

Análisis de la precisión de los datos de viento obtenidos del satélite QuikSCAT y el modelo WRF en la costa gallega

M. C. SOUSA^{1*}, I. ALVAREZ², N. VAZ¹, M. GÓMEZ-GESTEIRA² y J. M. DIAS¹

* *mcsousa@ua.pt*

¹*CESAM, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal.*

²*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Facultade de Ciencias, Universidade de Vigo, Campus As Lagoas s/n, Ourense, España.*

RESUMEN

Se ha llevado a cabo un análisis comparativo entre los vientos de superficie obtenidos a partir de QuikSCAT, el modelo WRF y observaciones *in situ* de las boyas a lo largo de la costa gallega entre noviembre de 2008 y octubre de 2009. En esta comparación se ha evaluado la exactitud de los datos satelitales y de modelado. Los resultados muestran que las velocidades del viento derivadas de QuikSCAT y el modelo WRF son similares a lo largo de la costa, con errores que van desde 1.5 m s^{-1} a 2 m s^{-1} . Sin embargo, QuikSCAT tiende a sobreestimar las velocidades del viento cuando se compara con las mediciones de boyas. En cuanto a la dirección del viento, el error es alrededor de 35° para las estaciones analizadas. El bias presenta un patrón similar entre los datos de satélite y modelado, con valores positivos en la costa occidental y valores negativos en las costas centrales y del norte. Los datos de los satélites son siempre inferiores en valor absoluto a los datos del modelo. También se ha realizado una comparación espacial entre QuikSCAT y datos WRF en todo el litoral gallego para evaluar las diferencias entre los dos conjuntos de datos. Esta comparación muestra que las velocidades de los vientos modelados tienden a ser menores que los vientos de satélite en todo el dominio, con los mayores errores tanto para la velocidad como la dirección del viento observadas cerca de la costa.

Palabras Clave: Satélite QuikSCAT, modelo WRF, boyas, costa gallega, Península Ibérica.

1. Introducción

Los vientos de superficie sobre el océano y cerca de las costas tienen un gran impacto en muchas actividades económicas, incluidas las rutas de navegación, la gestión costera y la pesca. Por ejemplo, en la ausencia de fuertes flujos ambientales, la difusión de las plumas y las características oceanográficas locales de relevancia ecológica, como el afloramiento, dependen en gran medida del efecto del

viento. Por lo tanto, en las zonas costeras, el estudio de los fenómenos inducidos por el viento se vuelve extremadamente importante. Además de su interés e importancia meteorológica, los vientos en superficie juegan un papel clave en los estudios numéricos, siendo un importante mecanismo de forzamiento de la circulación de los modelos oceánicos costeros. Esto implica que los errores en la determinación del viento superficial van a cambiar el modelo de forzamiento y

consecuentemente modificar la salida de los modelos de circulación oceánica.

Por lo tanto, es fundamental disponer de valores de la velocidad y dirección de los vientos exactos. Los datos disponibles para los estudios de observación sobre las regiones oceánicas se han obtenido siempre a través de mediciones *in situ* utilizando las boyas oceanográficas, satélites de alta resolución y modelos atmosféricos. Los datos proporcionados por las boyas son observaciones del viento en un solo punto, mientras que los datos de satélite y de modelos proporcionan mediciones del campo de viento en la superficie con diferentes escalas espaciales y temporales, que contienen más información que la de las boyas. Sin embargo, también debe tenerse en cuenta que las mediciones por satélite no están disponibles cerca de la costa, lo que limita sus aplicaciones en esas áreas. Por otro lado, los datos modelados también pueden ser menos fiables cerca de la costa debido a la discretización en relación con la complejidad de la topografía.

La costa gallega se puede dividir en tres regiones (Figura 1): la costa occidental, que se extiende desde la parte norte de Portugal hasta el Cabo Finisterre, la costa central, desde el Cabo Finisterre a Cabo Ortegal, y la costa norte, al este de Cabo Ortegal. Hay dos regímenes de viento típicos en la costa gallega: otoño-invierno, dominado por el viento de sur-suroeste y primavera-verano, con vientos de norte-noreste. Sin embargo, los patrones de verano pueden llegar a dominar en invierno y viceversa (Torres *et al.*, 2003; Gómez-Gesteira *et al.*, 2006; Alvarez *et al.*, 2008). De este modo, los eventos de afloramiento se producen principalmente durante la primavera-verano a lo largo de la costa de Galicia (Fraga, 1981; Bode *et al.*, 2002; Alvarez *et al.*, 2008; Alvarez *et al.*, 2010) si bien estos fenómenos también pueden ser observados en

otoño-invierno (Alvarez *et al.*, 2003; deCastro *et al.*, 2006; 2008; Prego *et al.*, 2007; Alvarez *et al.*, 2009).

Se han llevado a cabo varios estudios en términos de los patrones de viento a lo largo de la costa gallega (Torres *et al.*, 2003; Alvarez *et al.*, 2005; Gómez-Gesteira *et al.*, 2006; Alvarez *et al.*, 2008; Ospina-Alvarez *et al.*, 2010; Alvarez *et al.*, 2011). De acuerdo con estos estudios, el campo de viento a lo largo de esta costa está lejos de ser homogéneo, debido a la peculiar topografía costera y a la orientación, que modula la dirección e intensidad del viento. De esta manera, el análisis del régimen de viento a lo largo de esta costa constituye una tarea importante, aunque la falta de mediciones de viento reales (por ejemplo, boyas y estaciones meteorológicas) obtenidas de forma simultánea y durante largos períodos de tiempo, hace que el análisis de los patrones de viento sea complicado. Para superar esta dificultad, los datos proporcionados por satélites y modelos atmosféricos se pueden utilizar para estudiar el régimen del viento sobre las áreas costeras.

