



## “Radars de alta frecuencia en el Observatorio RAIA”

ENTREGABLE 2.10 - Memoria de las actividades de  
validación euleriana y lagrangiana  
ACTIVIDAD 2: Gestión y Validación de la Información

ACTIVIDAD	2. GESTIÓN Y VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN
ACCIÓN	2.2 VALIDACIÓN DE DATOS
FECHA VERSIÓN	14 /07 /2022
VERSIÓN	2.0
AUTOR	PABLO LORENTE JIMÉNEZ MIGUEL GIL COTO ADRIÁN MARTÍNEZ FERNÁNDEZ
PARTICIPANTES	MARÍA ISABEL RUIZ GIL DE LA SERNA ENRIQUE ÁLVAREZ FANJUL SILVIA PIEDRACOBVA VARELA WALDO REDONDO CARIDE PEDRO MONTERO VILLAR GARBIÑE AYENSA AGUIRRE CARLOS S. FERNANDES RAMIRO VARELA BENVENUTO

### DISCLAIMER

*Este documento ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020. Las opiniones son de exclusiva responsabilidad del autor que las emite.*

*Para citar este documento utilice la siguiente fórmula:*

*Gilcoto, M.; Lorente, P.; Martínez Fernández, A.; Ruiz, M.I.; Álvarez-Fanjul, E.; Piedracoba, S.; Redondo, W.; Montero, P.; Ayensa, G.; Fernandes, C.; Varela, R. (2022). Memoria de las actividades de validación euleriana y lagrangiana (Entregable 2.10, Actividad 2). [Informe técnico] Digital CSIC; <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/15161>*



*This work is licensed under CC BY-NC-ND 4.0. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>*

# ÍNDICE

<b>VALIDACIÓN DE DATOS DE CORRIENTES EN SUPERFICIE PROPORCIONADAS POR EL RADAR HF.....</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>2. ANÁLISIS DE LA COBERTURA ESPACIO-TEMPORAL .....</b>	<b>3</b>
<b>3. VALIDACIÓN EULERIANA .....</b>	<b>5</b>
3.1. Validación con la boya de Silleiro.....	5
3.2. Validación con la boya de Vilán .....	8
3.3. Análisis cualitativo de la consistencia .....	11
<b>4. VALIDACIÓN LAGRANGIANA .....</b>	<b>12</b>
4.1. Datos HF Radar .....	12
4.2. Datos de boyas de deriva.....	13
4.3. Validaciones.....	15
4.3.1. Filtrado de los datos emparejados.....	15
4.3.2. Modelos de regresión lineal.....	15
4.3.3. Selección de modelos de regresión: la <i>RwSD</i> .....	17
4.3.4. Validaciones seleccionadas por antena/malla .....	20
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>21</b>
<b>6. REFERENCIAS .....</b>	<b>23</b>
<b>7. ANEXO A. MAPAS DE ESTADÍSTICAS PARA LOS RADARES HF .....</b>	<b>25</b>
7.1. Radiales <i>measured</i> de la antena de Cíes (CIES).....	25
7.2. Radiales <i>measured</i> de la antena de Fisterra (FIST) .....	29
7.3. Radiales <i>measured</i> de la antena de Leça de Palmeira (LPRO).....	33
7.4. Radiales <i>measured</i> de la antena de Prior (PRIO) .....	37
7.5. Radiales <i>measured</i> de la antena de Silleiro (SILL) .....	41
7.6. Radiales <i>measured</i> de la antena de Vilán (VILA).....	45
7.7. Velocidades totales de RAIA_NW_Iberian (GALI).....	49
<b>8. ANEXO B. MAPAS DE PROCESADO DE TRAZAS DE BOYAS.....</b>	<b>57</b>
8.1. Procesado trazas boyas GPRS.....	57
8.2. Procesado trazas boyas SPOT.....	68
8.3. Emparejamiento trazas con antena Cíes.....	72
8.4. Emparejamiento trazas con antena Silleiro .....	77
8.5. Emparejamiento trazas con antenas Prior y Fisterra .....	78
8.6. Emparejamiento trazas con antena Vilán.....	79
8.7. Emparejamiento trazas con antena Leça de Palmeira y con RAIA_NW_Iberian.....	80
<b>9. ANEXO C. GRÁFICOS DE DISPERSIÓN CON LÍNEAS DE REGRESIÓN .....</b>	<b>81</b>

