas negras) para el periodo de estudio 1999 a 2016 de los datos de ERA5. Los vectores señalados se calculan de los datos de la malla a cada 0.5 grados.	40
16	Raíz Cuadrática Media mensual para el periodo de estudio 1999 a 2016 de los datos de ERA5.	41
17	Ajuste armónico anual de la componente u (A1, B1, C1) y componente v (A2, B2, C2) para la zona de estudio.	42

Índice de tablas

1	Estaciones meteorológicas en el área de estudio.	6
2	Características de los conjuntos de datos de reanálisis utilizados.	8
3	Parámetros estadísticos de la comparación de datos simultáneos entre estaciones costeras y las series de tiempo CCMP2, ERA5 y MERRA2. Los promedios son estimados con los valores absolutos.	20
4	Parámetros estadísticos de la comparación de datos diarios entre estaciones costeras y las series de tiempo CCMP2, ERA5 y MERRA2. Los promedios son estimados con los valores absolutos.	21
5	Parámetros de la FDP de Weibull (α y β), rapidez más probable (U_{prob}) y coeficiente de determinación (R^2) del ajuste para todas las bases de datos.	26
6	Ángulo (θ_p), componentes principales (λ_1 y λ_2), varianza explicada por cada componente (v.exp ₁ y v.exp ₂) y eccentricidad (e) para datos diarios cada elipse de variabilidad.	30
7	Parámetros de los ajustes armónicos para cada estación y reanálisis. $\bar{u}$ y $\bar{v}$ son los promedios de las componentes u y v , A indica la amplitud del primer armónico en ms^{-1} , ϕ es la fase en días y V.exp es la varianza explicada por el ajuste.	35

1. Introducción

El conocimiento del campo de vientos sobre la superficie del océano es un factor imprescindible para actividades aplicadas y de investigación. Por ejemplo, el forzamiento del viento sobre el océano provoca eventos de surgencias y hundimientos, corrientes oceánicas, cambios en la capa de mezcla y oleaje. Estos cambios de la hidrología a su vez ocasionan un cambio en la estructura ecosistémica de una región. Asimismo, el viento es un importante recurso económico al generar energía eólica. Bajo este contexto, caracterizar al campo de viento en una ubicación o región específica es extremadamente importante. Para poder comprender en su totalidad dicha caracterización, se requieren datos constantes del viento con una resolución espacial y temporal alta.

Los datos de viento usados para estudios de oceanografía costera tradicionalmente provienen de mediciones de anemómetros instalados en estaciones meteorológicas terrestres o boyas oceánicas. Si bien estas mediciones normalmente proporcionan series de tiempo suficientemente largas, no siempre se cuenta suficiente resolución espacial a causa de la escasez de estaciones y/o boyas instaladas. Particularmente, los estudios sobre fenómenos oceánicos debidos a la fuerza del viento en el golfo de California (GC) y Pacífico Mexicano se han visto obstaculizados por la ausencia de mediciones de viento sobre el océano. Además, dada una variabilidad de mesoescala espacial y temporal alta, puede que estas mediciones no sean representativas del régimen de viento local (Carvalho, Rocha, Gómez-Gesteira, Alvarez & Silva Santos, 2013). Por lo tanto, únicamente las mediciones de estaciones meteorológicas y boyas no son suficientes para comprender y describir detalladamente el régimen espacial y temporal del viento.

La falta de bases de datos de viento que sean continuas espacial y temporalmente plantea la importancia de estudiar otros conjuntos de datos que puedan describir el campo de viento. Un enfoque para tratar esta falta de cobertura temporal y espacial es el uso de datos de reanálisis, ya que es capaz de proporcionar un registro completo de datos de viento a largo plazo en múltiples niveles verticales sobre una malla cuadriculada.

Con el reciente crecimiento en el desarrollo de observaciones satelitales, los conjuntos de datos de reanálisis se han vuelto cada vez más comunes para estudiar una variedad de cuestiones meteorológicas y oceánicas. Básicamente, se considera un reanálisis como el proceso donde modelos numéricos asimilan observaciones distribuidas irregularmente en tiempo y espacio para producir un conjunto de datos en una malla temporal y espacial completa global (Rienecker et al., 2011). El proceso consiste en utilizar un esquema de asimilación de datos a lo largo del lapso temporal (normalmente abarcando un segmento extendido del registro de datos históricos) en donde combinan observaciones de una manera físicamente coherente para producir conjuntos de datos de distintas variables directa e indirectamente observables. De forma que, con las consideraciones adecuadas de las incertidum-

bres inherentes, los productos de reanálisis se han convertido en una herramienta esencial para la investigación atmosférica (Gelaro et al., 2017). Adicionalmente, varios estudios han investigado la precisión de datos de reanálisis en distintas áreas (generación de energía eólica, modelos atmosféricos y oceánicos) y han obtenido resultados satisfactorios (Carvalho, Rocha & Gómez-Gesteira, 2012; Kubik, Brayshaw, Coker & Barlow, 2013; Sharp, Dodds, Barrett & Spataru, 2015; Zheng & Li, 2015; Staffell & Pfenninger, 2016; Olauson, 2018; Rüfenacht et al., 2018).

Si bien es una opción tangible utilizar datos de reanálisis para obtener datos con una resolución espacial y temporal continua, los registros obtenidos por modelos y métodos de asimilación de datos de los reanálisis no se encuentran libres de errores. Ya que estos errores se encuentran relativamente desconocidos, la utilidad de los reanálisis para responder preguntas complejas que involucren el clima es cuestionable (Kennedy et al., 2011). Este trabajo, por lo tanto, busca analizar el comportamiento de diferentes productos de reanálisis comparándolos con datos reales para estimar y discernir los errores inherentes de cada conjunto de datos.

A lo largo de las décadas, distintos reanálisis han aumentado su resolución espacial y temporal. En los últimos años se han elaborado tres conjuntos de datos de reanálisis de interés que se utilizarán en este trabajo: RSS - CCMP2 (Cross-Calibrated Multi-Platform V2.0)(Atlas et al., 2011; Wentz et al., 2015), ECMWF - ERA5 (ECMWF Reanalysis 5th Generation)(C3S, 2017) y NASA - MERRA2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Verión-2)(Gelaro et al., 2017). Se considerarán los datos reales como las mediciones de estaciones meteorológicas situadas a lo largo de la península de Baja California y en la costa este del golfo de California. Dichas estaciones son proporcionadas por la UABC (Universidad Autónoma de Baja California), el CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada), y el SMN - CNA (Servicio Meteorológico Nacional - Comisión Nacional del Agua).

Como objetivo secundario de este trabajo se propone proporcionar una descripción de la variabilidad estacional del viento para la región del golfo de California y el Pacífico subtropical Mexicano. La circulación atmosférica sinóptica superficial en el Pacífico Subtropical Mexicano y en el golfo de California, responde a la variabilidad de la intensidad y la posición del Centro de Alta Presión del Pacífico Norte (CAP). Este CAP es menos intenso de octubre a febrero donde alcanza su posición más sureña (28°N , 130°W), mientras que en su desplazamiento hacia al noroeste (38°N , 150°W), durante julio-agosto, es cuando se intensifica. Estas variaciones del CAP determinan, en gran medida, la variabilidad mensual de los patrones de circulación en la región (Strub y James, 2002; Romero-Centeno, Zavala-Hidalgo y Raga, 2007).

En la zona del Pacífico, el patrón de viento al oeste de la península de Baja California es muy persistente con dirección hacia el sur, siendo más intensos y menos variables durante primavera-verano (Castro y Martínez, 2010). Por otro lado, en el golfo de California por ser un mar semicerrado, ocurre un patrón de circulación distinto dependiendo de la época del año. La península de Baja California tiene una cordillera de altitud variable, protegiendo en gran medida al golfo del ambiente fresco del Océano Pacífico. Debido a estas restricciones topográficas, el flujo atmosférico generalmente se canaliza a lo largo del golfo y está abierto a la influencia oceánica directa solo desde el sur. (Badan-Dangon, Dorman, Merrifield y Winant, 1991; Badan, 2003). La circulación atmosférica del GC se caracteriza por un flujo hacia el sureste en gran parte del año, incluso en el invierno es muy similar a la circulación en el Pacífico (Bordoni, Ciesielski, Johnson, McNoldy y Stevens, 2004). Sin embargo, durante el verano, cuando se aleja del CAP hacia el noroeste en el Pacífico, se presenta una inversión de los vientos en el golfo, lo cual está asociado al monzón de Norteamérica. Lo anterior es en respuesta a un centro de baja presión y baja térmica al noreste del golfo y una relativa alta presión en la región sur del golfo (Bordoni et al., 2004; Turrent y Cavazos, 2009).

1.1. Objetivo general

- Comparar datos del viento de varios productos de reanálisis contra mediciones del viento de estaciones meteorológicas costeras, con la finalidad de describir la variabilidad temporal y espacial del viento para la región del golfo de California (GC) y el Pacífico Subtropical Mexicano.

1.2. Objetivos particular

- Evaluar cuál base de datos de reanálisis tiene menor error respecto a los datos observados.

1.3. Hipótesis

Los datos de viento superficial de distintos productos de reanálisis pueden describir detalladamente el régimen del viento en el golfo de California y Pacífico Subtropical Mexicano.

2. Área de estudio

Se estudió la región del Pacífico Subtropical Mexicano frente a la península de California y el golfo de California. El golfo de California es un mar semicerrado localizado entre la península de California y los estados de Sonora y Sinaloa, y se encuentra comunicado con el Océano Pacífico hacia el sur. La climatología de la cuenca se ve restringida por la morfología de la región, al este por la Sierra Madre Occidental y al oeste por la elevación de la península de California.

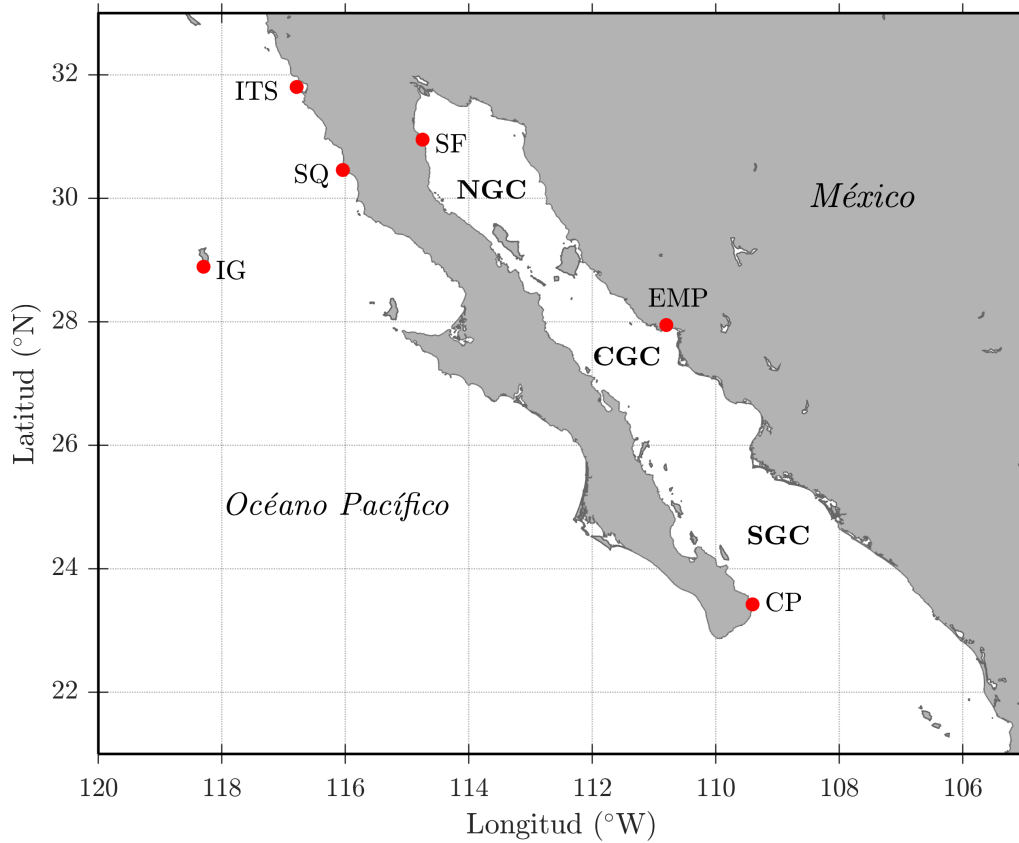


Figura 1. Área de estudio. Las estaciones utilizadas son marcadas como círculos rojos; CP: Cabo Pulmo; EMP: Empalme; IG: Isla Guadalupe; ITS: Isla de Todos Santos; SF: San Felipe; SQ: San Quintín. Se divide el golfo de California en tres secciones: Norte del GC (NGC), Centro del GC (CGC) y Sur del GC (SGC).

3. Datos

En este estudio se analizó el vector del viento superficial a 10 m. Se utilizó la rapidez (r) y dirección (θ) del viento medidas por estaciones meteorológicas, así como las componentes zonal (u) y componente meridional (v) calculadas de los diferentes conjuntos de datos de reanálisis. La cobertura temporal de las bases de datos se presenta en la Figura 2.

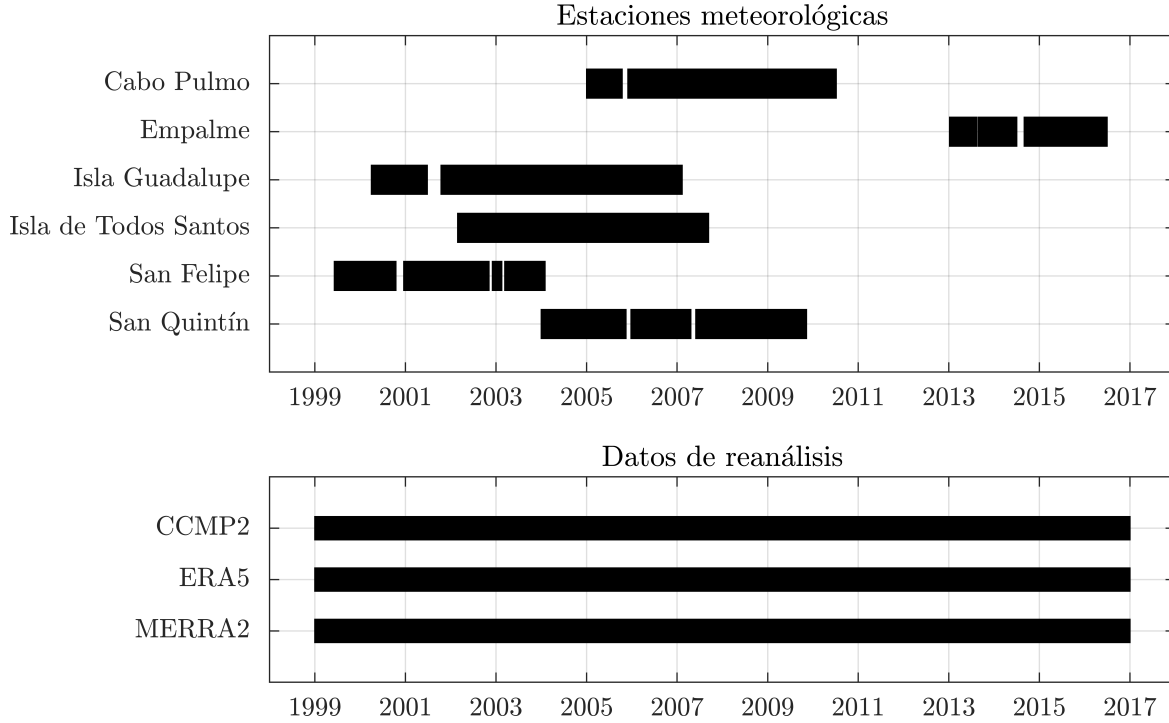


Figura 2. Cobertura temporal de las estaciones y productos de reanálisis utilizados.

3.1. Estaciones meteorológicas

Las mediciones de estaciones meteorológicas han sido proporcionadas por UABC-IIO, CICESE y recuperadas de estaciones ESIMES (Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas) proporcionadas por el SMN - CNA (Servicio Meteorológico Nacional - Comisión Nacional del Agua). La posición, fuente, periodo y frecuencia de medición de las estaciones utilizadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas en el área de estudio.