Durante los últimos años, varios estudios han sido publicados con el análisis estadístico completo de los datos del satélite QuikSCAT en comparación con las boyas y los resultados de modelos para todos los océanos, como por ejemplo: la costa oeste de los EEUU (Pickett *et al.*, 2003; Chelton y Freilich, 2005), la costa noroeste de los EEUU (Tang *et al.*, 2004), el océano Índico (Satheesan *et al.*, 2007) y el mar Mediterráneo (Acaddia *et al.*, 2007; Betamy *et al.*, 2007; Ruti *et al.*, 2008; Pensieri *et al.*, 2010). La costa gallega también ha sido analizada por medio de estudios similares: Alvarez *et al.* (2006) llevaron a cabo una comparación entre los datos de viento proporcionados por un modelo atmosférico regional y QuikSCAT de 2001 a 2005. Ambos

conjuntos de datos mostraron una correlación alta a pesar de que QuikSCAT presentó una intensidad del viento ligeramente mayor (alrededor del 15%) que el modelo. Alvarez et al. (2008) realizaron una comparación de los datos de viento obtenidos de QuikSCAT y de las boyas oceanográficas situadas alrededor de la costa gallega desde 1999 hasta 2005. Los resultados mostraron que la amplitud de los datos de viento de las boyas fue ligeramente menor que la correspondiente a QuikSCAT. Penabad et al. (2008) también llevaron a cabo un análisis estadístico para comparar las mediciones de viento obtenidas por QuikSCAT y las previsiones de viento a partir de dos diferentes modelos numéricos en el NO de la Península Ibérica (2002-2005). Esta comparación no reveló diferencias significativas entre los modelos y los datos de satélite obteniendo errores similares para ambos conjuntos de datos. Otero y Ruiz-Villarreal (2008) evaluaron la fiabilidad de diferentes modelos meteorológicos a través de la comparación con vientos observados en todo el noroeste y el norte de la Península Ibérica durante el otoño de 2002 encontrando diferencias significativas.

De todos estos trabajos publicados anteriormente, se puede comprobar que QuikSCAT es una herramienta útil para estudiar los fenómenos inducidos por el viento en el océano abierto y cerca de la costa de Galicia. Sin embargo, es necesario tener en cuenta la existencia de una pequeña máscara (aprox. 25 km) cerca de la costa donde los datos no están disponibles. De hecho, se ha comprobado que los datos de viento de QuikSCAT tienden a ser más precisos en el océano que cerca de la costa (Pickett et al., 2003; Tang et al., 2004). Esta falta de mediciones de viento de satélite cerca de la costa se puede solucionar mediante el uso de modelos numéricos. Dado que las condiciones de

viento en la costa de Galicia son muy variables debido al cambio de orientación de la costa y la compleja topografía causada por la presencia de las Rías, es fundamental evaluar con precisión los patrones de viento mediante la comparación de observaciones realizadas al mismo tiempo a través de métodos diferentes. Los trabajos que se han descrito anteriormente consisten en una primera aproximación en el análisis de los errores de satélite y de diferentes modelos basados en comparaciones de correlación.

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un estudio más detallado de estos aspectos, en relación con la velocidad y la dirección del viento. Así, se evaluará la calidad de los datos proporcionados por el satélite QuikSCAT, las predicciones del modelo WRF y los vientos medidos *in situ* a lo largo de la costa gallega. En base a la anterior descripción de la costa según la orientación, se analizarán las tres zonas costeras: costa occidental, intermedia y norte. Se llevará a cabo un análisis detallado teniendo en cuenta diferentes límites para la velocidad del viento y también los cuatro sectores principales de la dirección. Además, también se considerará una comparación espacial entre los datos de QuikSCAT y WRF para todo el litoral gallego intentando determinar las diferencias entre ambos conjuntos de datos. Esta comparación evaluará la calidad de datos de viento cerca de la costa, y su aplicabilidad para el estudio de fenómenos costeros inducidos por el viento.

2. Datos y procedimiento

Los campos de viento superficial proporcionados por el satélite QuikSCAT están disponibles entre julio de 1999 y noviembre de 2009 (<http://podaac.jpl.nasa.gov/quikscat/qsc>

at_data.html). Este conjunto de datos está formado por los valores de las componentes meridional y zonal del viento, medidas dos veces al día en una celda de aproximadamente $0.25 \times 0.25^\circ$ para una malla de cobertura global. Los datos se dan en una pasada ascendente (6 AM) y descendente (6 PM) con una bandera de lluvia. Los valores de la intensidad del viento varían de 3 a 20 m s^{-1} , con una precisión de 2 m s^{-1} y 20° en la dirección. La altura de referencia de los datos es de 10 m. Además, es necesario tener en cuenta que los datos de viento cerca de la costa ($\sim 25 \text{ km}$) no están disponibles debido a la existencia de una máscara de tierra. Teniendo en cuenta los resultados de algunos trabajos previos, se encontró que la exactitud de los datos de viento de QuikSCAT es muy baja cuando las observaciones se toman bajo condiciones de lluvia. Esto se debe a que la dispersión de las gotas de lluvia es mayor que la dispersión producida por la acción del viento sobre la superficie del mar (Portabella y Stoffelen, 2001). Así, los datos marcados con una bandera de lluvia fueron descartadas para llevar a cabo el estudio.

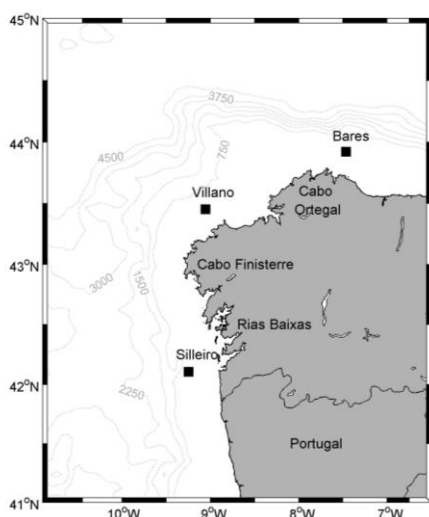


Fig. 1. Mapa y batimetría (m) de la costa gallega. Los cuadrados negros corresponden a la ubicación de las boyas oceanográficas.

También se consideraron los datos de viento superficial cerca de la costa gallega proporcionados por la Agencia Meteorológica Regional (www.meteogalicia.es) teniendo en cuenta los datos obtenidos del modelo WRF (<http://www.wrf-model.org>). Las condiciones iniciales y de contorno utilizadas por el WRF se obtienen de las previsiones realizadas previamente por el sistema de previsión global (GFS) con 0.5° de resolución horizontal. El modelo WRF funciona todos los días para ofrecer las previsiones meteorológicas con un horizonte de 72 h en una configuración con una malla de resolución horizontal de $4 \times 4 \text{ km}$ centrada en Galicia. Los valores obtenidos a partir del modelo se registran cada hora. Sólo se consideraron las medidas correspondientes a las 6 am y 6 pm para efectos de comparación. En este estudio se utilizan los datos obtenidos de la primera capa vertical, calculados a 10 m sobre la superficie del mar. Una descripción más detallada del modelo se puede encontrar en Skamarock et al. (2005).