# Validación de datos de corrientes en superficie proporcionadas por el radar HF

## 1. Introducción

La obtención de medidas precisas de las corrientes marinas constituye un desafío debido a su alta variabilidad espacio-temporal, resultado de la influencia de diversos forzamientos: las mareas, la descarga fluvial de agua dulce, el viento, etc. Las medidas de corrientes proporcionadas por instrumentos convencionales tales como correntímetros, ADCPs o boyas de deriva, aunque útiles, presentan ciertas limitaciones en términos de resolución espacial y su precisión está sujeta al estado dinámico del mar. Por ello, en las últimas décadas se han realizado notables esfuerzos para desarrollar técnicas alternativas tales como la detección remota de mapas 2D de corrientes superficiales en regiones costeras con ayuda de radares HF (High Frequency o de alta frecuencia).

La consistencia de las medidas remotas de corrientes proporcionadas por los radares HF ha sido previamente demostrada en multitud de estudios que incluyen ejercicios de validación con instrumentos de medida *in situ*, en los que se han notificado valores de correlación y error cuadrático medio en los rangos 0.32–0.92 y 5–20  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente (Graber *et al.*, 1997; Kaplan *et al.*, 2005). La mayor parte de los errores asociados a los datos de radar HF son de naturaleza geométrica. La incertidumbre intrínseca asociada a esta tecnología depende de las características del radar empleado, la frecuencia a la que emite, el tipo de sensor *in situ* y su localización dentro del área de cobertura del radar, así como el esquema de procesado de datos empleado. En este contexto, el ruido instrumental puede alcanzar los 4–6  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  (De Paolo *et al.*, 2015).

La precisión del radar HF desplegado en el área de Galicia y Norte de Portugal (denominado RAIA\_NW\_Iberian System), operado conjuntamente por INTECMAR, Puertos del Estado y el Instituto Hidrográfico de Portugal, ha sido evaluada para un período de tiempo de ocho meses comprendido entre el 1 de abril y el 30 de noviembre del 2021. El objetivo es analizar la robustez del sistema, una vez que la quinta estación Leça de Palmeira ha sido plenamente integrada al sur del dominio original, aportando una gran cantidad de vectores radiales que permiten no sólo ampliar la cobertura espacial sino también aportar información adicional sobre la malla original.

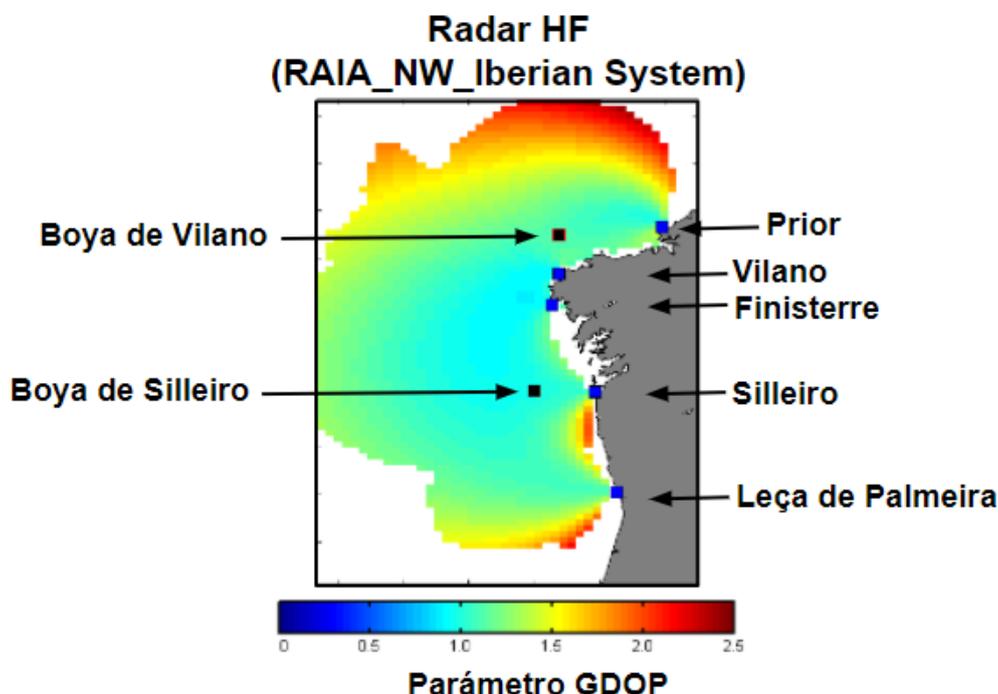
Para este cometido, se ha realizado una comparación directa contra observaciones *in situ* proporcionadas por diversos instrumentos de medida. En el presente documento, se han aplicado dos metodologías complementarias, que serán descritas detalladamente en las siguientes secciones:

i) Validación euleriana (realizada por Puertos del Estado, sección 3 del presente documento): comparación de vectores totales con observaciones *in situ* proporcionadas por dos boyas de la Red de Aguas Profundas de Puertos del Estado (Silleiro y Vilán), fondeadas dentro del área de cobertura del radar HF (Figura 1).

ii) Validación lagrangiana usando vectores radiales y totales (realizada por CSIC, sección 4 del presente documento): comparación de velocidades con observaciones *in situ* proporcionadas por boyas de deriva SPOT y GPRS, lanzadas en el marco de varias campañas dentro del área de cobertura del radar RAIA\_NW\_Iberian y del radar RAIA\_Vigo de la Ría de Vigo (ver entregable 2.7).

Como paso previo a los ejercicios de validación euleriana y lagrangiana, es conveniente realizar un estudio de la disponibilidad espacio-temporal de datos de corrientes proporcionados por el radar HF (sección 2). Esta información no es sólo relevante para interpretar correctamente las métricas estadísticas derivadas

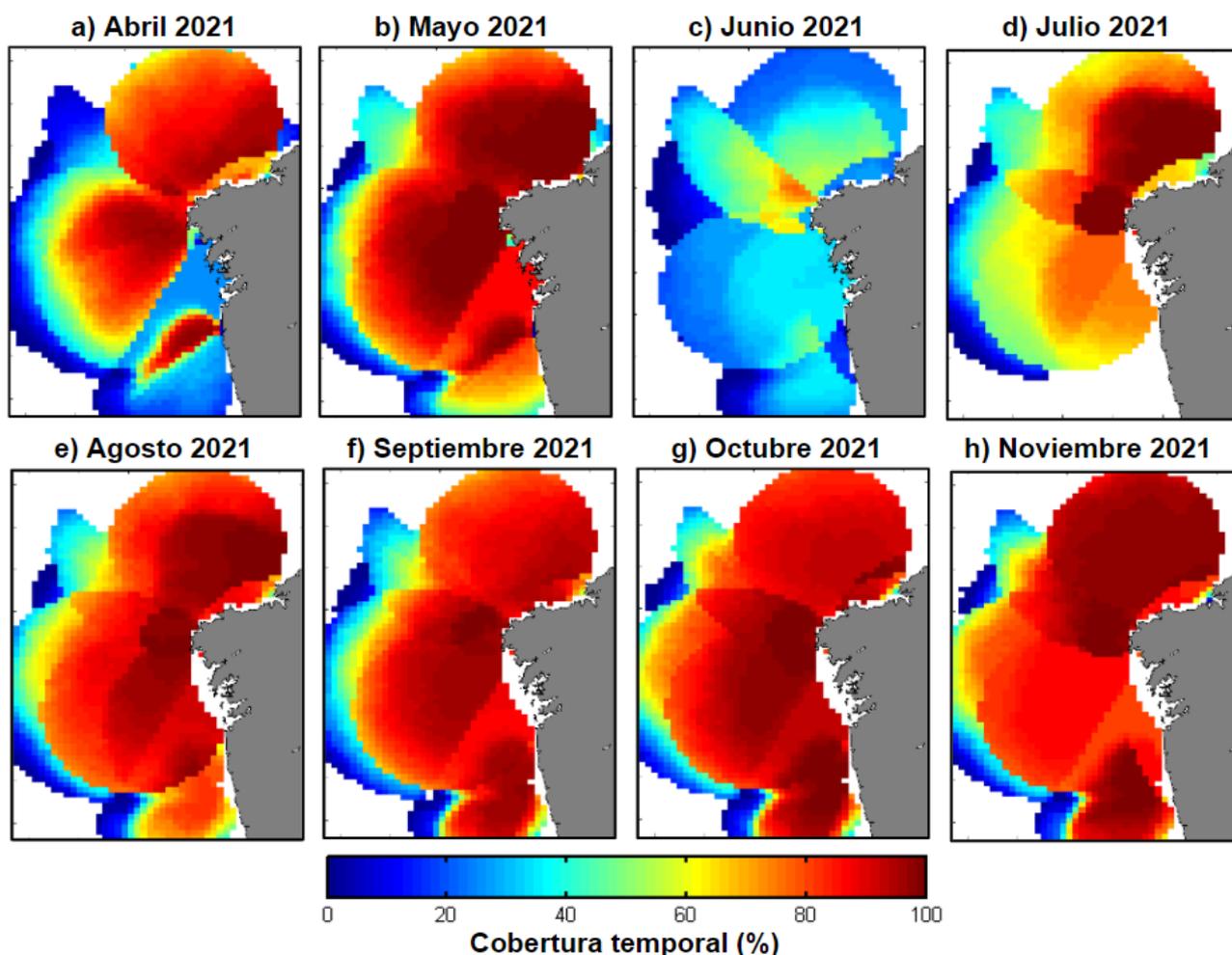
de las validaciones sino también para tener una primera idea, a nivel cualitativo, del funcionamiento del sistema durante el periodo de estudio escogido. Cualquier anomalía, disfunción o avería temporal de cada estación puede ser monitorizada y posteriormente analizada para su mitigación y/o corrección.