Estación	Longitud (°W)	Latitud (°N)	Altitud (m)	Fuente	Periodo	Frec. (min)
Cabo Pulmo	109.4247	23.4452	10	UABC-IIO	Ene 2005 - Jul 2010	60
Empalme	110.7997	27.9497	12	SMN-CNA	Ene 2013 - Jun 2016	60
Isla Guadalupe	118.2920	28.8837	9	UABC-IIO	Abr 2000 - Feb 2007	60
Isla Todos Santos	116.8077	31.8124	10	UABC-IIO	Feb 2002 - Sep 2007	60
San Felipe	114.7425	30.9470	20	CICESE	Jun 1999 - Ene 2004	60
San Quintín	116.0397	30.4606	12	UABC-IIO	Ene 2004 - Dec 2009	60

3.2. Datos de reanálisis

Se comparó la precisión de los conjuntos de datos de reanálisis CCMP2, ERA5 y MERRA2. Otros reanálisis y series de datos se encuentran disponibles (e.g. NARR, CFSR, JRA-55), pero presentan menor resolución espacio-temporal para datos de viento. La Tabla 2 muestra la resolución temporal y espacial, cobertura temporal, fecha de lanzamiento del producto y nivel de procesamiento de cada reanálisis.

3.2.1. CCMP Wind Vector Analysis Product (Versión-2.0) (CCMP2)

CCMP2 (Cross-Calibrated Multi-Platform V2.0) proporciona una serie de campos de vectores del viento en la superficie del océano (10 m) de manera consistente desde julio de 1987 hasta diciembre de 2017 al momento de escribir esta Tesis. Consiste en un Método de Análisis Variacional (MAV) de vientos en la superficie oceánica con una resolución temporal de 6 horas y distribuidos en una malla uniforme de $0.25 \times 0.25^\circ$ en latitud y longitud. CCMP2 es la continuación al producto original CCMP (V1.1 disponible de NASA JPL PO.DAAC). Información detallada de del producto original CCMP es descrita por Atlas et al., (2011) y Atlas, Hoffman, Bloom, Jusem y Ardizzone (1996),

mientras que Hoffman et al., (2003) describe el MAV.

Para el desarrollo del producto CCMP2, se combinan datos de satélites (radiómetros y escaterómetros), boyas y modelos de viento. Se consideran velocidades del viento medidas por radiómetros, incluyendo SSM/I, SSMIS, AMSR, TMI, WindSat, y GMI, así como velocidad y dirección del viento obtenidas de escaterómetros, incluyendo QuikSCAT y ASCAT. Tanto los datos de los radiómetros como de los escaterómetros están validados contra boyas. Se utilizan además campos de viento de ERA-Interim Reanalysis (ECMWF) como primera aproximación para en el procesamiento del MAV. Todas las observaciones de viento (satélites y boyas) y los campos de viento del modelo son referenciados a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar.

CCMP Wind Vector Analysis Product (Versión-2.0) es proporcionado por la empresa de investigación científica, Remote Sensor Systems (RSS), ubicada en California, EE. UU. El conjunto de datos se puede acceder a través de www.remss.com/measurements/ccmp.

3.2.2. ECMWF Reanalysis 5th Generation (ERA5)

ERA5 es el reanálisis más reciente desarrollado por ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) a través de C3S (Copernicus Climate Change Service). ERA5 es la quinta generación de reanálisis atmosféricos producidos por ECMWF, que comenzó con el reanálisis de FGGE producido en la década de 1980, seguido por ERA-15, ERA-40 y más recientemente ERA-Interim. Es un modelo de reanálisis atmosférico que incorpora observaciones in situ y satelitales con resolución temporal y espacial alta a varios niveles de presión (C3S, 2017). Actualmente el periodo de datos disponibles cubre los últimos 40 años, es decir de 1979 al presente (~ 3 meses de atraso), y posteriormente se extenderá hasta 1950.

Para la producción de ERA5, se utilizan pronósticos de variables atmosféricas y oceánicas con una resolución espacial de 31 km y un conjunto de datos obtenidos con un método de análisis de asimilación de datos variables en cuatro dimensiones (4DVAR) en el modelo CY41r2 del IFS (Integrated Forecast System) de ECMWF (Rüfenacht et al., 2018). Documentación detallada de las observaciones (in situ y satélites) incorporadas en el reanálisis y del modelo CY41r2 se describen en ECMWF (2019a, 2019b) respectivamente.

C3S proporciona una serie de campos de vectores del viento en la superficie del océano (10 m) de manera consistente con una resolución temporal de 1 hora y distribuidos en una malla uniforme de $0.25 \times 0.25^\circ$ en latitud y longitud. El conjunto de datos se puede acceder través de <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.

3.2.3. Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Versión-2 (MERRA2)

MERRA2 es el actual reanálisis atmosférico producido por la GMAO (Global Modeling and Assimilation Office) de la NASA. Es el sucesor del reanálisis original ya discontinuado MERRA descrito en (Rienecker et al., 2011). MERRA2 es producido con el GEOS ADAS (Goddard Earth Observing System Atmospheric Data Assimilation System), que esta compuesto por un esquema de análisis GSI (Global Statistical Interpolation) y el modelo atmosférico de GEOS (Gelaro et al., 2017). Kleist et al., (2009), Wu, Purser y Parrish (2002) describen el esquema de análisis GSI, mientras que Molod, Takacs, Suarez y Bacmeister (2015) describen el modelo atmosférico GEOS.

MERRA2 utiliza un algoritmo de asimilación de datos variables en tres dimensiones (3DVAR) basado en el esquema del GSI. Este análisis utiliza una discretización horizontal con una resolución aproximada de $0.5 \times 0.625^\circ$ (Gelaro et al., 2017). Abarca la era de observación satelital desde 1980 hasta la actualidad con una resolución temporal de 1 hora. El conjunto de datos es proporcionado por el GES DISC (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) de la NASA a través de <https://disc.gsfc.nasa.gov/>.

Tabla 2. Características de los conjuntos de datos de reanálisis utilizados.

	Resolución temporal	Resolución espacial	Cobertura temporal	Lanzamiento	Nivel de procesamiento
CCMP2	6 horas	$0.25 \times 0.25^\circ$	1987 - 2017	2015	3
ERA5	1 hora	$0.25 \times 0.25^\circ$	1979 - presente	2017	4
MERRA2	1 hora	$0.5 \times 0.625^\circ$	1980 - presente	2016	4

4. Metodología

4.1. Tratamiento previo

La orientación de las estaciones meteorológicas propuestas se encuentra dirigida hacia el norte magnético, a diferencia de los conjuntos de datos de reanálisis que están dirigidos hacia el norte geográfico. Por lo tanto, se corrigió la dirección de las estaciones hacia el norte geográfico valorando la declinación magnética obtenida por el IGRF (International Geomagnetic Reference Field). Dicho campo de referencia es proporcionado por la IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) y es descrito por Thébault et al., (2015).

Además de la corrección de la orientación, se hizo un cambio en el sentido de la dirección del viento de las estaciones meteorológicas. Esto es ya que las estaciones meteorológicas miden de donde proviene el viento (convención meteorológica), mientras que en los conjuntos de reanálisis se calcula hacia donde se dirige (convención oceanográfica). En consecuencia, se cambió el sentido de las estaciones meteorológicas para que correspondiera con los registros de los reanálisis. Además, no se consideraron los registros donde la rapidez del viento fuese igual a cero.

Se utilizó la rapidez (r) y dirección azimutal (θ) del viento para calcular las componentes del viento para cada estación a través de:

$$u = r * \sin \theta \quad (4.1)$$

$$v = r * \cos \theta \quad (4.2)$$

Donde θ es la dirección en grados azimutales, u es la componente zonal y v componente meridional.

Dadas las componentes del viento u y v , se calculó la magnitud de la rapidez del viento para cada conjunto de datos de reanálisis con:

$$r = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.3)$$

La dirección del viento (θ) para cada reanálisis fue calculada con la función de tangente inversa de cuatro cuadrantes y posteriormente corregida hacia el norte verdadero.

Los datos de reanálisis se presentan como una malla espacialmente separada por un número de grados. Para realizar la comparación directa con las estaciones meteorológicas, se interpoló bilinealmente los puntos más cercanos a las estaciones de cada reanálisis.

4.2. Métodos estadísticos

En esta sección se describe el análisis estadístico utilizado en este trabajo. Siguiendo la metodología de Carvalho et al., (2013), se proponen distintos parámetros para la comparación de los datos de reanálisis con las estaciones meteorológicas. Dichos parámetros están descritos por Lange (2005) para variables escalares (rapidez del viento). Para la dirección del viento, al ser una variable circular y no una lineal, toma otras expresiones propuestas por Berens (2009).

4.2.1. Cantidades estadísticas generales

Sean $\{r_i\}$ y $\{\theta_i\}$ con $i = 1, \dots, N$ series de tiempo discretas de longitud N . $\{r_i\}$ y $\{\theta_i\}$ son consideradas muestras finitas de series de tiempo $\theta(t)$ y $r(t)$ continuas, estacionarias e infinitas. $\theta(t)$ representa la serie de tiempo de la dirección y $r(t)$ representa las series de tiempo de la rapidez del viento.

Promedio

El promedio de $r(t)$ se estimó por el valor promedio $\bar{r}$ de $\{r_i\}$ y se definió por

$$\bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \quad (4.4)$$

Para obtener el promedio de $\theta(t)$, primero, $\{\theta_i\}$ se transformó en un vector unitario V_i de dos dimensiones.

$$V_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Seguido, el vector resultante se promedió del mismo modo que la ecuación 4.4:

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (4.6)$$

Donde $\bar{V}$ es llamado vector resultante promedio. Para obtener la dirección media $\bar{\theta}$, $\bar{V}$ se transformó utilizando la función de tangente inversa de cuatro cuadrantes y posteriormente se corrigió hacia el norte verdadero.

Desviación estándar (DE)

La desviación estándar $\sigma(r)$ de $r(t)$ se estimó por la desviación estándar σ_r de la muestra:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2} \quad (4.7)$$

Se utilizó el coeficiente de Pearson para estimar la dependencia lineal entre las series de tiempo $r^x(t)$ y $r^{obs}(t)$, donde $r^x(t)$ son los registros de los conjuntos de datos de reanálisis, y $r^{obs}(t)$ son las mediciones de las estaciones meteorológicas. El coeficiente de Pearson ρ_r es definido por la covarianza entre dos variables dividida por el producto de sus desviaciones estándar:

$$\rho_r = \frac{1}{\sigma_{r^x} \sigma_{r^{obs}}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(r_i^x - \bar{r^x} \right) \left(r_i^{obs} - \bar{r^{obs}} \right) \quad (4.8)$$

La correlación entre dos series de tiempo $\theta^x(t)$ y $\theta^{obs}(t)$ se obtuvo utilizando el coeficiente de correlación de variables direccionales ρ_θ :

$$\rho_\theta = \frac{\sum_{i=1}^N \sin \left(\theta_i^x - \bar{\theta^x} \right) \sin \left(\theta_i^{obs} - \bar{\theta^{obs}} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sin^2 \left(\theta_i^x - \bar{\theta^x} \right) \sin^2 \left(\theta_i^{obs} - \bar{\theta^{obs}} \right)}} \quad (4.9)$$

Del mismo modo que en el coeficiente de Pearson, el superíndice *obs* representa las mediciones de las estaciones meteorológicas y *x* representa los registros de los conjuntos de datos de reanálisis.

4.2.2. Mediciones de error

Las mediciones del error describen el comportamiento de las desviaciones entre las mediciones hechas por las estaciones meteorológicas y por los datos de reanálisis. El error es expresado como ϵ_i , y para la serie de tiempo $r(t)$ se describió como:

$$\epsilon_i = r_i^x - r_i^{obs} \quad (4.10)$$

El error de la serie de tiempo $\theta(t)$ toma otra expresión porque la desviación absoluta de la dirección del viento no puede exceder los 180° en el módulo. Para este caso, ϵ_i se definió por:

$$\epsilon_i = (\theta_i^x - \theta_i^{obs}) * \left(1 - \frac{360}{|\theta_i^x - \theta_i^{obs}|}\right) \quad , \quad \text{si } |\theta_i^x - \theta_i^{obs}| > 180^\circ \quad (4.11)$$

Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM)

La RECM evalúa la diferencia cuadrada entre los datos de reanálisis y estaciones:

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\epsilon_i)^2} \quad (4.12)$$

La RECM es muy usada entre los distintos parámetros que existen para cuantificar la precisión de una predicción. Es similar al error absoluto medio y a la RECM normalizada, sin embargo, es utilizada ya que tiene las mismas dimensiones físicas de los datos analizados y es más sensible a grandes errores ocasionales por su término cuadrático. A su vez, se utilizó la Raíz del Error Cuadrático Medio Centrado (RECMC), para su cálculo, se restó a cada registro su respectivo promedio y se calculó la RECMC del mismo modo que la ecuación 4.12.

Sesgo

El sesgo o error medio estima la diferencia media entre los datos de reanálisis y los datos de estaciones meteorológicas:

$$Sesgo = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_i \quad (4.13)$$

El sesgo proporciona información sobre la tendencia de los datos de reanálisis de sobrestimar o subestimar una variable. Un valor positivo significa que los datos de reanálisis sobre estiman los valores reales, y un valor negativo significa que las simulaciones subestiman los valores reales. Para la dirección del viento, un sesgo positivo / negativo significa una desviación en sentido a favor / en contra de las manecillas.

Desviación Estándar del Error (DEE)

La Desviación Estándar del Error, expresada a través de la descomposición de la RECM descrita por Lange (2005) esta dada por:

$$DEE = \sigma(\epsilon_i) = \sqrt{(RECM)^2 - (Sesgo)^2} \quad (4.14)$$

4.3. Función de densidad de probabilidad (FDP)

Distribución de Weibull

La rapidez del viento es típicamente visualizada a través de histogramas de frecuencia. El rango de los datos se divide en intervalos de clase o bins, y se cuenta el número de valores que caen en cada intervalo. Cada intervalo b_j separado por Δr tiene asociado una frecuencia relativa f_j y una rapidez del viento r_j :

$$f_j = \frac{n_j}{N} \quad (4.15)$$

donde n_j es el número de datos que caen dentro de cada intervalo j y N es el número total de datos. Δr será considerado 0.5 ms^{-1} . Con esto, considerando b como el número total de intervalos, las siguientes relaciones se cumplen:

$$\sum_{j=1}^b n_j = N \quad ; \quad \sum_{j=1}^b f_j = 1 \quad (4.16)$$

Se utilizó una distribución de Weibull para ajustar una función para la frecuencia de datos de rapidez del viento. La FDP de Weibull esta dada por:

$$U = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{r}{\alpha} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{r}{\alpha} \right)^\beta} \quad (4.17)$$

donde β es el parámetro de forma adimensional, y α es el parámetro de escala en ms^{-1} . α proporciona información sobre la amplitud y media de la rapidez del viento, mientras que β proporciona información sobre la desviación de los valores de rapidez del viento alrededor de la media. El valor más probable U_{prob} de la serie de tiempo de la rapidez del viento $r(t)$ fue estimado de la primera derivada de la Ec. 4.17:

$$U_{\text{prob}} = \alpha \left(\frac{\beta - 1}{\beta} \right)^{1/\beta} \quad (4.18)$$

Métodos de ajuste de los parámetros de Weibull

Siguiendo lo descrito por Seguro y Lambert (2000) y Carrillo, Cidrás, Díaz-Dorado y Obando-Montaño (2014), se estimaron los parámetros de la distribución de Weibull con el método de máxima verosimilitud (MMV) y la bondad del ajuste fue evaluada por el coeficiente de determinación R^2 . Por lo tanto, usando el MMV, los parámetros se definieron por:

$$\frac{1}{\beta} = \sum_{i=1}^N r_i^\beta \ln(r_i) \bigg/ \sum_{i=1}^N r_i^\beta - \sum_{i=1}^N \ln(r_i) \bigg/ N \quad (4.19)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^\beta \right)^{1/\beta} \quad (4.20)$$

donde r_i es la rapidez del viento para cada iteración respecto al tiempo.

Bondad del ajuste

La bondad del ajuste de la FDP de Weibull describe lo bien que se ajusta a los conjuntos de datos. Para determinar si la FDP es adecuada para estimar valores reales, se calculó el coeficiente de determinación R^2 de la distribución de la rapidez del viento:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^b (f_j - f'_j)^2}{\sum_{j=1}^b (f_j - \bar{f}_j)^2} \quad (4.21)$$

donde f_j y f'_j son las frecuencias de los registros de datos y del ajuste de la FDP para cada intervalo j respectivamente. $\bar{f}_j$ es el promedio de f_j y b es el número total de intervalos.