Los datos de viento considerados fueron medidos en tres boyas oceanográficas localizadas cerca de la plataforma continental de Galicia. Estas boyas, gestionadas por Puertos del Estado, son: Silleiro ($42^\circ 7.2' \text{ N}$, $9^\circ 24' \text{ W}$ a 44 km de tierra), Villano ($43^\circ 29.4' \text{ N}$, $9^\circ 12.6' \text{ W}$ a 30 km de tierra) y Bares ($44^\circ 3.6' \text{ N}$, $7^\circ 37.2' \text{ W}$ a 38 km de la tierra) (Figura 1, cuadrados negros). Miden y almacenan datos de viento con una periodicidad horaria a 3 m de altura. En realidad, las muestras de viento se obtienen de un promedio de datos medidos durante aproximadamente 10 minutos cada hora. Todos los conjuntos de datos abarcan el período noviembre de 2008 a octubre de 2009 (el último año de los datos disponibles de QuikSCAT), excepto los datos de viento proporcionados por las boyas, que no

contienen datos continuos para este período.

Para comparar los datos, los valores de velocidad del viento proporcionados por las boyas oceanográficas se ajustaron a una altura de 10 m suponiendo estabilidad neutral y un perfil de viento logarítmico (Large y Pond, 1981; Johnson, 1999). Este método (Ruti *et al.*, 2008) fue considerado debido a la que los datos de la presión atmosférica, humedad relativa del aire y de temperatura superficial del mar no estaban disponibles. Para comparar temporalmente los vectores de viento de todas las bases de datos, se consideraron las mediciones de los vientos de las boyas correspondientes a 6 am y 6 pm. La comparación espacial entre las bases de datos se llevó a cabo teniendo en cuenta el punto de la cuadrícula QuikSCAT/WRF más cercana a la ubicación de cada boya.

Después de descartar los valores de viento medidos bajo condiciones de lluvia de QuikSCAT y teniendo en cuenta la falta de observaciones en las diferentes bases de datos, el análisis se llevó a cabo considerando el 45% (326 muestras válidas), el 40% (290 muestras válidas) y el 53% (388 muestras válidas) de los datos totales de las boyas de Silleiro, Villano y Bares, respectivamente.

Con el fin de evaluar la calidad de las diferentes bases de datos de viento, se llevó a cabo un análisis estadístico para la velocidad y dirección del viento por medio del coeficiente de correlación ($r_{D,B}$), el error cuadrático medio ($RMSE$) y bias:

$$r_{D,B} = \frac{\text{cov}(D, B)}{\sigma_D \sigma_B} \quad (1)$$

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - B_i)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - B_i) \quad (3)$$

donde D corresponde a los datos de viento QuikSCAT/WRF y B corresponde a las boyas.

También se calcularon las diferencias entre la dirección del viento QuikSCAT-boya y WRF-boya. Para reducir la discontinuidad entre 0° y 360°, la dirección del viento de QuikSCAT y del modelo fue modificada usando la metodología propuesta por Pensieri *et al.* (2010).

3. Resultados y discusión

3.1. Comparación con las observaciones *in situ*

Para caracterizar el régimen de vientos en el área de estudio se representaron las rosas de los vientos medidos en las boyas oceanográficas (Figura 2). Las barras indican la dirección hacia la que sopla el viento.

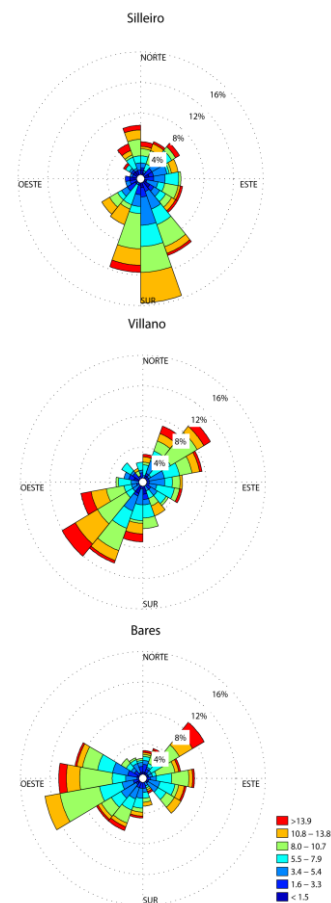


Fig. 2. Rosas de los vientos ($m s^{-1}$), calculadas en las tres boyas oceanográficas durante noviembre 2008-octubre 2009. Las barras indican la dirección hacia la que sopla el viento.

En la costa occidental (Silleiro) se observó la prevalencia de viento hacia el sur, cuya amplitud tiende a superar los 10 ms^{-1} . También se observaron vientos hacia el norte aunque con una menor probabilidad. La costa intermedia (Villano) se caracterizó por el predominio de fuertes vientos hacia el suroeste, cuya amplitud tiende a superar los 8 ms^{-1} . También ocurren vientos hacia el noreste, aunque su intensidad es mucho menor. Por último, en la costa norte (Bares) se encontraron principalmente dos patrones de viento, hacia el oeste y hacia el este, ambos con amplitudes y probabilidades similares, cuya amplitud tiende a superar también los 8 ms^{-1} .

Estos resultados muestran que los vientos costeros tienden a alinearse con la orientación de la costa (Gómez-Gesteira *et al.*, 2006; Alvarez *et al.*, 2008; Alvarez *et al.*, 2011). Además, estos patrones de viento indican condiciones favorables al afloramiento durante la mayor parte del período objeto de estudio. Esta situación es especialmente notable en la costa occidental (Silleiro) que se caracteriza por el predominio de fuertes vientos del norte (favorable al afloramiento), lo que indica que estas condiciones también puede ocurrir durante el otoño-invierno (Alvarez *et al.*, 2003; deCastro *et al.*, 2006; Prego *et al.*, 2007; deCastro *et al.*, 2008; Varela *et al.*, 2008; 2010; Alvarez *et al.*, 2009). La ocurrencia de eventos de afloramiento durante estas estaciones puede tener implicaciones en la biogeoquímica y los patrones de fitoplancton (Borja *et al.*, 1996; Santos *et al.*, 2004; Prego *et al.*, 2007). Estas circunstancias indican que la caracterización del régimen de vientos durante periodos como el analizado en el presente estudio es fundamental para esclarecer la ocurrencia de estos fenómenos y, en consecuencia, para determinar su posible impacto sobre los ecosistemas costeros.

Para comparar las tres bases de datos, la velocidad y dirección del viento se ana-

lizaron por separado. Los datos de velocidad de viento de QuikSCAT, WRF y las boyas se ajustaron a una distribución de Weibull con el fin de caracterizar la variabilidad entre los diferentes conjuntos de datos y calcular la probabilidad de encontrar una velocidad de viento determinada en cada estación costera (Figura 3).

La distribución de Weibull proporciona un ajuste aproximado a la distribución de velocidad del viento observado (Sánchez *et al.*, 2007; Otero y Ruiz-Villarreal, 2008).