**Figura 1.** Radar HF desplegado en Galicia-Norte de Portugal, denominado RAIA\_NW\_Iberian\_System. Está compuesto por 5 estaciones, representadas por cuadros azules. El mapa representa la distribución espacial del parámetro adimensional GDOP (del inglés “Geometric Dilution of Precision”). Valores elevados indican una mayor incertidumbre en las medidas de corrientes en superficie debido al ángulo de intersección de los vectores radiales proporcionados por, al menos, dos de las 5 estaciones. Las dos boyas empleadas en el ejercicio de validación euleriana aparecen representadas con recuadros negros: Silleiro y Vilán.

## 2. Análisis de la cobertura espacio-temporal

La cobertura espacio-temporal de los datos de corrientes para cada mes se muestran en la Figura 2. Los porcentajes disminuyen drásticamente en los bordes occidentales del dominio del radar HF, donde las incertidumbres en la calidad de las medidas son mayores (debido al pequeño ángulo de intersección de los vectores radiales) y vienen cuantificadas por unos valores de GDOP (Geometric Dilution Of Precision) algo superiores, como se muestra en la Figura 1. El GDOP es un parámetro adimensional que caracteriza como la geometría del propio radar HF impacta en la calidad de las medidas debido al ángulo de intersección de los vectores radiales (*Chapman and Graber, 1997*).



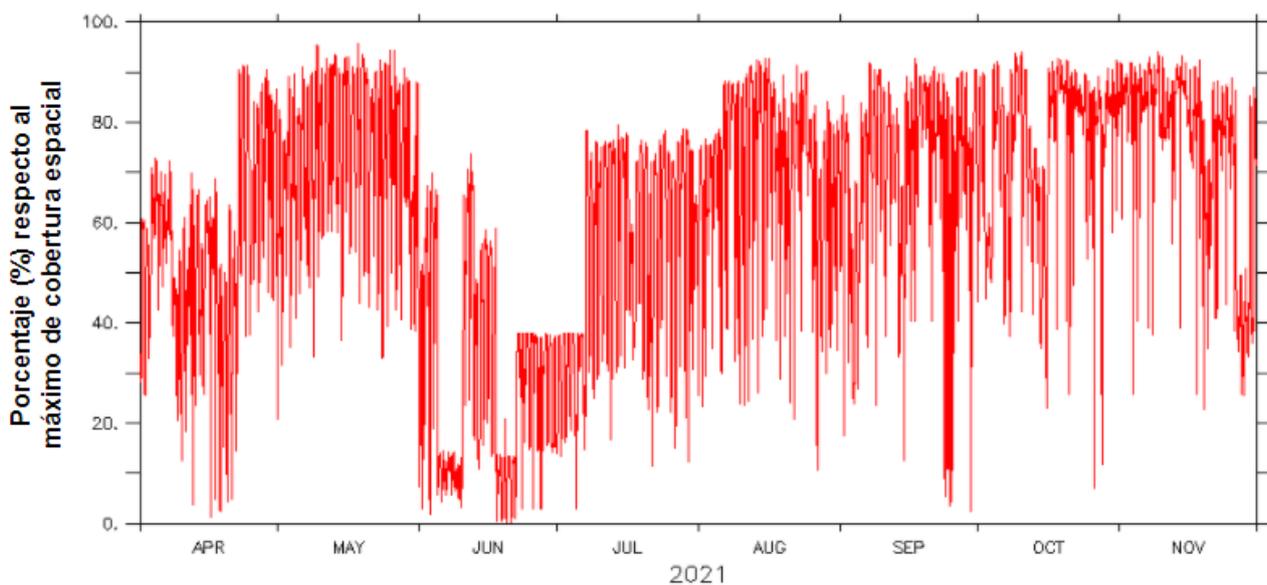
**Figura 2.** Mapas de disponibilidad mensual de datos de corrientes proporcionados por el radar HF. Los mapas muestran la cobertura espacio-temporal de la malla de vectores totales construidos a partir de los vectores radiales medidos por cada una de las 5 estaciones que conforman el sistema.