4.4. Análisis de ejes principales (AEP)

Siguiendo la metodología de Thomson y Emery (2014), el AEP consiste en rotar cada serie de tiempo a lo largo de sus propios ejes para que la mayor parte de la varianza está asociada con un eje mayor y la varianza restante con un eje menor. El objetivo es encontrar los ejes de máxima varianza de las fluctuaciones de la rapidez del viento. Para este caso se consideró a $U'(t) = (u'_1(t), u'_2(t))$ como la fluctuación de la rapidez del viento. $u'_1(t)$ y $u'_2(t)$ representan las series de tiempo de las fluctuaciones de los componentes u y v del viento respectivamente (i.e. $u_1 = u$ y $u_2 = v$) y se calcularon restando

sus promedios correspondientes:

$$u'_1 = u_1 - \overline{u_1} = u - \overline{u} \quad (4.22)$$

$$u'_2 = u_2 - \overline{u_2} = v - \overline{v} \quad (4.23)$$

Para obtener los ejes principales, se propone el siguiente problema de eigenvalores:

$$\begin{vmatrix} C_{11} & C_{21} \\ C_{12} & C_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{vmatrix} \quad (4.24)$$

donde C_{ij} son los componentes de la matriz de covarianza C y (φ_1, φ_2) son los eigenvectores asociados a dos posibles eigenvalores λ . Para encontrar los eigenvalores, se establece que el determinante de la matriz de covarianza sea 0:

$$\det | C - \lambda I | = \det \begin{vmatrix} C_{11} - \lambda & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} - \lambda \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \overline{(u'_1)^2} - \lambda & \overline{u'_1 u'_2} \\ \overline{u'_2 u'_1} & \overline{(u'_2)^2} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (4.25)$$

donde I es la matriz identidad y donde (para $i = 1, 2$, $j = 1, 2$ y $n = 1, \dots, N$ como el número de iteraciones respecto al tiempo) los elementos de la matriz de covarianza están dados por:

$$C_{ii} = \overline{(u'_i)^2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(u'_i(t_n) \right)^2 \quad (4.26)$$

$$C_{ij} = \overline{u'_i u'_j} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(u'_i u'_j(t_n) \right) \quad (4.27)$$

Las principales varianzas se consiguieron de la solución de la ecuación cuadrática que surge de la Ec. 4.25:

$$\left. \begin{matrix} \lambda'_1 \\ \lambda'_2 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\overline{(u'_1)^2} + \overline{(u'_2)^2} \right) \pm \left[\left(\overline{(u'_1)^2} - \overline{(u'_2)^2} \right)^2 + 4 \left(\overline{u'_1 u'_2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (4.28)$$

en donde el valor positivo es usado para λ'_1 y el valor negativo para λ'_2 .

La orientación entre del eje principal respecto al eje menor difiere en 90° (son ortogonales), y el ángulo principal θ_p se estimó de acuerdo a lo siguiente:

$$\theta_p = \frac{1}{2} \text{atan} \left(\frac{2\overline{u'_1 u'_2}}{(\overline{u'_1})^2 - (\overline{u'_2})^2} \right) \quad (4.29)$$

Para la interpretación de los ejes principales, se construyeron elipses de variabilidad usando como ejes (λ_1 y λ_2) las desviaciones estándares de cada eje, es decir:

$$\lambda_1 = \sqrt{\lambda'_1} \quad , \quad \lambda_2 = \sqrt{\lambda'_2} \quad (4.30)$$

De la construcción de las elipses se puede visualizar que alguno de los ejes puede presentar mayor varianza que el otro, por lo tanto se estimó cuanto es la varianza explicada de cada eje y la excentricidad (e) de la elipse formada con:

$$e = \sqrt{1 - \frac{(\lambda_1)^2}{(\lambda_2)^2}} \quad (4.31)$$

4.5. Ajuste armónico

Para analizar la señal estacional de las series de tiempo de los componentes u y v se utilizó un ajuste armónico anual por mínimos cuadrados. De tal forma que el ajuste toma la expresión de:

$$X(t) = x_0 + A \cos(wt - \phi) \quad (4.32)$$

donde $X(t)$ es la serie de tiempo del ajuste, x_0 es la media del ajuste, A es la amplitud del primer armónico, w es la frecuencia de variación, en este caso un año ($2\pi/365.25$) y ϕ la fase o el desplazamiento horizontal. Así mismo se calcula la varianza explicada del ajuste.

La Raíz Cuadrática Media (RCM) de los componentes u y v proporciona información sobre la variabilidad del vector del viento, y es calculada por medio de:

$$RCM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2} \quad (4.33)$$

5. Resultados y discusión

5.1. Análisis estadístico

En esta sección los resultados de los parámetros estadísticos utilizados para comparar los datos simultáneos (horarios) de las estaciones costeras y series de tiempo de cada reanálisis son descritos y presentados en la Tabla 3. Se presentan en la Tabla 4 los resultados de los parámetros estadísticos de la comparación los datos diarios con la finalidad de contrastar si los eventos de frecuencia diurna o menor (brisas) pueden generar un error sobre la estimación del viento respecto a los datos simultáneos. En general las estimaciones de ERA5 de rapidez y dirección del viento son las más parecidas a los datos reales, mientras que CCMP2 y MERRA2 son las más alejadas aunque las diferencias entre estas dos ultimas no son significativamente altas.

Los diagramas de Taylor de la Figura 3 muestran que las mejores estimaciones para la rapidez del viento son las del producto de ERA5. La desviación estándar de los datos de reanálisis fueron menores o muy similares a las de todas las estaciones excepto en Empalme. ERA5 presentó menores RECM y mayores coeficientes de correlación en todas las estaciones con valores promedio de toda el área de estudio de 1.52 ms^{-1} y 0.71 respectivamente. Las series de tiempo de los reanálisis en Isla Guadalupe son muy parecidas a los datos de la estación (valores similares de DE, RECMC y CC). Esto sugiere que al estar rodeado del océano y al no contemplar la orografía de un cuerpo grande de tierra (continente) como en el resto de las estaciones, las estimaciones de todos los reanálisis en Isla Guadalupe arrojan valores semejantes. Los resultados menos favorables fueron obtenidos en las estaciones del GC, con coeficientes de correlación menores a 0.5 y RECMC mayores a 1.5 ms^{-1} en el caso de CCMP2 y MERRA2.

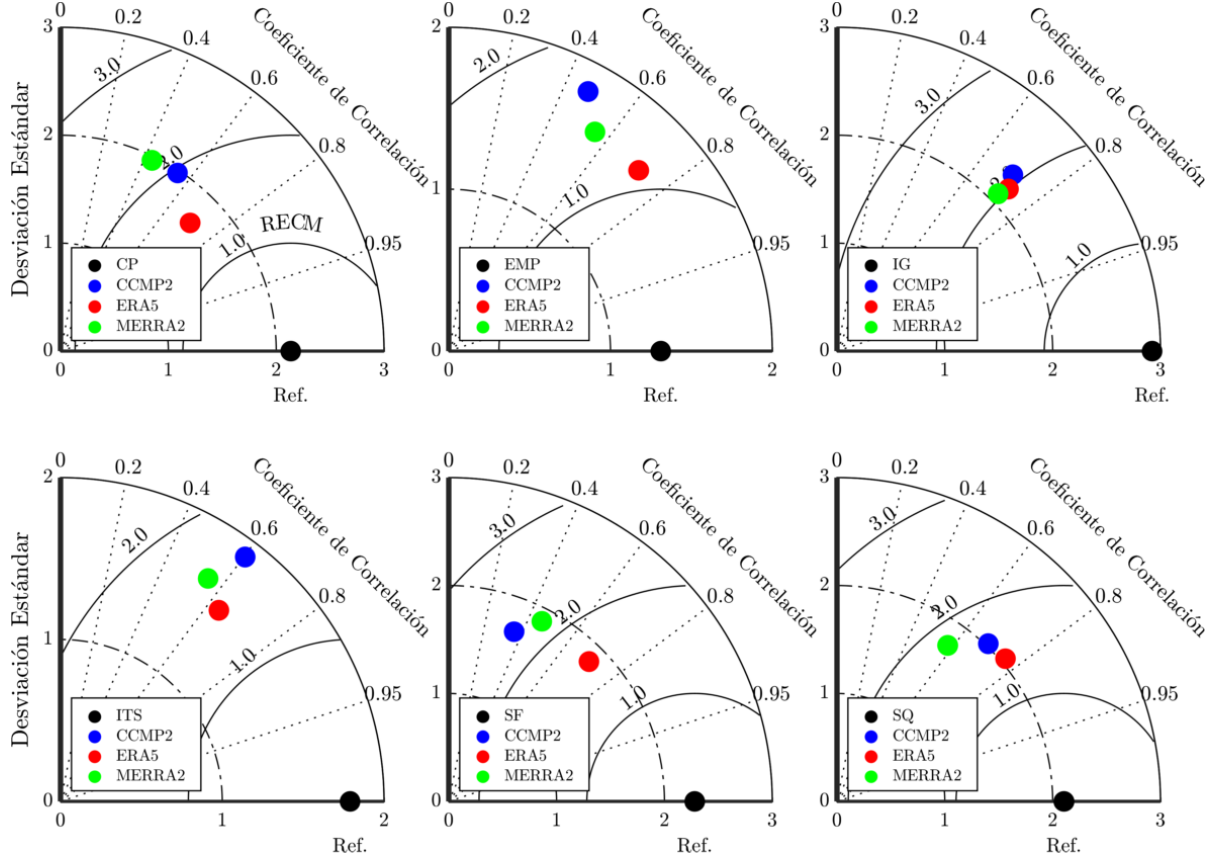


Figura 3. Diagramas de Taylor de la rapidez del viento para cada estación. El coeficiente de correlación se indica con las líneas radiales punteadas, la RECM centrada con las líneas continuas y la desviación estándar con una línea discontinua. El punto de referencia señala la estación evaluada y los puntos de colores los resultados de los datos de reanálisis.

De acuerdo a los promedios de la Tabla 3, ERA5 es el reanálisis con mejores valores estadísticos excepto en la correlación de la dirección del viento y sesgo de la rapidez en donde MERRA2 fue el reanálisis con mejores resultados. Analizando los resultados estación por estación, ERA5 presentó el mejor desempeño con menores RECM y DEE y mayores correlaciones de rapidez y dirección del viento en todas las estaciones a excepción de las estaciones de Cabo Pulmo y San Felipe, donde se obtuvieron las menores correlaciones de la dirección.

En general, el sesgo de la rapidez y dirección fue positivo, a excepción de San Felipe, donde el sesgo de la rapidez fue negativo y en Isla Todos Santos donde el sesgo de la dirección fue negativo. Esto indica una sobrestimación de los reanálisis en la rapidez del viento y una rotación en el sentido de las manecillas respecto al viento medido. En términos del sesgo de la dirección, los peores resultados obtenidos fueron en la estación de San Felipe.

Mientras que el sesgo refleja principalmente la diferencia entre los valores medios de reanálisis y medidos, la DEE es una medida de la variabilidad del error alrededor de su media. Por lo tanto se emplea por su utilidad para evaluar la dispersión del error. Si los valores de la RECM y el sesgo son altos pero la DEE es baja, esto sugiere que el error es constante y que puede atribuirse a un desplazamiento en los datos y que la estimación física del reanálisis es correcta (Carvalho et al., 2013). En cambio, si la DEE es alta, el error es aleatorio y la estimación de los datos de reanálisis tiene un significado físico bajo, incluso si la RECM y el sesgo son relativamente bajos. Esto es relevante en el caso de MERRA2 y CCMP2, ya que aunque el primero presenta en promedio menor sesgo y mayor correlación en la dirección que ERA5, los dos indican mayores valores en la DEE. Por lo tanto, se deduce que MERRA2 y CCMP2 muestran un mayor error sistemático en todas las estaciones debido a errores de desplazamiento.

Respecto a las correlaciones, como ya se había visto en la Figura 3, las menores correlaciones para la rapidez se obtuvieron en las estaciones dentro del GC. Sin embargo no se observa lo mismo en la correlación de la dirección, donde las menores correlaciones son en Cabo Pulmo y en Isla Guadalupe. El hecho que se tengan altas correlaciones en la rapidez y no en la dirección indica que el error puede surgir del sesgo de alguna de las componentes del reanálisis.

Carvalho, Rocha, Gómez-Gesteira y Silva Santos (2014) utilizaron los predecesores de ERA5 (ERA-Interim) y de MERRA2 (MERRA), además de otros reanálisis, para simular datos de viento en tierra y comparar el desempeño que tiene cada conjunto de datos contra mediciones de viento por estaciones meteorológicas. Los resultados de ERA5 y MERRA2 de este trabajo son similares o menores para la RECM, sesgo, DEE y mayores para la correlación de la rapidez del viento respecto a sus predecesores. Esto indica que la nueva generación de reanálisis tiene una mejora. No obstante, todos los parámetros estadísticos para la dirección del viento tuvieron un peor desempeño. Esto se debe a que el efecto de las brisas en las estaciones del área de estudio genera variabilidad en la dirección que posiblemente no se consideró en los datos de reanálisis. Por consiguiente, se tiene una peor estimación en los parámetros de la dirección.

Comparando las Tablas 3 y 4 se observa que los errores (RECM y DEE) se redujeron y las correlaciones aumentaron en la comparación de los promedios diarios respecto a los simultáneos, mientras que el sesgo se mantuvo relativamente igual en las dos comparaciones. Esto se le atribuye a que el efecto de las brisas y otros eventos diurnos no pueden ser estimados de manera adecuada por los reanálisis. Del mismo modo que en los datos simultáneos, ERA5 presentó los mejores valores estadísticos para la comparación de promedios diarios (menores errores y mayores correlaciones).

Tabla 3. Parámetros estadísticos de la comparación de datos simultáneos entre estaciones costeras y las series de tiempo CCMP2, ERA5 y MERRA2. Los promedios son estimados con los valores absolutos.

Est.	Datos	<i>RECM</i>		<i>Sesgo</i>		<i>DEE</i>		<i>CC</i>		<i>N</i>
		<i>r</i>	θ	<i>r</i>	θ	<i>r</i>	θ	<i>r</i>	θ	
CP	CCMP2	2.04	66.98	0.57	2.02	1.96	66.95	0.55	0.33	7765
	ERA5	1.51	52.15	-0.17	-2.37	1.50	52.10	0.71	0.11	46600
	MERRA2	2.22	64.49	0.45	3.09	2.18	64.42	0.43	0.39	46600
EMP	CCMP2	1.89	61.69	0.91	13.31	1.66	60.23	0.47	0.59	4698
	ERA5	1.27	51.03	0.56	9.86	1.14	50.06	0.72	0.69	28164
	MERRA2	1.71	61.95	0.92	16.03	1.44	59.84	0.56	0.60	28164
IG	CCMP2	2.09	45.51	-0.15	3.23	2.08	45.40	0.71	0.31	9576
	ERA5	2.03	43.98	0.23	1.73	2.02	43.95	0.73	0.35	57454
	MERRA2	2.08	45.26	-0.35	-1.64	2.05	45.23	0.72	0.33	57454
ITS	CCMP2	1.78	57.31	0.68	-7.19	1.64	56.86	0.60	0.50	8020
	ERA5	1.50	51.71	0.39	-8.04	1.44	51.08	0.64	0.61	48134
	MERRA2	1.66	61.45	-0.20	-9.80	1.64	60.66	0.55	0.48	48134
SF	CCMP2	2.34	72.74	-0.42	23.80	2.30	68.73	0.36	0.50	6248
	ERA5	1.79	54.31	-0.79	15.17	1.61	52.14	0.71	-0.12	37490
	MERRA2	2.21	70.92	-0.40	33.13	2.17	62.70	0.46	0.48	37490
SQ	CCMP2	1.83	46.40	0.86	0.98	1.62	46.39	0.69	0.39	8366
	ERA5	1.71	39.22	0.96	-6.29	1.42	38.71	0.76	0.57	50187
	MERRA2	1.80	46.17	0.19	-2.03	1.79	46.12	0.58	0.50	50187
Prm.	CCMP2	1.99	58.44	0.60	8.42	1.88	57.43	0.56	0.44	-
	ERA5	1.64	48.73	0.52	7.24	1.52	48.01	0.71	0.41	-
	MERRA2	1.95	58.37	0.42	10.95	1.88	56.50	0.55	0.46	-

Tabla 4. Parámetros estadísticos de la comparación de datos diarios entre estaciones costeras y las series de tiempo CCMP2, ERA5 y MERRA2. Los promedios son estimados con los valores absolutos.