Los vientos moderados son muy comunes a lo largo de la costa, a pesar de que se pueden observar algunas diferencias dependiendo de la zona costera. En la boya de Villano (costa central) se observa un patrón similar entre QuikSCAT, WRF y las medidas del viento *in situ*, mostrando casi el mismo comportamiento. En la boya Silleiro (costa occidental) QuikSCAT y WRF tienden a subestimar (sobrestimar) la ocurrencia de vientos menores (mayor) de $5\text{-}6 \text{ m s}^{-1}$. En la boya de Bares (costa norte) la distribución de los datos de QuikSCAT y WRF es diferente a la de los datos de la boya, lo que indica una menor precisión de las bases de datos en esta zona costera.

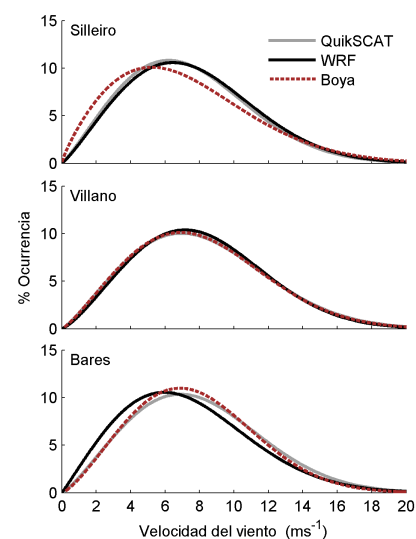


Fig. 3. Ocurrencia de la velocidad del viento en las tres estaciones ajustadas a una distribución de Weibull durante el período noviembre 2008-octubre 2009.

Estación		κ	λ (m s ⁻¹)	W_m (m s ⁻¹)
Silleiro	Boya	1.9	7.9	5.4
	WRF	1.9	8.2	5.6
	QuikSCAT	2.1	8.4	6.2
Villano	Boya	2.1	8.6	6.4
	WRF	2.0	8.6	6.2
	QuikSCAT	2.2	9.1	6.9
Bares	Boya	2.3	8.4	6.5
	WRF	2.0	8.1	5.7
	QuikSCAT	2.2	9.0	6.9

TABLA 1. Parámetro de forma (κ), parámetro de escala (λ) y la velocidad del viento que ocurre más frecuentemente (W_m) correspondientes a las distribuciones de Weibull que se muestran en la Figura 2.

La Tabla 1 muestra el parámetro de forma de Weibull (κ), que se refiere a la anchura de la distribución, y el parámetro de escala (λ) que está relacionado con la velocidad media del viento. La velocidad del viento que ocurre más frecuentemente (W_m) también se ha considerado. El parámetro de forma presenta valores alrededor de 2 en las tres estaciones, independientemente de la base de datos. El valor máximo del factor de escala se obtiene para los datos de QuikSCAT en las tres estaciones (entre 8.4-9.1 m s⁻¹). Además, el parámetro de escala que corresponde al modelo y a las boyas muestra una magnitud similar en las tres estaciones indicando que las predicciones del modelo WRF presentan mejores resultados que las mediciones por satélite. La velocidad del viento más común oscila entre aproximadamente 5 y 7 m s⁻¹ para las diferentes bases de datos mostrando que los vientos moderados son muy comunes.

El valor más alto de W_m también se observa para los datos de QuikSCAT en las tres estaciones (entre 6.2-6.9 m s⁻¹).

Los valores de la costa occidental y central obtenidos del modelo y de las boyas muestran un valor similar. Sin embargo, en la costa norte, los datos de QuikSCAT presentan un valor de W_m más próximo a las mediciones de las boyas, lo que muestra una mayor precisión del satélite para medir estos vientos.

Un análisis más detallado puede llevarse a cabo teniendo en cuenta diferentes límites de la velocidad del viento. Estos límites se han definido considerando la escala de Beaufort: el primero incluye calmas y brisas (0-3.3 m s⁻¹), el segundo corresponde a valores entre la brisa suave y fresca (3.4-10.7 m s⁻¹) y el último considera valores superiores a vientos fuertes (> 10.8 m s⁻¹).

La Tabla 2 muestra el RMSE y el bias calculado para estos intervalos. Q representa QuikSCAT y W WRF. Los distintos límites de velocidad del viento se clasifican de acuerdo a los valores medidos por la boya. El bias se calcula a partir de la diferencia entre los valores de QuikSCAT/WRF y los valores de las boyas. Por lo tanto, un bias positivo en

	Silleiro				Villano				Bares			
	RMSE	RMSE	Bias	Bias	RMSE	RMSE	Bias	Bias	RMSE	RMSE	Bias	Bias
	Q	W	Q	W	Q	W	Q	W	Q	W	Q	W
<3.3	1.6	2.2	1.2	1.3	2.3	2.5	1.6	1.3	1.5	1.8	0.9	0.6
3.4-10.7	1.3	1.9	0.2	0.1	1.3	1.8	0.3	-0.1	1.4	1.9	0.3	-0.5
>10.8	1.6	2.0	0.4	0.2	2.0	2.2	0.4	-0.2	1.6	1.9	0.9	0.1
Promedio	1.4	2.0	0.4	0.3	1.5	2.0	0.4	0.1	1.5	1.9	0.5	-0.3

TABLA 2. Estadísticas de la comparación entre QuikSCAT, WRF y boyas para la velocidad del viento en las tres estaciones. La última fila muestra una media ponderada calculada teniendo en cuenta todos los intervalos de velocidad del viento.

la velocidad del viento significa que QuikSCAT/WRF tiende a sobrestimar los vientos. El análisis por intervalos de velocidad muestra resultados similares de RMSE para QuikSCAT y WRF en las tres estaciones. La distribución del bias es menos consistente. Los valores de RMSE tienden a ser mayores para los vientos bajos ($<3.3 \text{ m s}^{-1}$) en los datos de satélite y modelado en las tres estaciones. Los vientos moderados muestran los menores errores también en las tres estaciones, tanto para QuikSCAT como para WRF. Nótese que estos vientos son los más comúnmente observados a lo largo de la costa (Figura 3) y por lo tanto, el mayor número de muestras se obtiene dentro de este intervalo.

El análisis estadístico también se llevó a cabo teniendo en cuenta todos los intervalos de velocidades (última fila) y se calculó una media ponderado en las tres estaciones. Así, algunos puntos de datos contribuyen más que otros en el promedio final. Al comparar los resultados de velocidad del viento para los tres puntos, los valores de RMSE obtenidos para el satélite (alrededor de 1.5 m s^{-1}) son siempre inferiores a los del modelo (aproximadamente 2 m s^{-1}). El bias muestra un comportamiento opuesto, con los valores absolutos más bajos correspondientes al modelo. Además, el bias es siempre positivo para QuikSCAT (aproximadamente 0.5 m s^{-1}), indicando que el satélite sobrestima la intensidad del viento en las tres estaciones. Para el modelo no hay un patrón claro para los valores obtenidos del bias. En la costa norte, los datos modelados tienden a ser inferiores a las observaciones *in situ*.