Por otro lado, el alcance de la cobertura en la parte más al sur del dominio es inferior ya que la nueva estación instalada, Leça de Palmeira (Figura 1), es de medio alcance y opera a una frecuencia nominal de 13.5 MHz (en lugar de 4.86 MHz, que es la frecuencia de largo alcance a la que operan las otras cuatro estaciones). En este contexto, resulta necesario recordar la relación inversa existente entre la frecuencia de operación (expresada en MHz) y el alcance (expresado en km) que presenta una estación cualquiera.

Respecto a la variación mes a mes de la cobertura espacio-temporal, se puede observar que en abril (Figura 2a) y mayo (Figura 2b) la estación de Finisterre operó por debajo de sus posibilidades, proporcionando menos vectores radiales que sus hermanas. El mes de junio (Figura 2c) fue el periodo con menor retorno de datos, con todas las estaciones funcionando menos del 50% del tiempo debido a distintas incidencias presentadas, a excepción de Vilán (Figura 1) que lo hizo por encima del 60%. Durante el mes de julio (Figura 2d) se advirtió cierta mejoría en la cobertura espacio-temporal de las estaciones, especialmente aquellas situadas más al norte (Vilán y Prior). Finalmente, entre agosto y noviembre (Figura 2e-h), la disponibilidad de datos fue significativamente alta en todo el dominio espacial gracias al funcionamiento ininterrumpido y simultáneo de las 5 estaciones que conforman el sistema RAIA\_NW\_Iberian.

De manera complementaria, se ha calculado la evolución horaria de la cobertura espacial (respecto a su máximo posible) para todo el periodo de estudio (Figura 3). Además de las oscilaciones de alta frecuencia debido a las variaciones en la ionosfera como consecuencia de los ciclos día-noche, queda claro que en

promedio la cobertura espacial es aceptable, situándose en el  $62.74(\pm 23.48)\%$ . Para el período Agosto-Noviembre, la cobertura mejora significativamente hasta situarse en un  $73.26(\pm 16.98)\%$ . La Figura 3 confirma lo ya expuesto en la Figura 2: el funcionamiento del radar HF fue irregular en abril y especialmente desde finales de mayo hasta mediados de julio, recomendándose por ello que futuros análisis oceanográficos (en concreto, los realizados en el entregable E.11) se centren en el periodo agosto-noviembre del 2021 cuando la cobertura espacio-temporal del radar HF fue óptima. En cualquier caso, también sería aconsejable analizar las configuraciones actuales implementadas en las antenas, y los posibles cambios, para tratar de aumentar la cobertura promedio, cumpliendo con el nivel 80%-80% recomendado de provisión de datos (80% de cobertura espacial el 80% del tiempo), propuesto tiempo atrás por *Roarty et al.* (2012).



**Figura 3.** Evolución horaria de la cobertura espacial del radar HF respecto a su máximo, expresado en tanto por ciento (%).