Est.	Datos	<i>RECM</i>		<i>Sesgo</i>		<i>DEE</i>		<i>CC</i>		<i>N</i>
		<i>r</i>	θ	<i>r</i>	θ	<i>r</i>	θ	<i>r</i>	θ	
CP	CCMP2	1.15	62.23	0.61	12.78	0.98	60.90	0.78	0.62	1959
	ERA5	0.74	53.15	-0.15	-3.33	0.73	53.04	0.85	-0.67	1959
	MERRA2	1.19	71.33	0.47	11.36	1.09	70.42	0.70	0.42	1959
EMP	CCMP2	1.32	44.77	0.91	9.14	0.95	43.83	0.74	0.80	1196
	ERA5	0.75	37.75	0.55	3.14	0.50	37.62	0.85	0.84	1196
	MERRA2	1.14	51.10	0.92	12.41	0.68	49.57	0.70	0.71	1196
IG	CCMP2	1.40	23.98	-0.13	7.24	1.39	22.86	0.78	0.55	2396
	ERA5	1.28	23.38	0.23	6.42	1.26	22.48	0.83	0.54	2396
	MERRA2	1.31	25.50	-0.35	1.98	1.26	25.42	0.82	0.49	2396
ITS	CCMP2	1.09	44.01	0.66	-9.13	0.87	43.05	0.72	0.61	2014
	ERA5	0.91	41.44	0.40	-11.09	0.82	39.93	0.69	0.68	2014
	MERRA2	0.91	49.90	-0.19	-14.82	0.89	47.65	0.65	0.55	2014
SF	CCMP2	1.05	77.01	-0.42	49.64	0.96	58.88	0.71	0.72	1575
	ERA5	1.07	58.37	-0.79	16.68	0.72	55.93	0.85	0.49	1575
	MERRA2	1.01	72.73	-0.40	35.37	0.92	63.55	0.74	0.68	1575
SQ	CCMP2	1.20	30.70	0.91	-0.99	0.78	30.69	0.84	0.58	2103
	ERA5	1.21	30.12	0.96	-9.00	0.74	28.74	0.89	0.57	2103
	MERRA2	1.03	35.22	0.19	-3.50	1.02	35.05	0.69	0.50	2103
Prm.	CCMP2	1.20	47.12	0.61	14.82	0.99	43.37	0.76	0.65	-
	ERA5	0.99	40.70	0.51	8.28	0.79	39.62	0.83	0.63	-
	MERRA2	1.10	50.96	0.42	13.24	0.98	48.61	0.72	0.56	-

Las Figuras 4 y 5 muestran las correlaciones entre la rapidez estimada de cada reanálisis contra la medición de cada estación. Los datos de cada base de datos son las series de tiempo con datos simultáneos. De estas figuras se observan muchos valores que se correlacionan bien. Sin embargo, parecen existir diferencias en todas las magnitudes de rapidez, en especial al acercarse a los valores extremos y partiendo desde datos menores a 1 ms^{-1} y mayores a 5 ms^{-1} . Los errores de dichas relaciones se deben a sobrestimaciones o subestimaciones de cada reanálisis. Estas diferencias son

mucho más visibles en las estaciones del GC, donde la mayoría de los datos mayores de 5 ms^{-1} no se correlacionan bien. Particularmente, en Isla Guadalupe es donde se obtienen los mayores valores de correlación, no obstante se observa que existen diferencias en los valores menores a 5 ms^{-1} y mayores a 10 ms^{-1} . Las diferencias de los datos menores a 5 ms^{-1} en Isla Guadalupe se debe a la sobrestimación de los datos de reanálisis, esto puede ser debido a que no se toma en cuenta la reducción de la rapidez del viento por efecto de la isla.

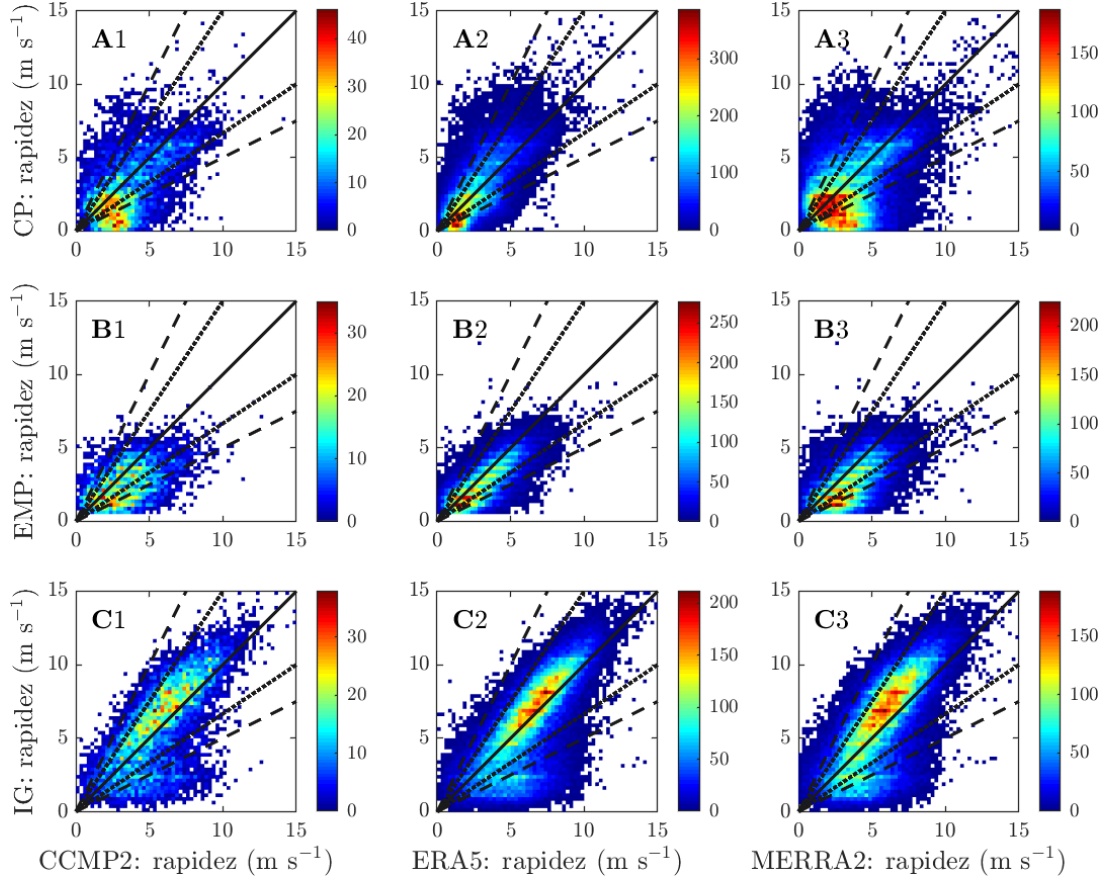


Figura 4. Correlación de la rapidez del viento de las estaciones de Cabo Pulmo (A1-A3), Empalme (B1-B3) e Isla de Guadalupe (C1-C3) con las series de tiempo de CCMP2 (A1, B1, C1), ERA5 (A2, B2, C2) y MERRA2 (A3, B3, C3). La línea continua (—) representa una correlación ideal, mientras que la línea puntuada ($\cdots$) es el 50 % del error, la línea interlineada (- -) es el 100 % del error respecto a la correlación ideal. La barra de colores indica el número de valores que caen dentro de cada pixel (pixel cada 0.25 ms^{-1}).

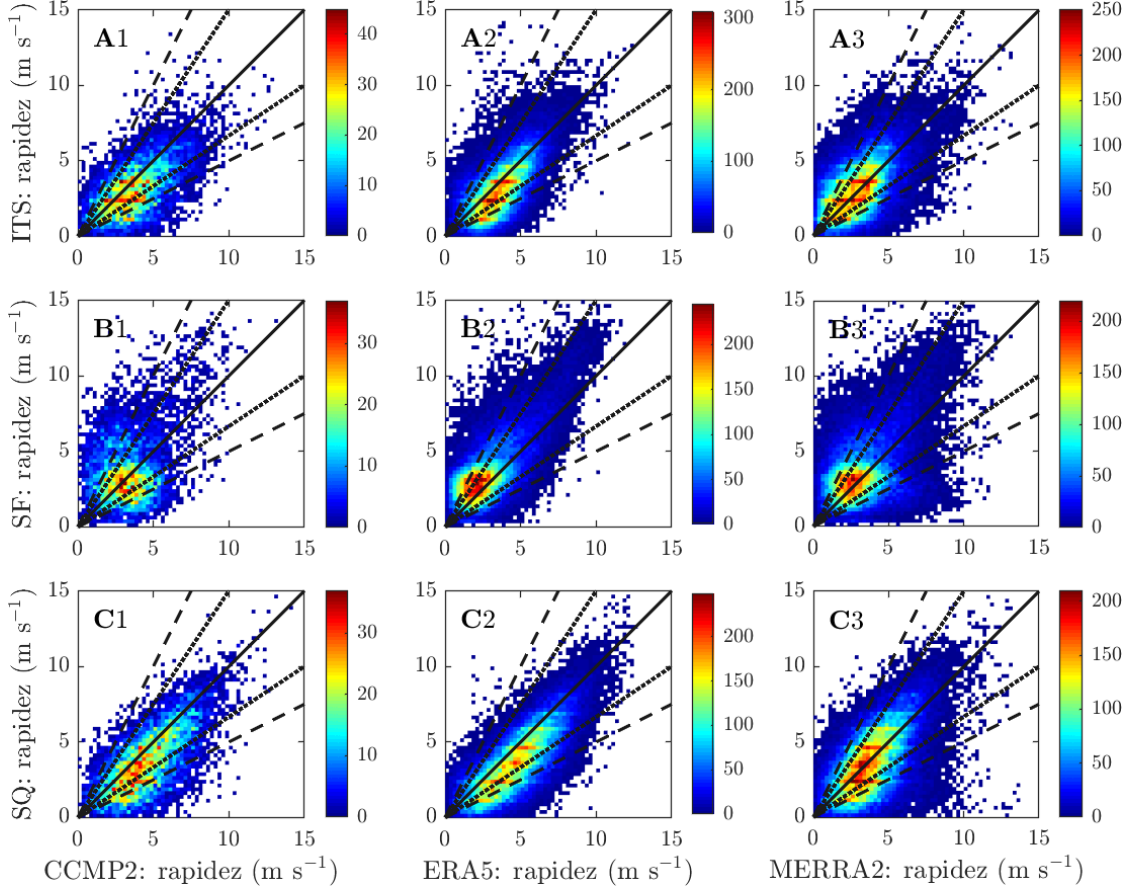


Figura 5. Correlación de la rapidez del viento de las estaciones de Isla Todos Santos (A1-A3), San Felipe (B1-B3) e San Quintín (C1-C3) con las series de tiempo de CCMP2 (A1, B1, C1), ERA5 (A2, B2, C2) y MERRA2 (A3, B3, C3). La línea continua (—) representa una correlación ideal, mientras que la línea puntuada ($\cdots$) es el 50 % del error, la línea interlineada (- -) es el 100 % del error respecto a la correlación ideal. La barra de colores indica el número de valores que caen dentro de cada pixel (pixel cada 0.25 ms^{-1}).

5.2. Comparación de FPD de Weibull

En la sección anterior se analizaron los errores y parámetros estadísticos de la comparación de datos simultáneos y diarios de estaciones y de reanálisis. El propósito de esta sección fue evaluar cual de los reanálisis presentó una mejor estimación de la distribución del viento local. Para esto, se describen y analizan las FDP de Weibull de las mediciones de cada estación y datos de reanálisis. La distribución de Weibull con dos parámetros ha sido utilizada para describir la distribución y variación principal de la rapidez del viento, no solo debido a su flexibilidad y simplicidad, sino también porque se ajusta con precisión a los datos experimentales (Carrillo et al., 2014). Esta distribución tiene la propiedad particular de no tener una forma característica específica, dependiendo de parámetros de forma y

de escala. Las distribuciones de frecuencia son representadas en la Figura 6. La Tabla 5 muestra la rapidez más probable (U_{prob}), su error y los parámetros utilizados para la FDP.

Las distribuciones en la Figura 6 muestran que ninguno de los reanálisis se acerca a estimar una distribución de frecuencia totalmente similar a la de las estaciones. Además, en la mayoría de las estaciones, se observa que los máximos de frecuencia de las distribuciones de los reanálisis son mayores o similares a las estaciones. Esto se debe en parte a que la desviación estándar de los datos de reanálisis en general es menor a la de las estaciones (como se observó en los diagramas de Taylor de la Figura 3). En general, se muestra que en todas las estaciones a excepción de San Felipe las distribuciones de los reanálisis tienden a desplazarse hacia mayores valores de rapidez. Este desplazamiento significa que los datos de reanálisis subestiman las velocidades bajas del viento y sobrestiman las velocidades altas. En particular, las distribuciones más alejadas fueron en Isla Guadalupe, en donde todos los reanálisis mostraron distribuciones más leptocúrtica y sobrestimadas que la estación.

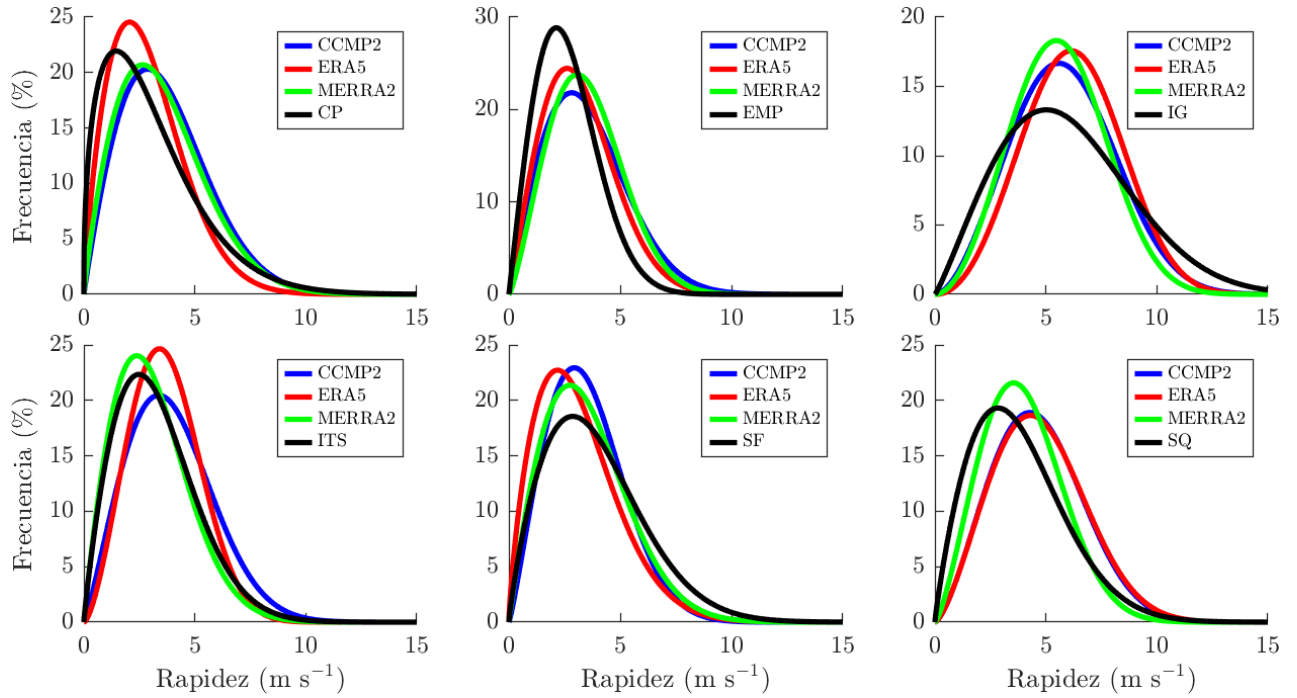


Figura 6. Distribuciones de Weibull de los datos de estaciones y de las series de tiempo en el punto de máxima de correlación de CCMP2, ERA5 y MERRA2.

Los promedios de la Tabla 5 muestra que, primero, el conjunto de datos con menores errores (en coeficientes α , β y U_{prob}) fue el de MERRA2, seguido por ERA5 y CCMP2. Esto es de esperarse, ya que a pesar de que MERRA2 presenta mayores errores (RECM y DEE) y menores correlaciones (ver Tabla 3) que ERA5 y similares a CCMP2, MERRA2 es el reanálisis con menor sesgo de los tres. En este análisis la consistencia temporal de las bases de datos no se reflejará en los resultados, ya que se presentan en términos de una distribución de frecuencia que no refleja la precisión de la variabilidad temporal. Por lo tanto los datos de reanálisis que presenten menor sesgo serán los que se acercan mejor a una estimación correcta de la rapidez más probable. Por consiguiente se infiere que la diferencia de errores entre MERRA2 y ERA5 (mayores para MERRA2) se deben a un problema temporal, es decir un desajuste en los datos respecto al tiempo. Segundo, los promedios indican que el coeficiente de determinación de las distribuciones de todos los reanálisis es de 0.99, mientras que el de las estaciones es de 0.88. Esto indica que la distribución de los datos de las estaciones es menos consistente a una distribución de Weibull, lo que es de esperarse al ser datos in situ.

Analizando los resultados de cada estación, una vez más se observa que los datos de reanálisis sobrestiman la rapidez del viento (errores positivos de U_{prob}) en todas las estaciones a excepción de ERA5 y MERRA2 en San Felipe y de MERRA2 en Isla Todos Santos. Revisando los errores del parámetro α , es posible ver que los mejores resultados coinciden con los menores sesgos de la rapidez (ver Tabla 3). Además, los menores errores en el parámetro α en la mayoría de las estaciones corresponden a la mejor estimación en U_{prob} . Nuevamente, esto indica que la base de datos con menor sesgo es la que mejor puede predecir la rapidez del viento sin considerar su distribución temporal.