De acuerdo con los resultados previos obtenidos en el análisis de Weibull (Figura 3, Tabla 1), macroscópicamente en la costa occidental y central, los datos modelados tienden a presentar

mejores resultados que los datos obtenidos por el satélite. Sin embargo, desde del análisis estadístico (Tabla 2) los valores de RMSE obtenidos para los datos correspondientes al satélite son más bajos que los correspondientes a los datos modelados, mientras que la distribución de bias muestra los valores absolutos más bajos para el modelo.

La variabilidad de la dirección del viento fue analizada teniendo en cuenta las diferencias entre QuikSCAT/WRF y boyas. La Figura 4 muestra la dependencia de la dirección del viento WRF-boya (QuikSCAT-boya) de la velocidad del viento de la boya en la columna izquierda (columna derecha) para las tres estaciones.

Se puede observar un patrón común para WRF y QuikSCAT con la mayoría de los puntos repartidos entre -45° y 45° . Las mayores variaciones se observan para velocidades bajas ($<3 \text{ m s}^{-1}$). De hecho, las desviaciones estándar (barras) aumentan a bajas velocidades para las tres estaciones. Los vientos de más de 15 m s^{-1} no se incluyeron en los cálculos debido al bajo número de muestras, ya que su inclusión podría resultar en un mayor margen de error. Además, las altas velocidades de viento se suelen asociar a las condiciones climáticas adversas que pueden provocar oscilaciones en las boyas debido a las olas más altas (Large et al., 1995; Ebuchi et al., 2002) y por lo tanto, las mediciones de las boyas se vuelven menos fiables.

Para caracterizar mejor la variabilidad de la dirección del viento, se llevó a cabo un análisis detallado teniendo en cuenta los cuatro sectores principales de la dirección para calcular RMSE y bias de la dirección del viento en las tres estaciones (Tabla 3). Como en la Tabla 2, los sectores de dirección se clasifican de acuerdo con los valores medidos por la boya.

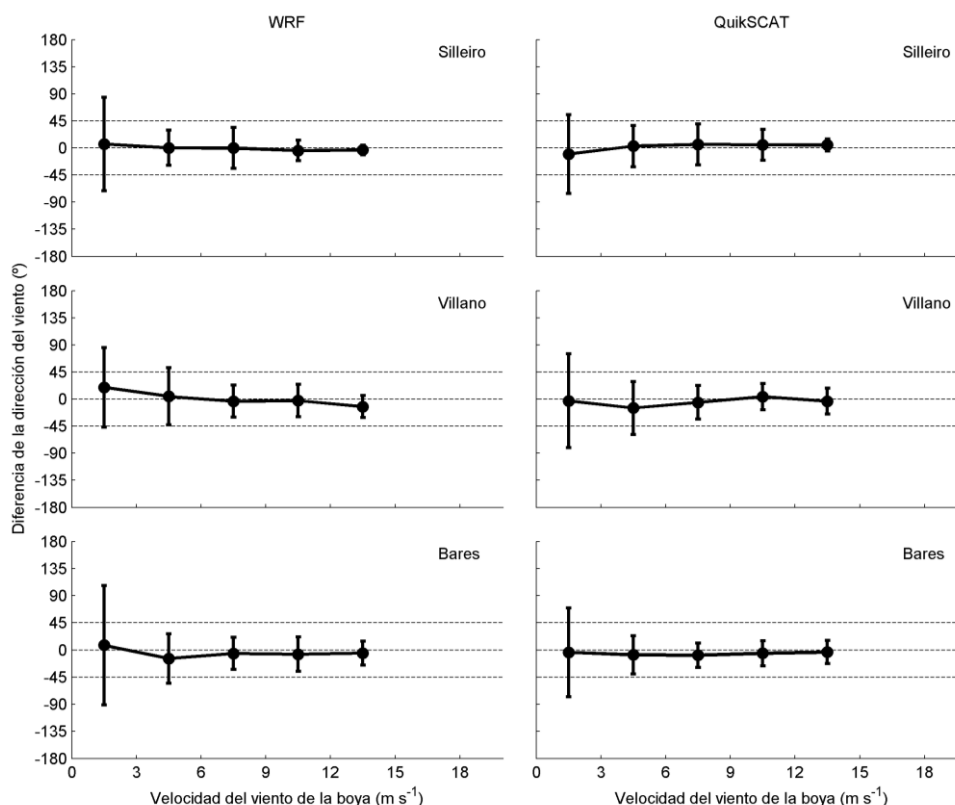


Fig. 4. Dependencias de las diferencias de la dirección del viento (WRF-boya y QuikSCAT-boya) con la velocidad del viento de la boya en las tres estaciones.

El bias se calcula como la diferencia entre los valores de QuikSCAT/WRF y los datos de las boyas. Por lo tanto, un bias positivo en la dirección del viento significa que QuikSCAT/WRF tiende a girar los vientos hacia la derecha. Comparando los resultados de la dirección del viento analizados por sectores en las tres estaciones, el RMSE es menor para los sectores más frecuentes (Figura 2), tanto para QuikSCAT como para WRF. Por lo tanto, en la costa oeste los valores más bajos de RMSE se obtienen para los vientos hacia el sur. En la costa central, los valores más bajos de RMSE corresponden a la dirección oeste y en la costa norte a las direcciones este y oeste. El RMSE más alto para el modelo en la costa oeste se obtiene, de los vientos hacia el oeste (65.5°), y en la costa norte, para vientos hacia el norte (65.9°). De acuerdo con la Figura 2, estos vientos son poco frecuentes y el

valor de RMSE puede ser debido al reducido número de muestras. Sin embargo, los valores obtenidos para el RMSE de QuikSCAT en los mismos sectores tienen valores considerablemente más bajos que podrían indicar una exactitud del modelo inferior cuando los vientos vienen de tierra debido a una discretización pobre de la malla del modelo debido a la complejidad de la topografía costera. Para la distribución de bias no hay un patrón claro para QuikSCAT y WRF ya que los valores dependen del sector que se considere y de la estación. Las medias ponderadas se utilizaron también para analizar los patrones generales (fila inferior). Los valores del RMSE obtenidos para el satélite y el modelo son similares en las tres estaciones (en torno a 35°). Para ambas bases de datos se obtiene un bias positivo en la costa occidental y un bias negativo en la costa intermedia y norte.