### 3. Validación Euleriana

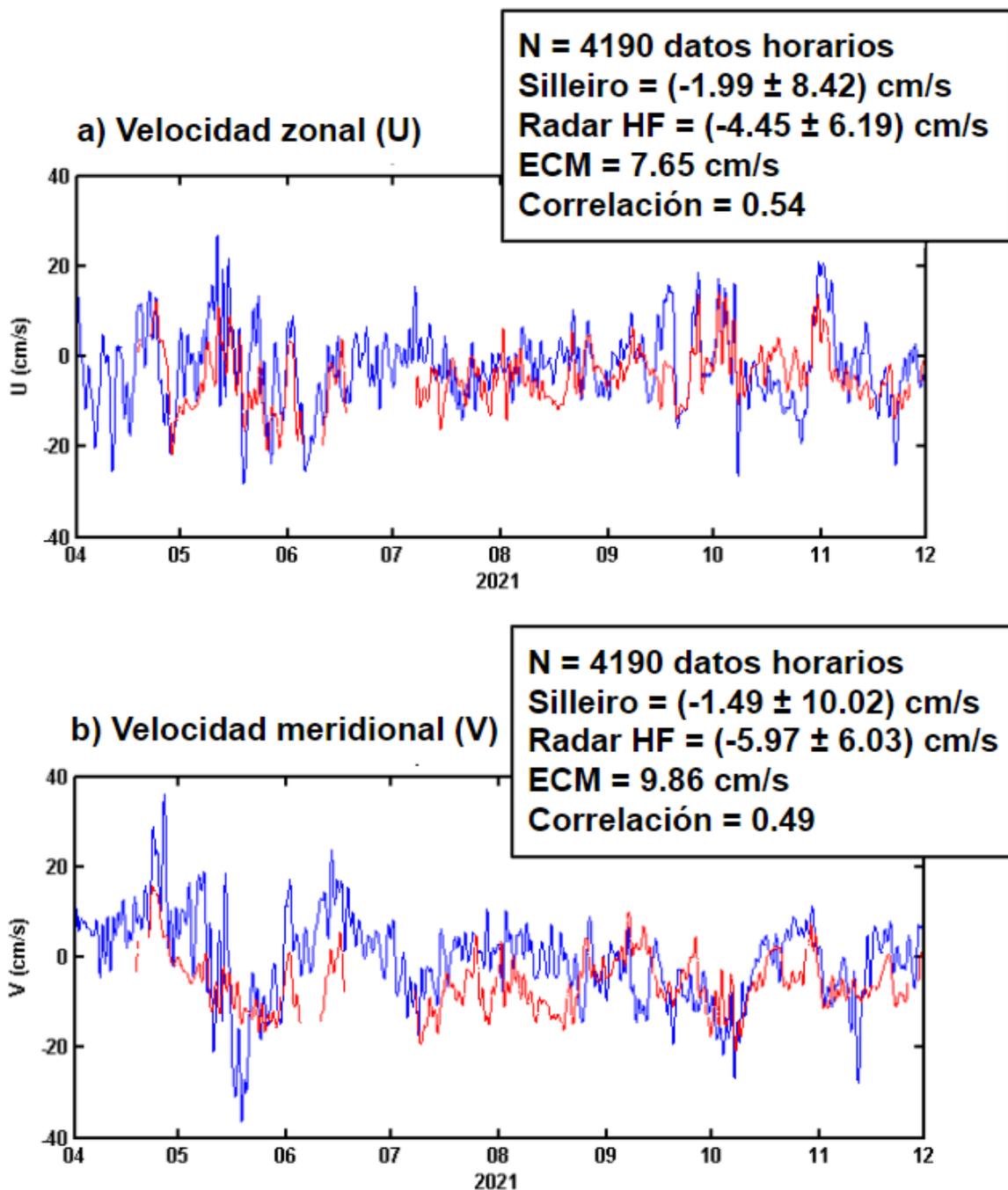
Las componentes zonal (U) y meridional (V) de los vectores de corriente totales medidos por la boya y los calculados a escala horaria en la celda de la malla del radar RAIA\_NW\_Iberian más cercano a dicha boya han sido comparados para el período abril-noviembre del 2021.

Las series temporales de velocidad de corriente han sido filtradas aplicando un filtro Butterworth con un período de corte de 30 horas (*Emery y Thomson, 2001*), para eliminar los efectos de las mareas y evaluar las discrepancias en las corrientes subinerciales. Este esquema resulta adecuado ya que el estudio se centra principalmente en las características de baja frecuencia del flujo superficial.