Tabla 5. Parámetros de la FDP de Weibull (α y β), rapidez más probable (U_{prob}) y coeficiente de determinación (R^2) del ajuste para todas las bases de datos.

Estación	Datos	α (ms^{-1})	Error (%)	β (—)	Error (%)	U_{prob} (ms^{-1})	Error (%)	R^2	N
Cabo Pulmo	Estación	3.36	-	1.43	-	1.46	-	0.82	46600
	CCMP2	4.15	23.46	1.95	35.93	2.87	96.73	0.97	8056
	ERA5	3.26	-3.00	1.78	24.56	2.06	41.19	0.99	48336
	MERRA2	3.98	18.29	1.87	30.77	2.65	81.60	1.00	48336
Empalme	Estación	2.99	-	2.02	-	2.13	-	0.92	28164
	CCMP2	3.96	32.34	2.02	0.09	2.82	32.44	0.99	5084
	ERA5	3.59	20.09	2.07	2.68	2.61	22.64	0.99	30504
	MERRA2	3.96	32.44	2.28	13.22	3.08	44.50	1.00	30504
Isla Guadalupe	Estación	6.74	-	2.14	-	5.02	-	0.76	57454
	CCMP2	6.57	-2.56	2.76	29.14	5.58	11.19	0.99	10028
	ERA5	6.94	2.95	3.13	46.40	6.14	22.26	0.99	60168
	MERRA2	6.30	-6.55	2.94	37.31	5.47	8.90	1.00	60168
Isla Todos Santos	Estación	3.70	-	1.89	-	2.48	-	0.97	48134
	CCMP2	4.46	20.49	2.19	15.97	3.37	36.02	0.99	8096
	ERA5	4.15	12.06	2.54	34.60	3.41	37.32	1.00	48576
	MERRA2	3.48	-5.86	1.93	2.06	2.38	-3.98	0.98	48576
San Felipe	Estación	4.39	-	1.84	-	2.87	-	0.85	37490
	CCMP2	3.93	-10.49	2.15	16.95	2.94	2.53	0.98	6800
	ERA5	3.51	-20.14	1.77	-4.01	2.19	-23.78	0.98	40800
	MERRA2	3.95	-10.00	1.95	6.02	2.73	-4.65	0.98	40800
San Quintín	Estación	4.27	-	1.88	-	2.84	-	0.96	50187
	CCMP2	5.28	23.78	2.46	31.38	4.28	50.42	0.99	8754
	ERA5	5.33	24.84	2.45	30.55	4.30	51.24	0.99	52528
	MERRA2	4.48	4.86	2.36	25.88	3.54	24.65	0.99	52528
Promedio	Estación	-	-	-	-	-	-	0.88	-
	CCMP2	-	18.85	-	21.58	-	38.22	0.99	-
	ERA5	-	13.85	-	23.80	-	33.07	0.99	-
	MERRA2	-	13.00	-	19.21	-	28.05	0.99	-

5.3. Análisis de ejes principales

En esta sección se analiza la variabilidad del vector del viento para cada estación y serie de tiempo de los reanálisis. Los datos usados para este análisis corresponden a los registros diarios de cada base de datos. Las elipses de cada estación se muestran en las Figuras 7, 8 y 9. Con la finalidad de mostrar la dispersión de cada base de datos, la Figura 10 y 11 muestran las elipses de cada estación y reanálisis con sus respectivos vectores diarios. Los parámetros estimados de cada elipse son mostrados en la Tabla 6.

En general se observó en todas las estaciones que los vientos se alinearon con la dirección prevalente (hacia el sureste) del área de estudio (ver Figura 15). A su vez, se muestra que los vectores promedios de las elipses son mayores en las estaciones del Pacífico en contraste con las del GC. Esto es de esperarse ya que la dirección de los vientos en el Pacífico es persistente durante todo el año hacia el sureste, mientras que en GC tiene fluctuaciones. Los promedios de la Tabla 6 indican que las elipses de ERA5 y MERRA2 se encuentran alineadas a las estaciones, mientras que CCMP2 está desalineada. Por otro lado, los valores de ERA5 de los ejes principales, varianza explicada y excentricidad son los más cercanos a los de las estaciones. El promedio de la varianza explicada del eje mayor (λ_1) de los reanálisis es menor respecto al de las estaciones, mientras que en el eje menor (λ_2) es mayor. Esto indica que los componentes del viento de los datos de reanálisis se encuentran más dispersos y con mayor varianza, y por ende, menor excentricidad de las elipses. La mayor varianza de las componentes es más visible en la Figura 10 y 11, donde en general, se observa que la dispersión de los vectores de los reanálisis no se asemeja a la de las estaciones.

En la Figura 7 se puede observar que la excentricidad de las elipses de los datos de reanálisis difiere con la de la estación de Cabo Pulmo. De manera más clara, en la Figura 10-A1 se observa que los vectores de la estación de Cabo Pulmo están regidos por vientos que se dirigen hacia el norte y al sureste principalmente. Por otro lado, los vectores de los reanálisis en Cabo Pulmo tienen mayor dispersión o variabilidad en otras direcciones, siendo ERA5 el único que presenta direcciones predominantes del viento parecidas a la estación.

Las elipses de Empalme de los reanálisis muestran mayores valores en los ejes principales (ver Figura 7). Sin embargo, la orientación, varianza explicada y excentricidad son similares (ver Tabla 6). Esto significa que las estimaciones de los reanálisis en Empalme presentan sesgos relativamente altos pero no necesariamente valores altos de RECM y DEE, lo cual se corrobora con los resultados de la Tabla 3 y con la sobrestimación observada de la distribución de Weibull (ver Figura 6).

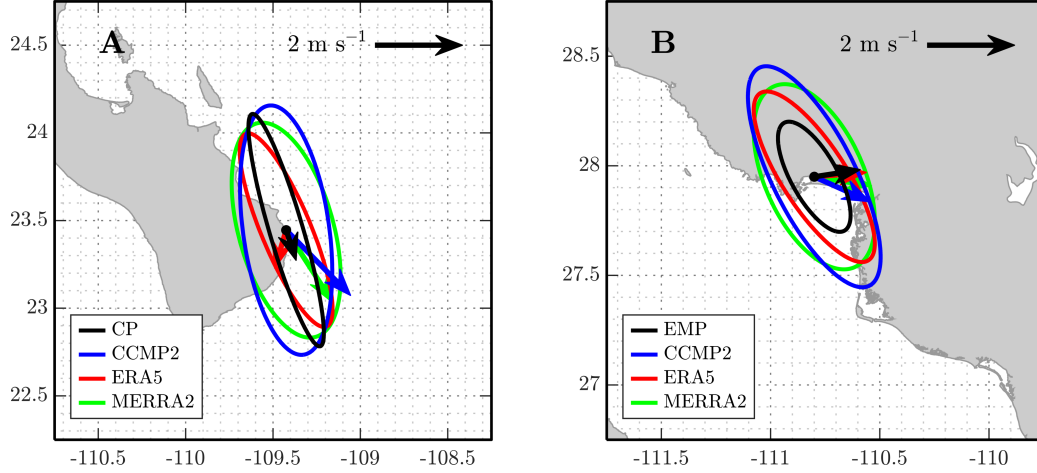


Figura 7. Elipses de variabilidad de la estación de Cabo Pulmo (A) y Empalme (B). La flecha que surge del centro de cada elipse indica el vector promedio para cada base de datos.

Las elipses de Isla Guadalupe presentadas en la Figura 8 muestran claramente que existe un error en la orientación y en los valores de los ejes principales de los datos de reanálisis, presentando como resultado menores excentricidades. Como se observó en los diagramas de Taylor de la Figura 3, los tres reanálisis estiman de forma similar los datos de la estación en Isla Guadalupe, por lo que es de esperarse que la elipses de variabilidad a su vez muestren una forma muy parecida. En la Figura 10 se observa que los vientos de la estación son predominantemente hacia el noroeste y sureste, mientras que en los reanálisis existen diferencias hacia otras direcciones. Esto puede deberse, nuevamente, a que el efecto orográfico de la isla no es adecuadamente estimado por los reanálisis.

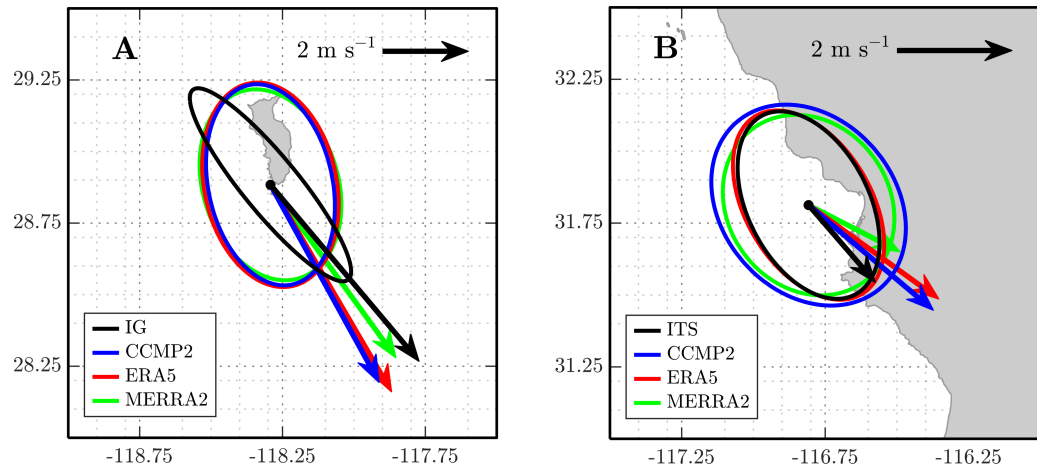


Figura 8. Elipses de variabilidad de la estación de Isla Guadalupe (A) e Isla Todos Santos (B). La flecha que surge del centro de cada elipse indica el vector promedio para cada base de datos.

Isla Todos Santos fue la estación donde las elipses fueron más semejantes, particularmente la de ERA5 que estima valores de los ejes, orientación y excentricidad muy semejantes (ver Tabla 6).

CCMP2 y MERRA2 presentaron las elipses con menor semejanza en la estación de San Felipe (ver Figura 8). La dispersión de los vectores de la Figura 11 muestra que la dirección predominante de los vientos en la estación es hacia el noroeste y sureste. Esta predominancia en la dirección solo se observó en el caso de ERA5, mientras que CCMP2 y MERRA2 estiman de manera incorrecta los vientos que se dirigen hacia el sur y presentan diferencias con direcciones hacia el este.

Las elipses en San Quintín de los reanálisis muestran diferencias los valores de los ejes y excentricidad. Una vez más, la elipse de ERA5 es la que más se asemeja a la de la estación.

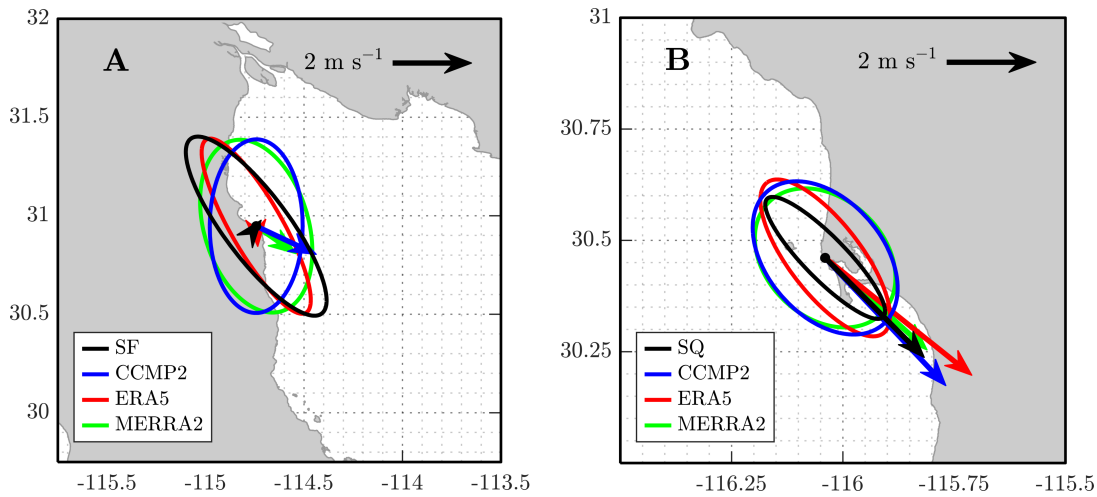


Figura 9. Elipses de variabilidad de la estación de San Felipe (A) y San Quintín (B). La flecha que surge del centro de cada elipse indica el vector promedio para cada base de datos.

Tabla 6. Ángulo (θ_p), componentes principales (λ_1 y λ_2), varianza explicada por cada componente (v.exp1 y v.exp2) y eccentricidad (e) para datos diarios cada elipse de variabilidad.

Estación	Datos	θ_p	λ_1	λ_2	v.exp1	v.exp2	e
Cabo Pulmo	Estación	163.58	2.76	0.38	98.11	1.89	0.99
	CCMP2	172.04	2.87	0.99	89.42	10.58	0.94
	ERA5	157.18	2.38	0.57	94.65	5.35	0.97
	MERRA2	164.53	2.53	1.09	84.34	15.66	0.90
Empalme	Estación	150.68	1.41	0.53	87.58	12.42	0.93
	CCMP2	153.06	2.79	0.95	89.65	10.35	0.94
	ERA5	146.90	2.27	0.73	90.54	9.46	0.95
	MERRA2	155.77	2.26	1.13	79.95	20.05	0.87
Isla Guadalupe	Estación	140.62	2.86	0.65	95.03	4.97	0.97
	CCMP2	167.56	2.38	1.45	72.92	27.08	0.79
	ERA5	167.83	2.41	1.54	70.91	29.09	0.77
	MERRA2	162.62	2.28	1.58	67.49	32.51	0.72
Isla Todos Santos	Estación	152.51	1.75	1.05	73.49	26.51	0.80
	CCMP2	138.73	1.91	1.51	61.65	38.35	0.61
	ERA5	149.05	1.80	1.09	73.19	26.81	0.80
	MERRA2	144.13	1.65	1.41	57.76	42.24	0.52
San Felipe	Estación	143.17	2.77	0.82	91.93	8.07	0.96
	CCMP2	0.13	2.20	1.18	77.70	22.30	0.84
	ERA5	150.12	2.54	0.66	93.72	6.28	0.97
	MERRA2	163.47	2.25	1.33	74.24	25.76	0.81
San Quintín	Estación	135.57	1.86	0.48	93.86	6.14	0.97
	CCMP2	139.00	1.98	1.30	69.90	30.10	0.75
	ERA5	142.26	2.14	0.81	87.53	12.47	0.93
	MERRA2	133.90	1.78	1.33	64.20	35.80	0.67
Promedio	Estación	147.69	2.24	0.65	90.00	10.00	0.94
	CCMP2	128.42	2.35	1.23	76.87	23.13	0.81
	ERA5	152.23	2.26	0.90	85.09	14.91	0.90
	MERRA2	154.07	2.12	1.31	71.33	28.67	0.75