	Silleiro				Villano				Bares			
	RMSE Q	RMSE W	Bias Q	Bias W	RMSE Q	RMSE W	Bias Q	Bias W	RMSE Q	RMSE W	Bias Q	Bias W
N	55.7	46.3	15.7	7.4	39.9	39.4	8.6	8.0	49.9	65.9	4.7	5.4
E	41.3	33.0	4.4	-4.9	45.3	37.2	-12.2	-5.3	26.3	30.7	-5.4	-2.0
S	25.6	32.3	1.4	-4.0	38.3	42.9	-10.7	-5.4	37.2	51.9	-11.5	-19.8
O	49.7	65.5	-16.6	17.5	29.1	27.9	-1.3	4.0	28.6	36.0	-9.6	-7.0
Promedio	36.5	38.8	5.4	0.4	38.1	37.1	-5.6	-0.8	32.5	41.7	-7.0	-6.5

TABLA 3: Estadística de la comparación de la dirección del viento entre QuikSCAT/WRF y boyas en las tres estaciones. La última fila muestra una media ponderada calculada teniendo en cuenta todos los sectores.

En términos de valor absoluto para bias, los datos modelados presentan valores más bajos en las tres estaciones. Nótese que pueden ser dependientes de la distribución positiva/negativa de los valores analizados por sectores. Por lo tanto, QuikSCAT tiende a presentar valores continuos positivos/negativos en cada estación, mientras que la distribución de bias según el modelo es menos consistente, lo que indica que los valores de los diferentes sectores pueden ser compensados en el cálculo de la media.

3.2 Análisis espacial

Con respecto a los resultados anteriores, se encontró que el modelo WRF y los datos de QuikSCAT reproducen con precisión razonable los patrones de viento medidos por las boyas. En esta sección se analizan ambos conjuntos de datos en cada punto de la malla alrededor de la costa gallega para todo el período objeto de estudio teniendo en cuenta un promedio anual. El viento medio anual se calcula promediando los valores diarios proporcionados por QuikSCAT y WRF en cada punto de la cuadrícula (Figura 5a, 5b). Para la comparación espacial, los datos del modelo fueron interpolados a una malla de $0.25 \times 0.25^\circ$ utilizando una interpolación cúbica.

Ambos conjuntos de datos reproducen aproximadamente el mismo patrón en la

dirección del viento con algunas diferencias en la velocidad.

La velocidad del viento aumenta de norte a sur para ambas bases, con los valores más altos para los datos de satélite sobre todo el dominio. Para evaluar y cuantificar las diferencias en la velocidad del viento, se calculó el RMSE (Figura 5c) y el bias (Figura 5d) considerando quikSCAT- WRF. Los máximos valores de RMSE (alrededor de 2.2 m s^{-1}) se observan alrededor del Cabo Finisterre. El bias muestra valores positivos para todo el dominio, lo que indica que QuikSCAT tiende a sobreestimar la velocidad del viento. Los valores más altos de bias (alrededor de 0.7 m s^{-1}) también se observan al norte y al sur del Cabo Finisterre. Por un lado, estos resultados se podrían explicar debido a la máscara de tierra en los datos QuikSCAT cerca de la costa. De hecho, estudios previos han demostrado que debido a esta máscara, los valores de viento medidos por satélite en alta mar tienden a ser más precisos que los medidos cerca de la costa (Pickett et al., 2003; Tang et al., 2004). Por otro lado, es necesario considerar la posibilidad de una discretización pobre de la malla del modelo con respecto a la complejidad de la topografía costera de Galicia que podría influir en los resultados del modelo cerca de la costa.

Las diferencias de dirección del viento también se analizaron a través del

RMSE (Figura 5e) y el bias (Figura 5f). Los mayores valores de RMSE (aprox. 38°) se observan en la costa occidental cerca de la costa. Estos valores podrían explicarse teniendo en cuenta que los resultados del modelo tienden a ser menos precisos cuando los vientos medidos provienen de tierra (Tabla 3). En la parte más oriental de la costa norte también se observan valores altos de RMSE, que son más dependientes de

la baja velocidad del viento medida en toda la costa norte (Figura 5a, 5b). El bias muestra valores bajos en todo el dominio. A lo largo de la costa occidental se identifican los valores positivos más altos (aprox. 6°) cerca de la costa, lo que indica que QuikSCAT tiende a girar hacia la derecha la dirección del viento. Para el resto de la zona los valores de bias oscilan entre -1° y 2° .

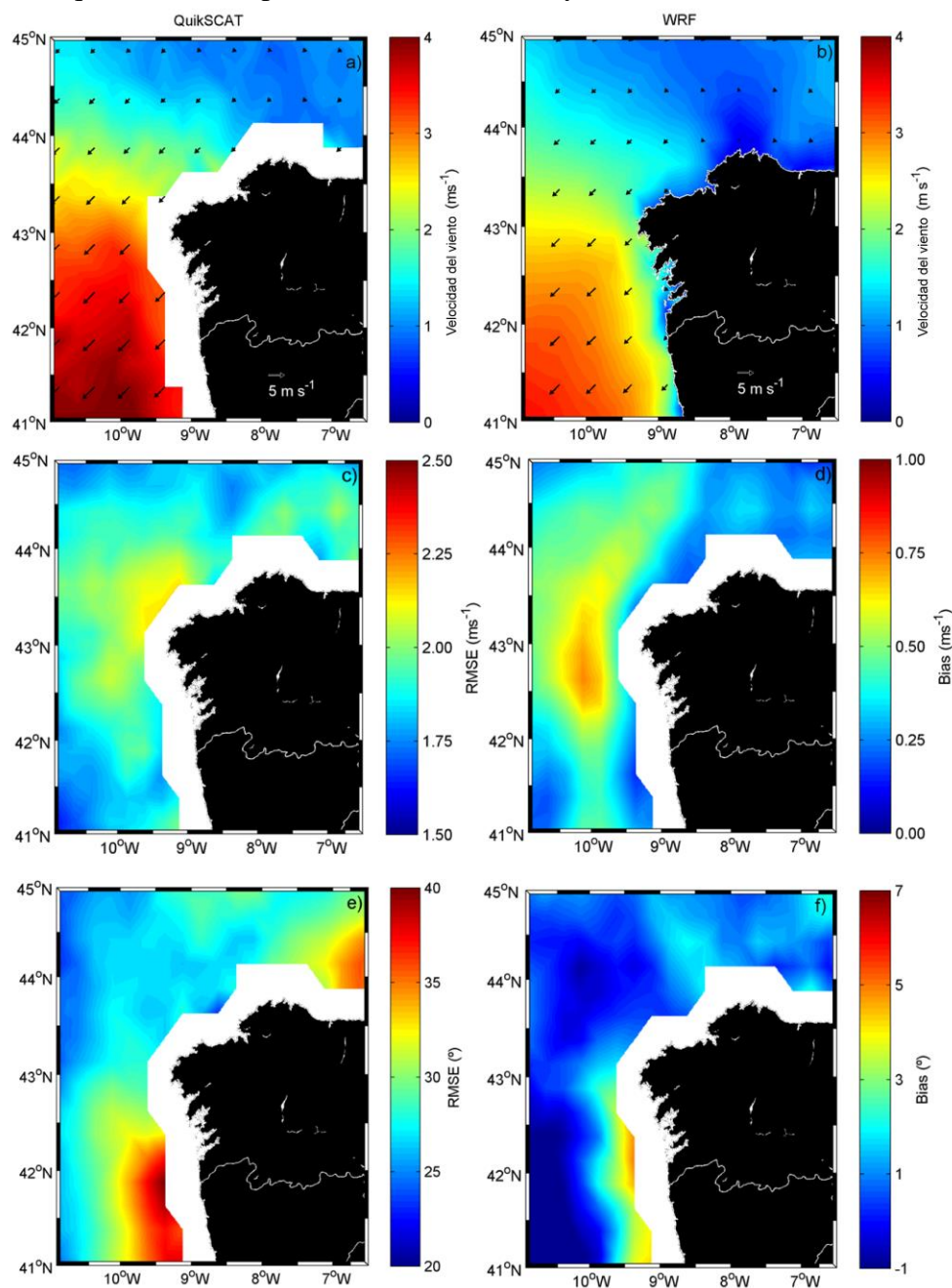


Fig. 5 Patrón de viento anual obtenido del satélite (a) y del modelo (b) a lo largo de la costa gallega entre noviembre de 2008 y octubre de 2009. RMSE y bias de la velocidad (c, d) y la dirección (e, f) del viento considerando QuikSCAT-WRF.

4 Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo ha sido evaluar el viento medido por el satélite QuikSCAT y el modelo WRF, analizando la precisión de los datos a lo largo de la costa gallega a través de un análisis comparativo entre estos vientos y el viento medido *in situ* mediante boyas. Se consideraron tres estaciones de control siguiendo la orientación del litoral correspondiente con la ubicación de tres boyas situadas a lo largo de la costa. También se realizó una comparación espacial entre el satélite y los datos del modelo para evaluar su calidad en esta zona. La comparación se realizó entre noviembre de 2008 y octubre de 2009. A partir de este análisis, se puede concluir lo siguiente:

– Los datos derivados de QuikSCAT y WRF mostraron una precisión similar en la velocidad del viento a lo largo de la costa con errores de entre 1.5 m s^{-1} y 2 m s^{-1} .

– Se encontraron valores de RMSE similares para la dirección del viento en las tres estaciones (35°). El bias también mostró un patrón similar para los datos de satélite y del modelo, con valores positivos en la costa occidental, y negativos en la costa central y norte, siempre con valores absolutos menores para los datos de WRF.

– A partir del análisis llevado a cabo teniendo en cuenta diferentes límites de velocidad del viento, se encontró que QuikSCAT tiende a sobrestimar la velocidad en todos los límites. El RMSE y bias tienden a ser menores para vientos moderados en las tres estaciones, tanto para los datos de satélite como del modelo.

– En lo que concierne al análisis de la dirección por sectores, los errores y bias más bajos se observaron en los mismos sectores para ambas bases de datos en las tres estaciones (S: Silleiro, O: Villano; E-O: Bares). El modelo tiende a ser menos preciso cuando los vientos

medidos *in situ* vienen desde la tierra. – De la comparación espacial entre los datos de satélite y del modelo se encontró que la velocidad de los vientos modelados tiende a ser menor que la de los vientos de satélite en todo el dominio, con el mayor RMSE y bias cerca de la costa.

Del análisis realizado en este trabajo se puede observar que tanto los datos del modelo WRF como los del satélite QuikSCAT son herramientas consistentes para obtener datos representativos de viento cerca de la costa dando buenos resultados cuando se comparan con las observaciones del viento *in situ*. Debe tenerse en cuenta que, dada la interferencia de la tierra cerca de la costa para los valores de satélite y la falta de anemómetros en la región costera, el modelo presenta claras ventajas en la representación del régimen de viento en mar abierto y cerca de la costa. Por lo tanto, las predicciones de los modelos de viento son una herramienta útil para analizar la costa gallega, lo que ayuda a comprender mejor los procesos que tienen lugar en esta región, como por ejemplo los eventos de afloramiento y la dinámica de las plumas de los ríos.

Agradecimientos

El primer autor de este trabajo ha sido apoyado por la Fundação para a Ciência e Tecnologia, a través de una beca de doctorado (SFRH/BD/60209/2009). El tercer autor ha sido apoyado por el programa de Ciência 2008.

Referencias

Accadia, C., Zecchetto, S., Lavagnni, A., Speranza, A., 2007. Comparison of 10-m wind forecasts from a regional area model and QuikSCAT scatterometer wind observations over the Mediterranean Sea. *Monthly Weather Review* 135, 1946–1960.