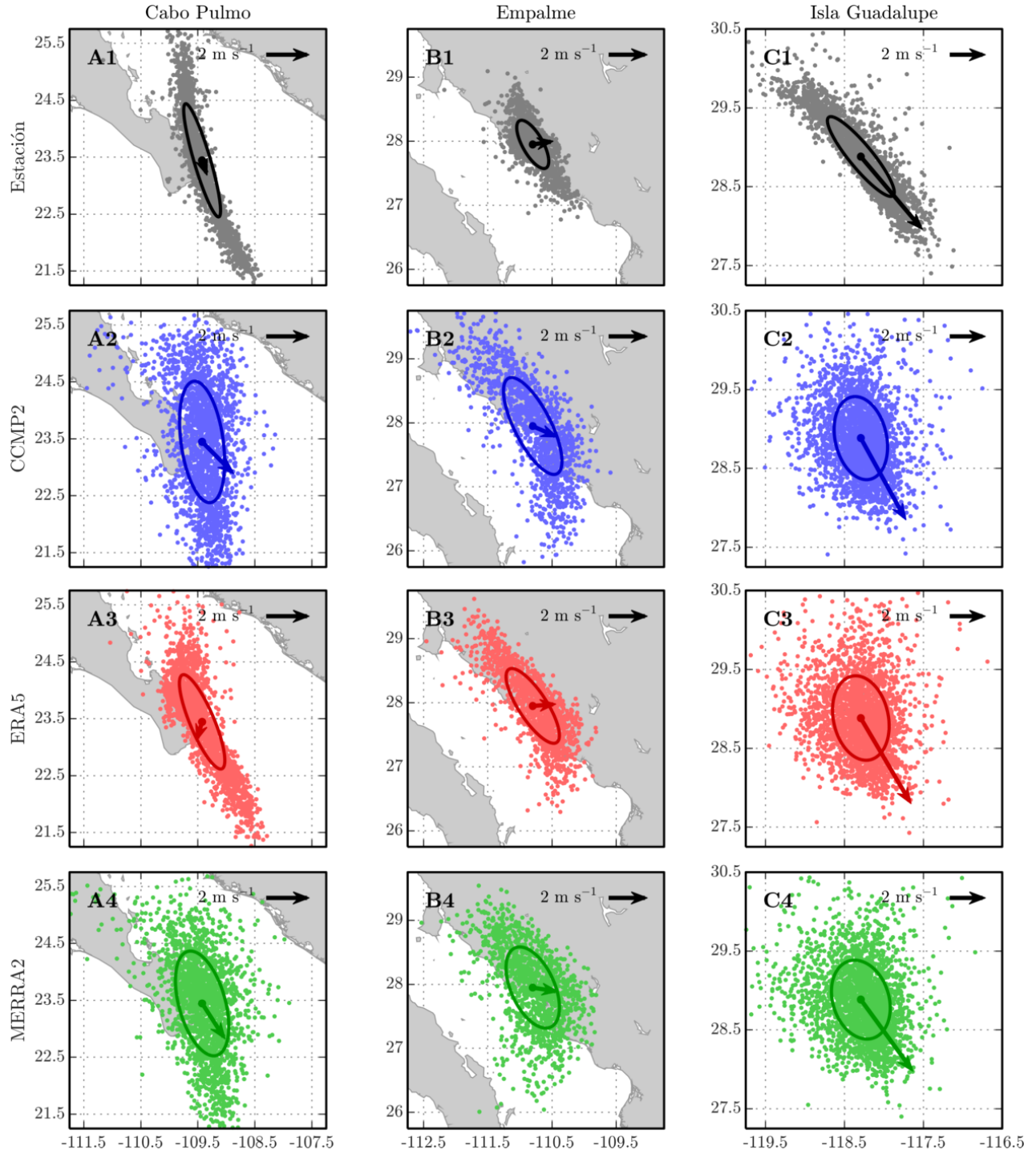


Figura 10. Elipses de variabilidad de Cabo Pulmo (A1-A4), Empalme (B1-B4), Isla Guadalupe (C1-C4) y de los datos de reanálisis. Los puntos en cada figura señalan la dispersión de los vectores para cada base de datos. El conjunto de datos utilizado es presentado en cada renglón con un color distinto.

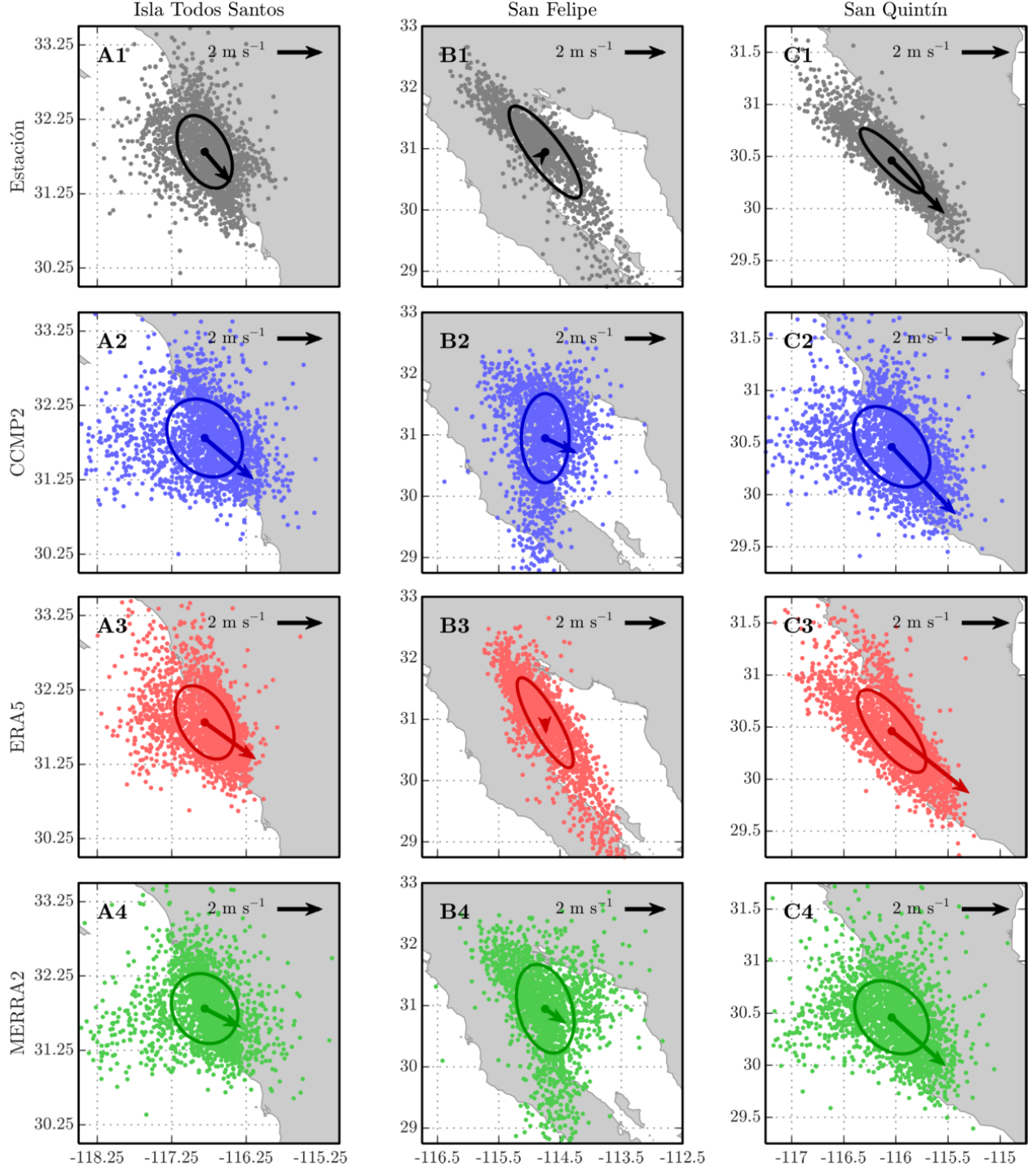


Figura 11. Elipses de variabilidad de Isla Todos Santos (A1-A4), San Felipe (B1-B4), San Quintín (C1-C4) y de los datos de reanálisis. Los puntos en cada figura señalan la dispersión de los vectores para cada base de datos. El conjunto de datos utilizado es presentado en cada renglón con un color distinto.

5.4. Variabilidad estacional

En esta sección se analizó la variabilidad estacional del área de estudio. En la sección 5.4.1 se presentan ajustes armónicos de las series de tiempo de los componentes u y v para cada estación y reanálisis. Esta sección tuvo el propósito de caracterizar la señal anual presente en cada estación así como comparar los ajustes entre cada base de datos y hacer inferencias sobre las diferencias observadas. En la sección 5.4.2 se describen los promedios mensuales de la rapidez y dirección del viento, así como la RCM de los componentes u y v . Para finalizar, en la sección 5.4.3 se analizó el ajuste armónico sobre toda la zona de estudio. Para realizar las observaciones sobre el área de estudio completa se seleccionó el reanálisis de ERA5 debido a que sistemáticamente se ha mostrado en varios apartados de las secciones anteriores como la base de datos con mejor precisión.

5.4.1. Ajuste anual de series de tiempo

Se presentan en las figuras 12, 13 y 14 las series de tiempo de las componentes u y v con el ajuste armónico estimado. En la Tabla 7 se muestran los resultados de los parámetros de los ajustes.

En general, el ajuste de ERA5 es el que tiene mayor semejanza al ajuste de todas las estaciones (valores similares de amplitud, fase y varianza explicada). Además, el ajuste de ERA5 es el único de los reanálisis que no presenta grandes errores de fase como CCMP2 y MERRA2. Esto se corrobora con los resultados de la Tabla 4 donde ERA5 es la base de datos con menor DEE, lo que implica que los errores en la rapidez de CCMP2 y MERRA2 provienen de un error de desfase en alguna de sus componentes. Asimismo, el hecho que ERA5 no presente desfases en sus ajustes comprueba porque es el reanálisis con mejor correlación en la rapidez del viento. De las series de tiempo también se observa que en la mayoría de las estaciones, la amplitud del ajuste de los reanálisis es similar al de los datos medidos.

En Cabo Pulmo, los ajustes de CCMP2 y MERRA2 se encuentran desfasados por alrededor de 60 días, además, se observa un error en la estimación de la componente u . Esto explica los valores altos de DEE y la dispersión de los vectores mostrada en la Figura 10. Los promedios de los ajustes indican que CCMP2 y MERRA2 sobrestiman las mediciones en la componente v y u , a diferencia de ERA5 que sobrestima la componente v y subestima la componente u . Al subestimar la componente u con un sesgo de -0.51, ERA5 produce un error en la estimación de la dirección, justificando el resultado negativo en la correlación de la dirección del viento de la Tabla 4.

Todos los ajustes de los reanálisis en Empalme obtuvieron mayores amplitudes en ambas componentes que en la estación. No obstante, las series de los reanálisis aparentan simular de manera correcta a los datos medidos, además tener fases similares. Por lo tanto los errores de los reanálisis en esta estación corresponden al sesgo. Esto puede ser debido a la localización de la estación. Las estimacio-

nes de cada producto se hacen interpolando los datos más cercanos a la estación, que corresponden al GC. Esto significa que al interpolar puntos alejados de la estación de Empalme, que es la estación más adentrada en tierra, es de esperarse que se produzca un sesgo positivo.

Como previamente se había observado en otras secciones, en Isla Guadalupe los tres reanálisis estiman valores similares. Las series de tiempo y los ajustes de la componente u simulan equiparablemente a la estación aún con errores en los promedios y amplitud (menores valores). Las fases y promedios de la componente v en las estimaciones son similares que en la estación. Sin embargo, al observar las series de tiempo de la componente v se percibe un error en las estimaciones. Las amplitudes de los ajustes de los reanálisis son menores la amplitud de la estación, además de estar más dispersas y por ende con menor varianza explicada. Esto explica la baja excentricidad observada de las elipses de variabilidad de la Figura 8. La posición de la estación se encuentra al sur de la Isla, con el punto más alto al norte y el océano al sur. Por lo que pueden estar influenciados los vientos meridionales en la estación y dicha influencia no es percibida en la estimación de los reanálisis. En Isla Todos Santos se observa la misma situación que en Isla Guadalupe. La componente u presenta una señal anual bien establecida mientras que la componente v esta dispersa y con amplitudes bajas.

Los ajustes en San Felipe presentan un patrón similar que en Cabo Pulmo. Los ajustes de la componente u de CCMP2 y MERRA2 se encuentran desfasados por alrededor de 40 días (por ende menores varianzas explicadas) y menores amplitudes. Mientras que ERA5 se encuentra en fase y con amplitudes similares. Para el caso de la componente v , todos los ajustes y series de tiempo de los reanálisis simularon los datos medidos de manera parecida. Del mismo modo que Cabo Pulmo el sesgo de ERA5 en la componente v es negativo.

Se observó en San Quintín que, como en las otras estaciones del Pacífico, los ajustes de la componente u de los reanálisis son muy semejantes al de la estación en términos de amplitud, fase y varianza explicada. Sin embargo, como lo es también en Isla Guadalupe e Isla Todos Santos, las estimaciones presentan una mayor dispersión de la componente u .

Tabla 7. Parámetros de los ajustes armónicos para cada estación y reanálisis. $\bar{u}$ y $\bar{v}$ son los promedios de las componentes u y v , A indica la amplitud del primer armónico en ms^{-1} , ϕ es la fase en días y V.exp es la varianza explicada por el ajuste.

Datos		Componente u				Componente v			
		$\bar{u}$ (ms^{-1})	A (ms^{-1})	ϕ (días)	V.exp (%)	$\bar{v}$ (ms^{-1})	A (ms^{-1})	ϕ (días)	V.exp (%)
CP	Estación	0.23	0.92	364.1	57.83	-0.69	2.84	188.6	58.30
	CCMP2	1.47	0.50	73.2	11.02	-1.43	3.00	182.7	55.95
	ERA5	-0.28	1.12	354.6	55.93	-0.83	2.29	186.6	53.75
	MERRA2	1.06	0.67	55.7	14.25	-1.61	2.29	190.1	43.52
EMP	Estación	1.05	0.45	12.7	13.78	0.16	1.33	170.9	54.55
	CCMP2	1.37	1.04	19.8	23.23	-0.71	2.40	175.3	45.06
	ERA5	1.28	0.92	22.6	21.93	-0.01	1.95	175.5	49.90
	MERRA2	1.40	0.72	61.4	13.35	-0.31	1.83	174.0	37.47
IG	Estación	3.46	1.20	151.0	21.09	-4.11	1.31	335.4	17.43
	CCMP2	2.53	0.69	135.5	10.77	-4.58	0.24	353.5	0.55
	ERA5	2.83	0.83	136.7	13.72	-4.78	0.49	360.6	2.12
	MERRA2	2.93	0.89	137.9	14.69	-4.00	0.34	340.5	1.19
ITS	Estación	1.16	1.12	165.3	40.31	-1.34	0.20	21.7	0.75
	CCMP2	2.17	1.15	149.1	22.83	-1.83	0.08	129.0	0.11
	ERA5	2.2	1.24	165.3	43.67	-1.63	0.33	15.1	2.07
	MERRA2	1.59	0.90	143.6	17.82	-0.82	0.20	225.1	0.84
SF	Estación	0.12	1.89	353.6	57.99	0.15	1.74	173.9	30.41
	CCMP2	1.51	0.55	68.4	10.58	-0.63	1.95	171.4	40.26
	ERA5	-0.03	1.32	348.5	46.39	-0.42	2.02	171.5	42.68
	MERRA2	0.97	0.91	26.1	20.40	-0.61	1.94	175.9	40.36
SQ	Estación	2.22	1.04	154.9	29.21	-2.23	0.49	350.2	6.28
	CCMP2	2.73	1.13	150.9	24.02	-2.87	0.08	252.3	0.11
	ERA5	3.30	1.29	160.5	39.53	-2.64	0.46	331.4	3.42
	MERRA2	2.29	0.98	147.4	19.35	-2.07	0.21	290.4	0.87

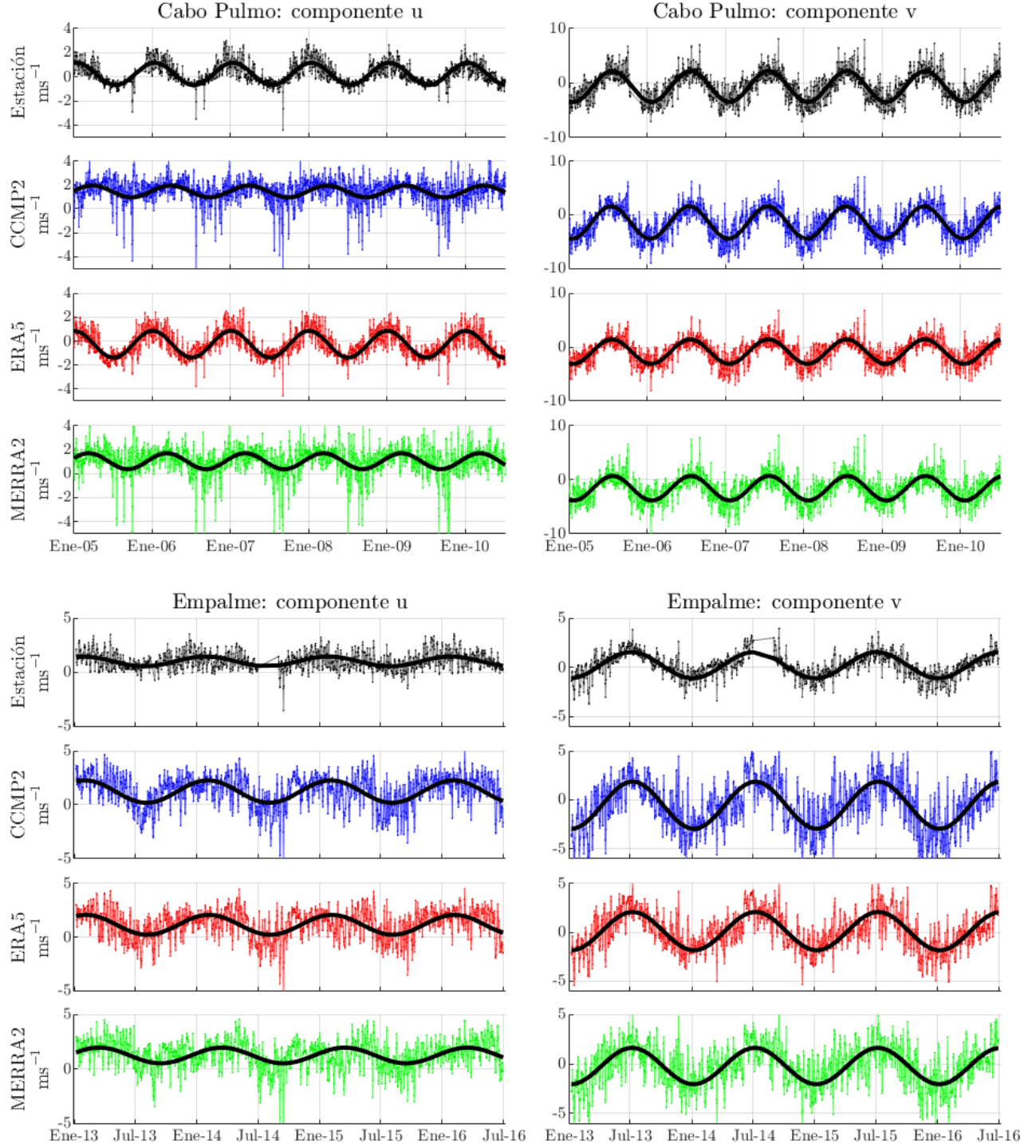


Figura 12. Ajuste armónico de las series de tiempo de las componentes u y v de Cabo Pulmo y Empalme. El color de las series de tiempo indica que base de datos es usada: negro para estaciones, azul para CCMP2, rojo para ERA5 y verde para MERRA2. La línea continua negra indica el ajuste anual estimado.