- Alvarez, I., deCastro, M., Prego, R., Gomez-Gesteira, M., 2003. Hydrographic characterization of a winter-upwelling event in the Ria of Pontevedra (NW Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56, 869-876.
- Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M., deCastro, M., Prego, R., 2005. Variation in upwelling intensity along the NorthWest Iberian Peninsula (Galicia). *Journal of Atmospheric and Ocean Science* 10, n°4, 309-324.
- Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M., deCastro, M., Moreira, C., Novoa, E. M., Díaz, B., Gesteira, J. L. G., Balseiro, C. F., Prego, R., 2006. Use of MeteoGalicia wind data to monitor oil spills of the Galician coast: Comparison with QuikSCAT data. *Ciencias Marinas*, 32 (2B), 351-360.
- Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M., deCastro, M., Novoa E.M., 2008. Ekman transport along the Galician Coast (NW, Spain) calculated from QuikSCAT winds. *Journal of Marine Systems* 72, 101-115.
- Alvarez, I., Ospina-Alvarez, N., Pazos, Y., deCastro, M., Bernardez, P., Campos, M. J., Gomez-Gesteira, J.L., Alvarez-Ossorio, M.T., Varela, M., Gomez-Gesteira, M., Prego, R., 2009. A winter upwelling event in the Northern Galician Rias: Frequency and oceanographic implications. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 82, 573-582.
- Alvarez, I., M. Gomez-Gesteira, M. deCastro, J.L. Gomez-Gesteira and J.M. Dias., 2010. Summer upwelling frequency along the western Cantabrian coast from 1967 to 2008. *Journal of Marine Systems* 79, 218-226.
- Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M., deCastro, M., Lorenzo, M. N., Crespo, A. J. C., Dias, J. M., 2011. Comparative analysis of upwelling influence between the western and northern coast of the Iberian Peninsula. *Continental and Shelf Research* 31, 388-399.
- Bentamy, A., Ayina, H.L., Queffeuilou, P., Croize-Fillon, D., Kerbaol, V., 2007. Improved near real time surface wind resolution over the Mediterranean Sea. *Ocean Science* 3, 259–271.
- Bode, A., Varela, M., Casas, B., Gonzalez, N., 2002. Intrusions of eastern North Atlantic central waters and phytoplankton in the north and northwestern Iberian shelf during spring. *Journal of Marine Systems* 36, 197–218.
- Borja, A., Uriarte, A., Valencia, V., Motos, L., Uriarte, A., 1996. Relationships between anchovy (*Engraulis encrasicolus*) recruitment and the environment in the Bay of Biscay. *Scientia Marina*, 60, 179-192.
- Chelton, D. B., Freilich, M. H., 2005. Scatterometer-based assessment of 10-m analyses from the operational ECMWF and NCEP numerical weather prediction models. *Monthly Weather Review* 33, 409–429.
- deCastro, M., Lorenzo, N., Taboada, J. J., Sarmiento, M., Alvarez, I., Gómez-Gesteira, M., 2006. Influence of teleconnection patterns on precipitation variability and on river flow regimes in the Miño River basin (NW Iberian Peninsula). *Climate Research* 32, 63-73.
- deCastro M., Gómez-Gesteira, M., Lorenzo, M. N., Alvarez, I., Crespo, A. J. C., 2008. Influence of atmospheric modes on coastal upwelling along the western coast of the Iberian Peninsula, 1985 to 2005. *Climate Research* 36, 169-179.
- Ebuchi, N., Graber, H.C., Caruso, M.J., 2002. Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19, 2049–2062.
- Fraga, F., 1981. Upwelling off the Galician Coast, Northwest Spain. In: F.A. Richardson, (Ed.), *Coastal*

- Upwelling, pp. 176-182. American Geophysical Union, Washington.
- Gomez-Gesteira, M., Moreira, C., Alvarez, I., deCastro, M., 2006. Ekman transport along the Galician coast (NW, Spain) calculated from forecasted winds. *Journal of Geophysical Research* 111, C10005.
- Johnson, H.K., 1999. Simple expressions for correcting wind speed data for elevation. *Coastal Engineering* 36, 262-269.
- Large, W. G., Pond, S., 1981. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *Journal of Physical Oceanography* 11, 324-336.
- Large, W. G., Morzel, J., Crawford, G. B., 1995. Accounting for surface wave distortion of the marine wind profile in low-level ocean storms wind measurements. *Journal of Physical Oceanography* 25, 2559-2971.
- Ospina-Alvarez, N., Prego, R., Alvarez, I., deCastro, M., Alvarez-Ossorio, M.T., Pazos, Y., Campos, M. J., Bernarndez, P., Garcia-Soto, C., Gomez-Gesteira, M., Varela, M., 2010. Oceanographical patterns during a summer upwelling-downwelling event in the northern galician rias. comparison with the whole ria system (NW of Iberian Peninsula). *Continental and Shelf Research* 87, 545-552.
- Otero, P., Ruiz-Villarreal, M., 2008. Wind forcing of the coastal circulation off north and northwest Iberia: Comparison of atmospheric models. *Journal of Geophysical Research* 113, C10019.
- Penabad, E., Alvarez, I., Balseiro, C. F., deCastro, M., Gómez, B., Pérez-Muñuzuri, V., Gómez-Gesteira, 2008. Comparative analysis between operational weather prediction models and QuikSCAT wind data near the Galician coast. *Journal of Marine Systems* 72, 256-270.
- Pensieri, S., Bozzano, R., Schiano, M. E., 2010. Comparison between QuikSCAT and buoy wind data in the Ligurian Sea. *Journal of Marine Systems* 81, 286-296.
- Pickett, M.H., Tang, W., Rosenfeld, L.K., Wash, C.H., 2003. QuikSCAT satellite comparisons with nearshore buoy wind data off the U.S. west coast. *Journal of Atmospheric and Ocean Science* 20, 1869-1979.
- Portabella, M., Stoffelen, 2001. Rain detection and quality control of SeaWinds. *Journal of Atmospheric and Ocean Science* 18, 171-1183.
- Prego, R., Guzmán-Zuñiga, D., Varela, M., deCastro M., Gomez-Gesteira, M., 2007. Consequences of winter upwelling events on biogeochemical and phytoplankton patterns in a western Galician ria (NW Iberian peninsula. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73, 409-422.
- Ruti, P. M., Marullo, S., D'Ortenso, F., Tremant, M., 2008. Comparison of analyzed and measured wind speeds in the perspective of oceanic simulations over the Mediterranean basin: analyses QuikSCAT and buoy data. *Journal of Marine Systems* 70, 33-48.
- Santos, A. M. P., Peliz, A., Dubert, J., Oliveira, P. B., Angelico, M. M., Re, P., 2004: Impact of a winter upwelling event on the distribution and transport of sardine (*Sardina pilchardus*) eggs and larvae off western Iberia: a retention mechanism *Continental and Shelf Research* 24, 149-165.
- Satheesan, K., Sarkar, A., Parekh, A., Ramesh Kumar, M.R., Kuroda, Y., 2007. Comparison of wind data from QuikSCAT and buoys in the Indian Ocean. *Journal International Journal of Remote Sensing* 10, 2375-2382.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., Powers, J. G., 2005. A description of the advanced re-

- search wrf version 2. NCAR Technical Note NCAR/TN-468+STR, 100 pp.
- Tang, W., Liu, W.T., Stiles, B.W., 2004. Evaluation of high-resolution ocean surface vector winds measured by QuikSCAT scatterometer in coastal regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42, 8.
- Torres, R., Barton, E. D., Miller, P., Fanjul, E., 2003. Spatial patterns of wind and sea surface temperature in the Galician upwelling region. *Journal of Geophysical Research* 108, 3130- 3143.
- Varela, M., Prego, R., Pazos, Y., 2008. Spatial and temporal variability of phytoplankton biomass, primary production and community structure in the Pontevedra Ria (NW Iberian Peninsula): oceanographic periods and possible response to environmental changes. *Marine Biology* 154, 483–499.
- Varela, M., M. Alvarez-Ossorio, A. Bode, R. Prego, P. Bernardez and C. Garcia-Soto. -2010. The effects of a winter upwelling on biogeochemical and planktonic components in an area close to the Galician upwelling core: The Sound of Corcubion (NW Spain). *Journal of Sea Research* 64, 260-272. 260-272.