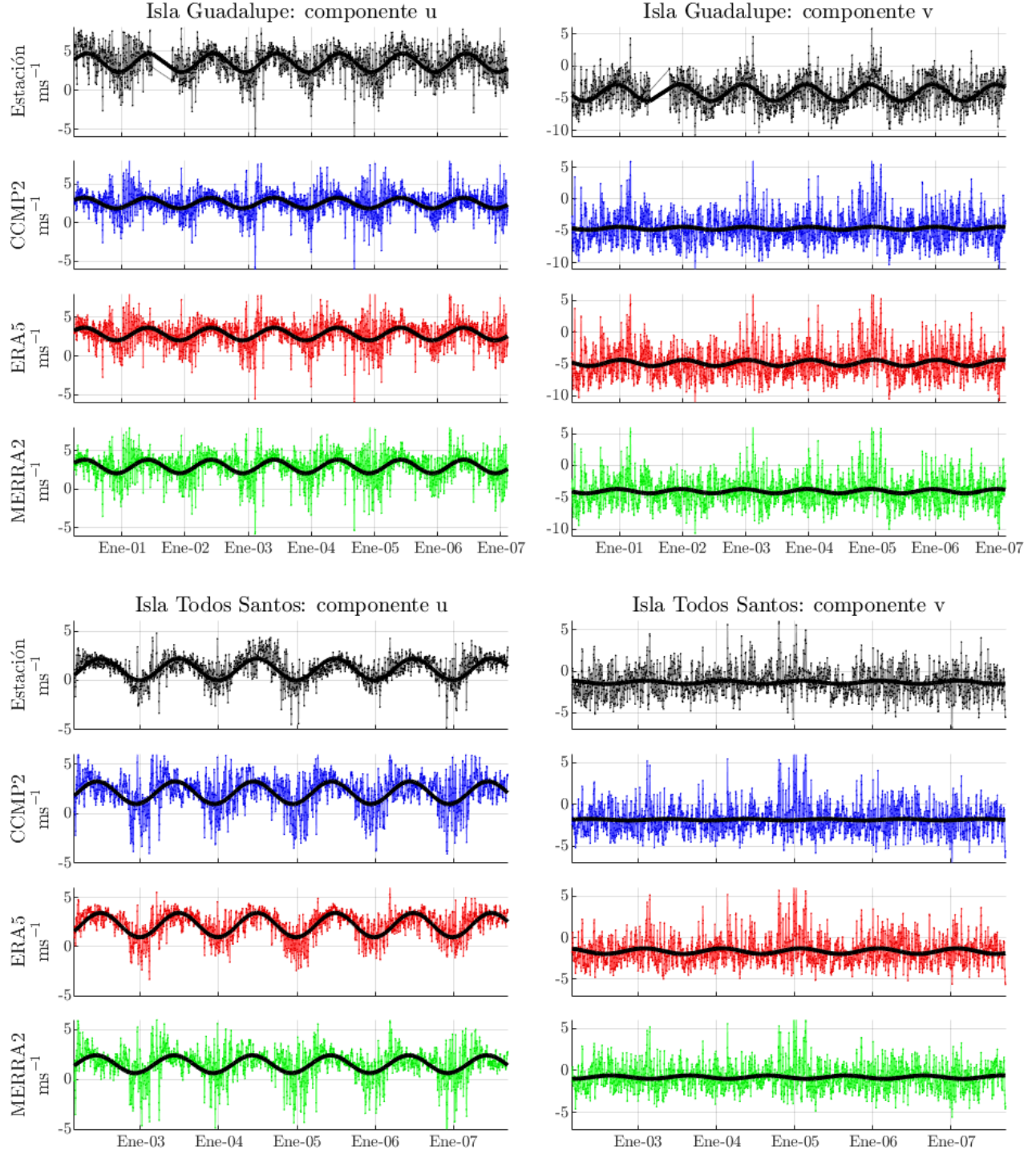


Figura 13. Ajuste armónico de las series de tiempo de las componentes u y v de Isla Guadalupe e Isla Todos Santos. El color de las series de tiempo indica que base de datos utilizada: negro para estaciones, azul para CCMP2, rojo para ERA5 y verde para MERRA2. La línea continua negra indica el ajuste anual estimado.

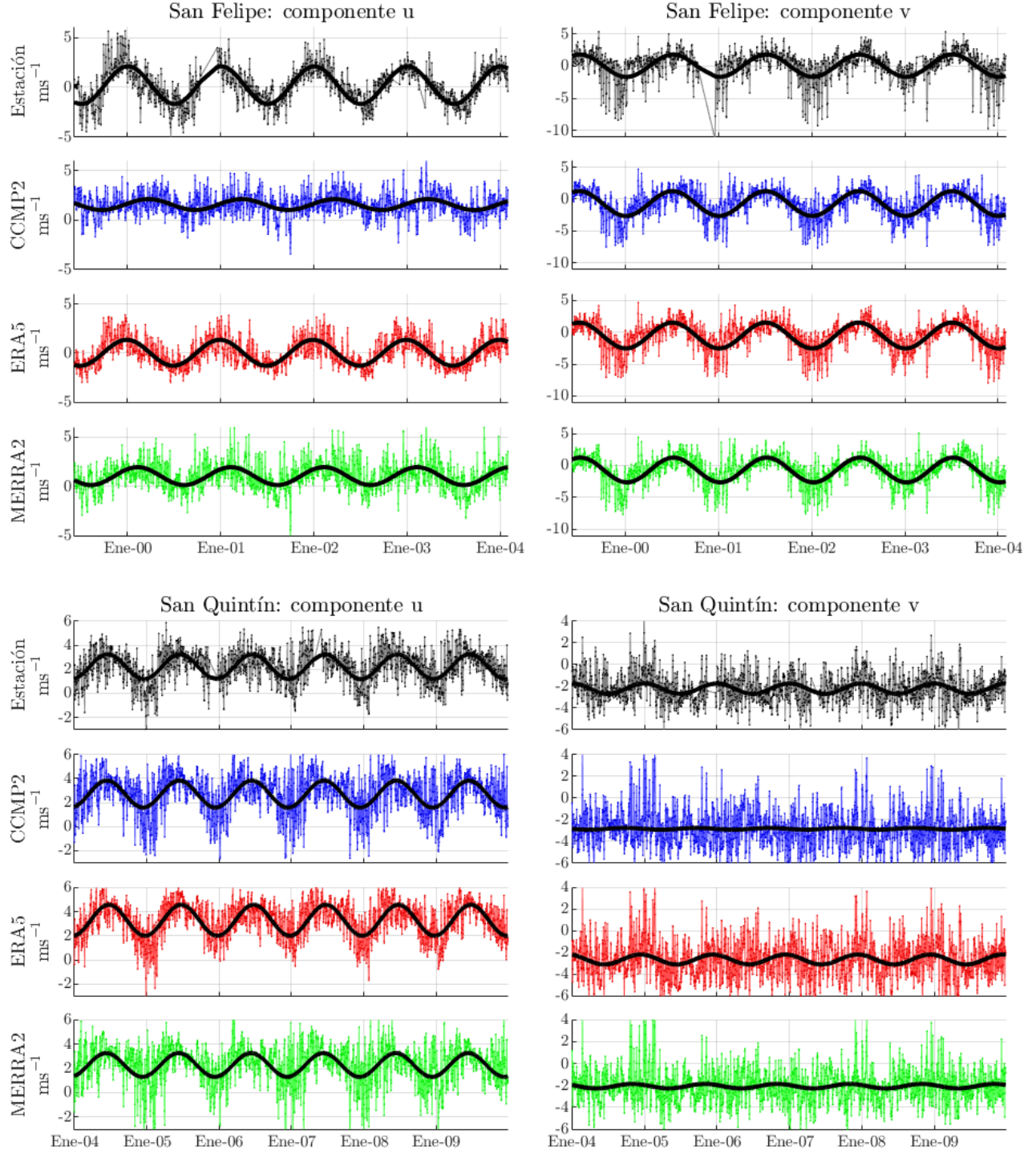


Figura 14. Ajuste armónico de las series de tiempo de las componentes u y v de San Felipe y San Quintín. El color de las series de tiempo indica que base de datos utilizada: negro para estaciones, azul para CCMP2, rojo para ERA5 y verde para MERRA2. La línea continua negra indica el ajuste anual estimado.

5.4.2. Climatología

Los promedios mensuales de la dirección y rapidez del viento de ERA5 muestran una señal estacional clara (Fig. 15). En el Pacífico, la rapidez del viento aumentó durante los meses de febrero a junio, presentando la máxima rapidez en abril y mayo de ~ 6 a 8 ms^{-1} . El resto del año disminuyó, manteniendo una rapidez relativamente constante de ~ 5 a 6.5 ms^{-1} . Particularmente la región alrededor de Punta Eugenia mantuvo los mayores valores de la rapidez durante todo el año. Por otro lado, dentro del GC se observó que la rapidez disminuyó en los meses de marzo a octubre con valores de ~ 3 a 5 ms^{-1} y aumentó de noviembre a febrero con registros de ~ 5 a 7 ms^{-1} , presentando la mayor rapidez en diciembre. En general, se observó que la magnitud del viento fue mayor en Pacífico que en el GC durante casi todo el año, y que el aumento en la rapidez no está sincronizado para ambas regiones.

La dirección del viento dentro del GC mostró un cambio en la dirección opuesta a la predominante (hacia el sureste), en contraste al Pacífico, que se mantuvo persistente todo el año con una dirección hacia el sureste cerca de la costa y hacia el sur y suroeste lejos de la península. De octubre a abril la dirección predominante en el GC fue hacia el sureste, durante junio a agosto el sentido de la dirección cambió hacia el noroeste, corroborando lo descrito por Bordoni et al., (2004). En mayo y septiembre la dirección dentro del GC fue hacia el noreste, estos meses figuran ser el periodo transitorio donde la dirección se invierte.

Un rasgo importante que prevalece en la climatología (Fig. 15), es que los vientos del Pacífico se cruzan hacia el golfo en algunas localidades a lo largo de la península, sobre todo entre abril y septiembre. Lo anterior es más notable alrededor de $29\text{-}30^\circ\text{N}$, $27.5\text{-}28^\circ\text{N}$ y 23.5°N . Este flujo de los vientos hacia el este, está relacionado en gran medida con las restricciones topográficas debido a los cambios en la elevación de las montañas a lo largo de la península de Baja California, y posiblemente a los gradientes ocasionados entre los ambientes atmosféricos y oceánicos entre el Pacífico y golfo de California.

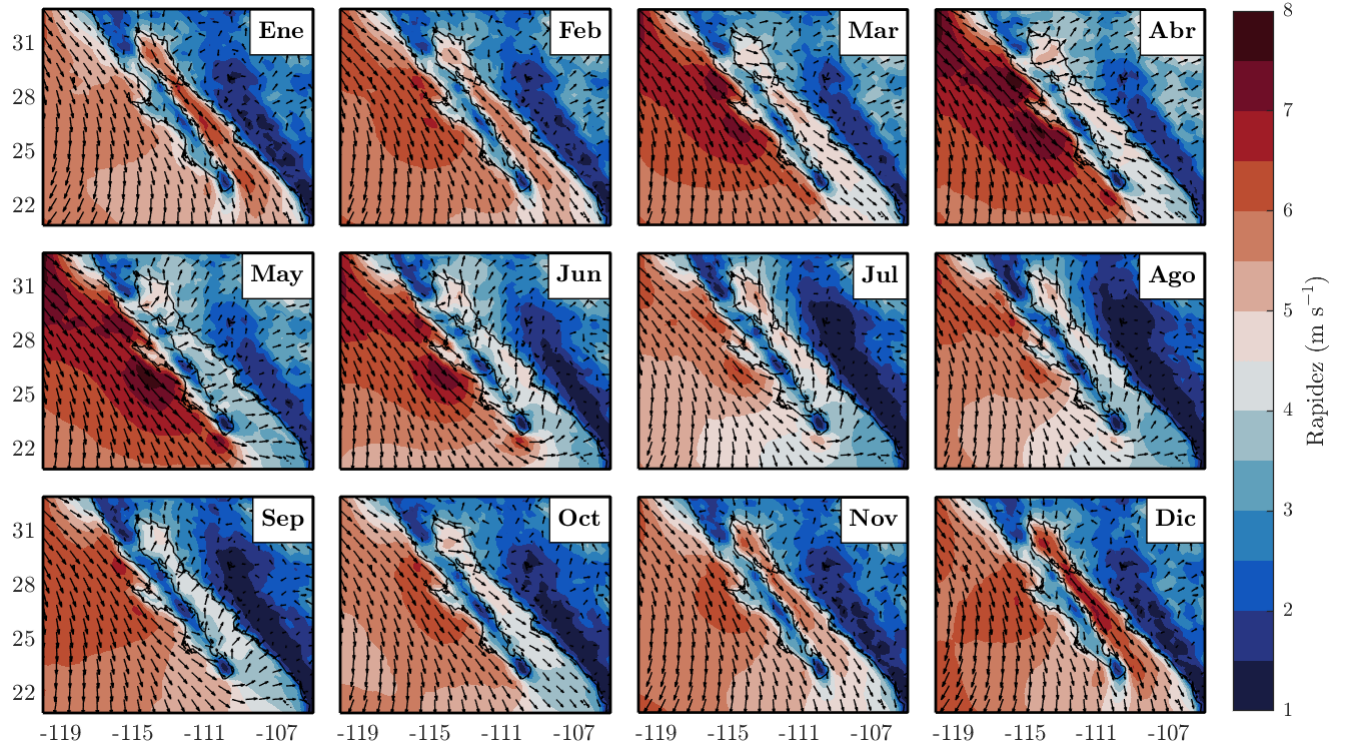


Figura 15. Promedios mensuales de la rapidez del viento (mapa de color: ms^{-1}) y de vectores de dirección (flechas negras) para el periodo de estudio 1999 a 2016 de los datos de ERA5. Los vectores señalados se calculan de los datos de la malla a cada 0.5 grados.

Las RCM mensuales (Fig. 16) muestran que el GC es más variable respecto al Pacífico durante la mayoría del año, observándose de manera más persistente y con mayores valores en el zona de Alto Golfo. De octubre a abril es donde se presentan las mayores velocidades ($>5 \text{ ms}^{-1}$) en la región norte del GC. En los meses de junio a agosto es donde se observan los menores valores ($<4 \text{ ms}^{-1}$) en toda la zona de estudio. Mayo y septiembre aparentan ser los meses de transición donde la RCM disminuye y aumenta respectivamente, con la característica que en septiembre, al sur de la península, aumenta valores mayores 5 ms^{-1} . La temporalidad de esta fluctuación en la RCM corresponde al cambio en la dirección dentro del golfo. Por lo que se intuye que el forzante debe ser el mismo.

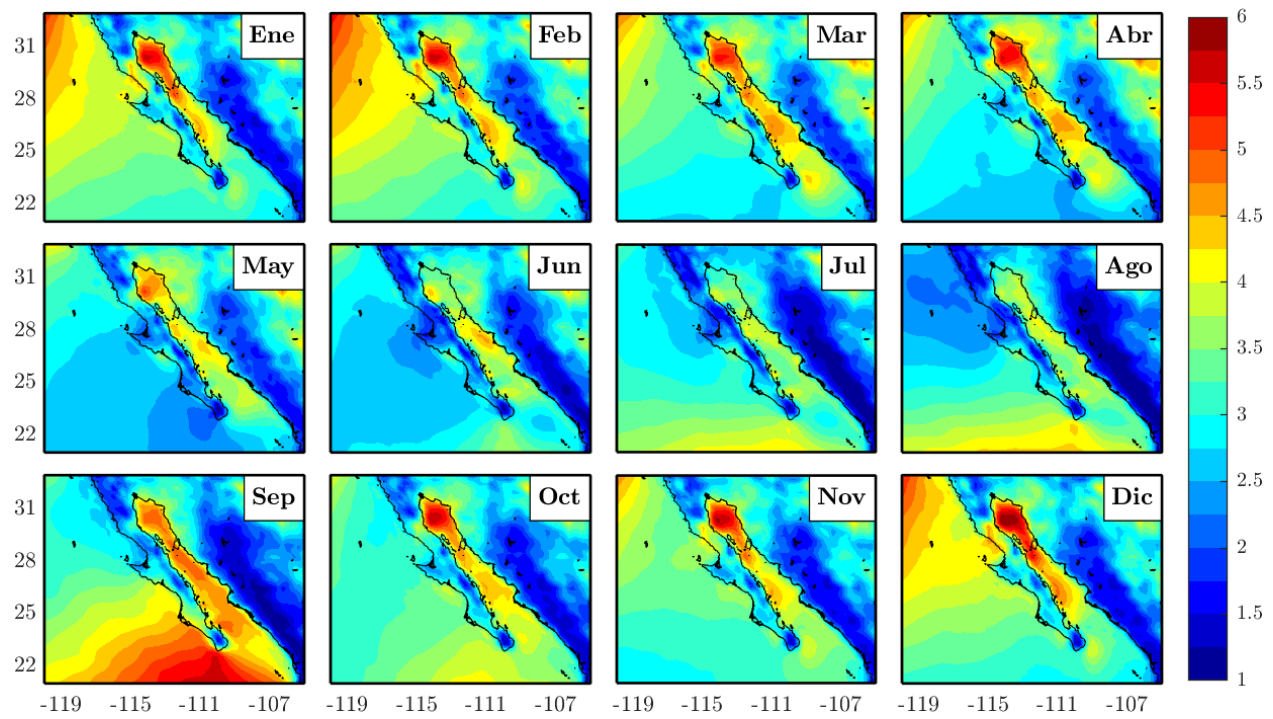


Figura 16. Raíz Cuadrática Media mensual para el periodo de estudio 1999 a 2016 de los datos de ERA5.

5.4.3. Ajuste anual del área de estudio

La amplitud anual de la componente u fue menor que la de la componente v en la mayoría de las regiones del GC. Como se muestra en la Tabla 7, en las regiones de San Felipe, Empalme y Cabo Pulmo la amplitud anual de u es parecida o mayor a la de v . Asimismo, como se observó en las series de tiempo de v , la componente v presenta una señal anual marcada (mayor varianza explicada) en la mayoría del GC, mientras que no la presenta en el Pacífico. Esto es debido a que el viento es predominante mente hacia el sureste en el Pacífico mientras que en el GC se invierte en los meses de junio a agosto. Por otra parte la componente u presenta una mayor señal en el Pacífico respecto a v , pero menor en la mayoría del GC. La fase anual de ambas componentes corresponde a los observado de las series de tiempo de u y v de las Figuras 12, 13 y 14. La fase de u indica que el máximo (viento hacia el este) sucede en los meses de enero y febrero en el GC y en mayo en la mayoría del Pacífico. Por su lado la fase de v indica que el mínimo (viento hacia el sur) sucede al mismo tiempo que u en el GC mientras que en el Pacífico sucede de febrero a junio. La mayor rapidez del viento en el Pacífico sucede de febrero a junio, y en el GC de diciembre a enero.

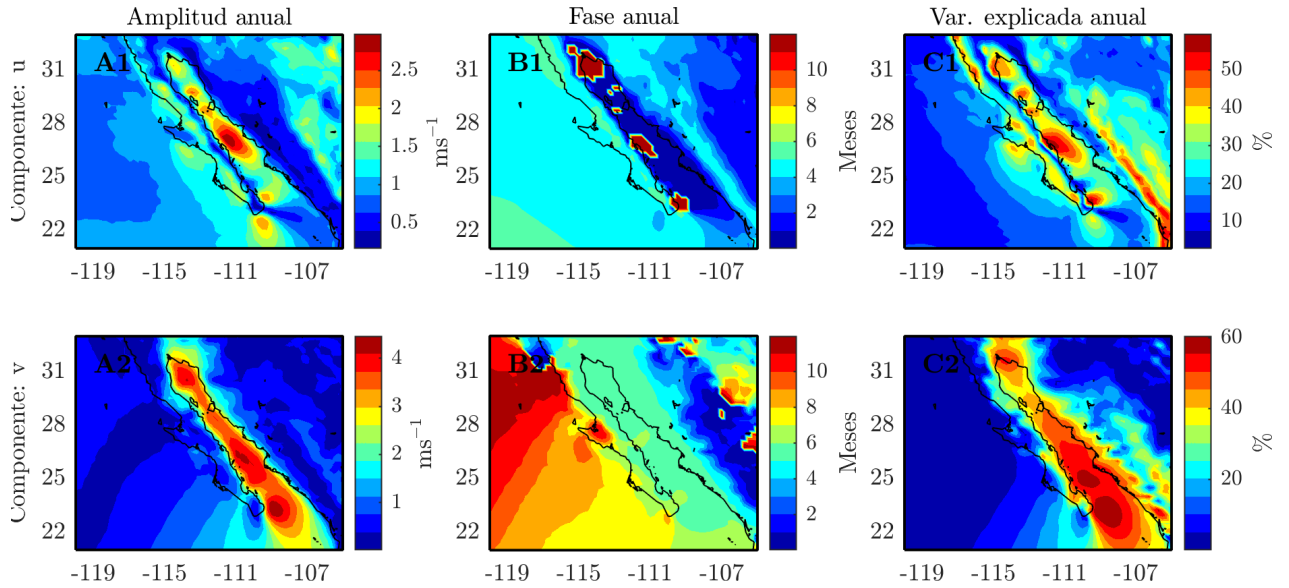


Figura 17. Ajuste armónico anual de la componente u (A1, B1, C1) y componente v (A2, B2, C2) para la zona de estudio.

6. Conclusión

En este estudio se realizaron distintos análisis para evaluar cual de las bases de datos de los reanálisis CCMP2, ERA5 y MERRA2 tiene mayor precisión para representar el régimen del viento en el golfo de California y Pacífico Subtropical Mexicano. Para esto se utilizaron diversas comparaciones con mediciones de estaciones costeras.

Respecto a los parámetros estadísticos que se emplearon, las principales conclusiones son:

- ERA5 es el que exhibió los mejores resultados en representar la variabilidad temporal del viento mostrando las mayores correlaciones en la rapidez y menores RECM y DEE en rapidez y dirección.
- Por otro lado, MERRA2 es el que mostró el mejor resultado en representar el estado medio de la rapidez del viento al presentar el menor sesgo. Esto también se concluyó del análisis de las distribuciones de Weibull, donde MERRA2 presentó los menores errores en la estimación de la rapidez más probable (U_{prob}) y en los parámetros α y β .
- En general se observó una sobrestimación de la rapidez del viento en la mayoría de las estaciones, excepto en Empalme.
- Todas las bases de datos presentan diferencias en la estimación de velocidades del viento menores a 1 ms^{-1} y mayores a 5 ms^{-1} , excepto en Isla Guadalupe, donde las diferencias se presentan en velocidades menores a 5 ms^{-1} y mayores a 10 ms^{-1} .
- Respecto a la dirección del viento, ERA5 fue el que mostró los mejores valores estadísticos excepto en la correlación de la dirección. Se concluyó que esto fue debido a que en las estaciones de Cabo Pulmo y Empalme la componente u de ERA5 muestra un sesgo significativamente grande para afectar en la estación de la dirección.
- El efecto de mecanismos de interacción costera tierra-mar (brisas) y otros eventos de frecuencia de un día son una fuente de error en la estimación de todos los reanálisis.

Respecto a la variabilidad estacional, se concluyó que:

- La rapidez y dirección del viento presenta una señal anual marcada tanto en el GC como en el Pacífico aunque de forma no sincronizada.
- Las mayores velocidades del viento en el Pacífico suceden durante los meses de abril y mayo (~ 6 a 8 ms^{-1}) mientras que en el GC suceden en diciembre y enero (~ 5 a 7 ms^{-1}).
- La dirección del viento se mantiene predominante hacia el sureste en el Pacífico, mientras que en el GC es hacia el sureste durante los meses de octubre a abril y se invierte hacia el noroeste en los meses de junio a agosto.
- La región del alto GC es la más variable de la zona de estudio durante todo el año ya que presenta los mayores valores de la RCM.
- La señal anual de la componente v es más marcada en el GC que en el Pacífico al presentar mayores varianzas explicadas. En cambio, la señal anual de la componente u es equiparable en ambas regiones.

7. Bibliografía

- Atlas, R., Hoffman, R. N., Bloom, S. C., Jusem, J. C. & Ardizzone, J. (1996). A Multiyear Global Surface Wind Velocity Dataset Using SSM/I Wind Observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(5), 869-882. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0869:AMGSWV>2.0.CO;2
- Atlas, R., Hoffman, R. N., Ardizzone, J., Leidner, S. M., Jusem, J. C., Smith, D. K. & Gombos, D. (2011). A Cross-calibrated, Multiplatform Ocean Surface Wind Velocity Product for Meteorological and Oceanographic Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(2), 157-174. doi:10.1175/2010BAMS2946.1
- Badan, A. (2003). The Atmosphere Over the Gulf of California. *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*, 205-212. doi:10.1007/978-94-010-0074-1_12
- Badan-Dangon, A., Dorman, C. E., Merrifield, M. A. & Winant, C. D. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 96(C9).
- Berens, P. (2009). CircStat : A MATLAB Toolbox for Circular Statistics. *Journal of Statistical Software*, 31(10), 128-129. doi:10.18637/jss.v031.i10
- Bordoni, S., Ciesielski, P. E., Johnson, R. H., McNoldy, B. D. & Stevens, B. (2004). The low-level circulation of the North American Monsoon as revealed by QuikSCAT. *Geophysical Research Letters*, 31(10), 2-5. doi:10.1029/2004GL020009
- C3S, C. C. C. S. (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Recuperado desde <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp%7B%5C#%7D!/home>
- Carrillo, C., Cidrás, J., Díaz-Dorado, E. & Obando-Montaño, A. (2014). An Approach to Determine the Weibull Parameters for Wind Energy Analysis: The Case of Galicia (Spain). *Energies*, 7(4), 2676-2700. doi:10.3390/en7042676
- Carvalho, D., Rocha, A. & Gómez-Gesteira, M. (2012). Ocean surface wind simulation forced by different reanalyses: Comparison with observed data along the Iberian Peninsula coast. *Ocean Modelling*, 56, 31-42. doi:10.1016/j.ocemod.2012.08.002
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., Alvarez, I. & Silva Santos, C. (2013). Comparison between CCMP, QuikSCAT and buoy winds along the Iberian Peninsula coast. *Remote Sensing of Environment*, 137, 173-183. doi:10.1016/j.rse.2013.06.005
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. & Silva Santos, C. (2014). WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal. *Applied Energy*, 117, 116-126. doi:10.1016/j.apenergy.2013.12.001
- Castro, R. & Martínez, A. (2010). Variabilidad espacial y temporal del campo de viento frente a la península de Baja California. En R. Durazo & G. Gaxiola (Eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007: Diez Años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. (p. 497). Instituto Nacional de Ecología, CICESE, México.

- ECMWF. (2019a). ERA5 data documentation. Recuperado desde <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+data+documentation>
- ECMWF. (2019b). IFS documentation. Recuperado desde <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model/ifs-documentation>
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., . . . 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
- Hoffman, R. N., Leidner, S. M., Henderson, J. M., Atlas, R., Ardizzone, J. V. & Bloom, S. C. (2003). A two-dimensional variational analysis method for NSCAT ambiguity removal: Methodology, sensitivity, and tuning. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(5), 585-605. doi:10.1175/1520-0426(2003)20<585:ATDVAM>2.0.CO;2
- Kennedy, A. D., Dong, X., Xi, B., Xie, S., Zhang, Y. & Chen, J. (2011). A comparison of MERRA and NARR Reanalyses with the DOE ARM SGP data. *Journal of Climate*, 24(17), 4541-4557. doi:10.1175/2011JCLI3978.1
- Kleist, D. T., Parrish, D. F., Derber, J. C., Treadon, R., Wu, W.-S. & Lord, S. (2009). Introduction of the GSI into the NCEP Global Data Assimilation System. *Weather and Forecasting*, 24(6), 1691-1705. doi:10.1175/2009waf2222201.1
- Kubik, M. L., Brayshaw, D. J., Coker, P. J. & Barlow, J. F. (2013). Exploring the role of reanalysis data in simulating regional wind generation variability over Northern Ireland. *Renewable Energy*, 57, 558-561. doi:10.1016/j.renene.2013.02.012
- Lange, M. (2005). On the Uncertainty of Wind Power Predictions—Analysis of the Forecast Accuracy and Statistical Distribution of Errors. *Journal of Solar Energy Engineering*, 127(2), 177. doi:10.1115/1.1862266
- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M. & Bacmeister, J. (2015). Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: Evolution from MERRA to MERRA2. *Geoscientific Model Development*, 8(5), 1339-1356. doi:10.5194/gmd-8-1339-2015
- Olauson, J. (2018). ERA5: The new champion of wind power modelling? *Renewable Energy*, 126, 322-331. doi:10.1016/j.renene.2018.03.056
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., . . . Woollen, J. (2011). MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate*, 24(14), 3624-3648. doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1
- Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J. & Raga, G. B. (2007). Midsummer gap winds and low-level circulation over the eastern tropical Pacific. *Journal of Climate*, 20(15), 3768-3784. doi:10.1175/JCLI4220.1
- Rüfenacht, R., Baumgarten, G., Hildebrand, J., Schranz, F., Matthias, V., Stober, G., . . . Kämpfer, N. (2018). Intercomparison of middle-atmospheric wind in observations and models. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(4), 1971-1987. doi:10.5194/amt-11-1971-2018

- Seguro, J. V. & Lambert, T. W. (2000). Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1), 75-84. doi:10.1016/S0167-6105(99)00122-1
- Sharp, E., Dodds, P., Barrett, M. & Spataru, C. (2015). Evaluating the accuracy of CFSR reanalysis hourly wind speed forecasts for the UK, using in situ measurements and geographical information. *Renewable Energy*, 77, 527-538. doi:10.1016/j.renene.2014.12.025
- Staffell, I. & Pfenninger, S. (2016). Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *Energy*, 114, 1224-1239. doi:10.1016/j.energy.2016.08.068
- Strub, P. & James, C. (2002). Altimeter-derived surface circulation in the large-scale NE Pacific Gyres. *Progress in Oceanography*, 53(2-4), 185-214. doi:10.1016/s0079-6611(02)00030-7
- Thébault, E., Finlay, C. C., Beggan, C. D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., . . . Zvereva, T. (2015). International geomagnetic reference field: The 12th generation international geomagnetic reference field - The twelfth generation. *Earth, Planets and Space*, 67(1). doi:10.1186/s40623-015-0228-9
- Thomson, R. E. & Emery, W. J. (2014). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography (Third Edition)*. Elsevier. doi:10.1016/C2010-0-66362-0
- Turrent, C. & Cavazos, T. (2009). Role of the land-sea thermal contrast in the interannual modulation of the North American Monsoon. *Geophysical Research Letters*, 36(2), 1-5. doi:10.1029/2008GL036299
- Wentz, F., Scott, J., Hoffman, R., Leidner, M., Atlas, R. & Ardizzone, J. (2015). Remote Sensing Systems Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) 6-hourly ocean vector wind analysis product on 0.25 deg grid, Version 2.0. Recuperado desde www.remss.com/measurements/ccmp
- Wu, W.-S., Purser, R. J. & Parrish, D. F. (2002). Three-Dimensional Variational Analysis with Spatially Inhomogeneous Covariances. *Monthly Weather Review*, 130(12), 2905-2916. doi:10.1175/1520-0493(2002)130<2905:tdvaws>2.0.co;2
- Zheng, C. W. & Li, C. Y. (2015). Variation of the wave energy and significant wave height in the China Sea and adjacent waters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 381-387. doi:10.1016/j.rser.2014.11.001