Las métricas estadísticas usadas para comparar dos conjuntos de datos incluyen la media, la desviación estándar, el error cuadrático medio (ECM), la correlación escalar y la correlación compleja.

#### 3.1. Validación con la boya de Silleiro

Los resultados de la validación de los datos de corrientes proporcionados por el radar HF en el punto de la malla RAIA\_NW\_Iberian más cercano ( $9.429^{\circ}W$ ,  $42.123^{\circ}N$ ) a la localización de la boya de Silleiro ( $9.43^{\circ}W$ ,  $42.12^{\circ}N$ ) se muestran en la Figura 4, Figura 5 y Figura 6.



**Figura 4.** Series temporales horarias de velocidad de la corriente, componente zonal (a) y meridional (b) para el periodo de 9 de abril a noviembre del 2021. Las series han sido filtradas aplicando un filtro pasa-baja de Butterworth de 30 horas. La línea azul representa las observaciones *in situ* registradas por el correntímetro instalado en la boya de Silleiro. La línea roja muestra las observaciones remotas tomadas por el radar HF RAIA\_NW\_Iberian, en el punto de la malla más cercano a la localización de la boya.

Al comparar visualmente las series temporales (filtradas) de la componente zonal (Figura 4a) y meridional (Figura 4b) de la velocidad de la corriente en superficie, podemos indicar que:

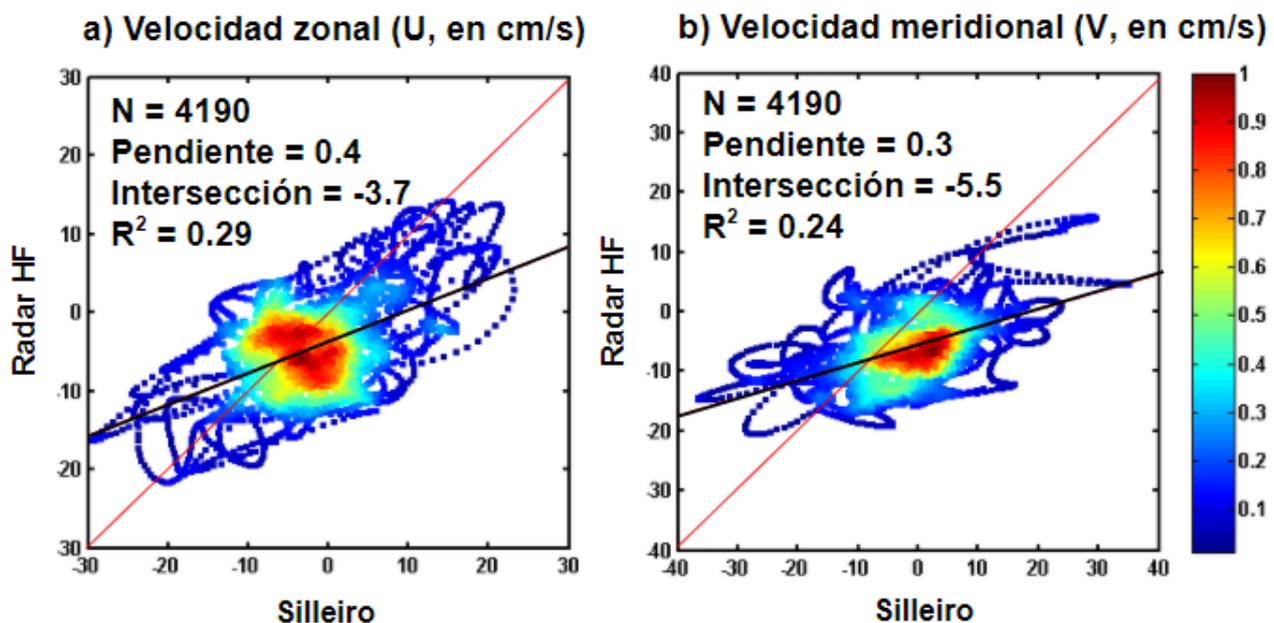
- i) Se obtienen mejores métricas estadísticas para la componente zonal de la velocidad que para la meridional: el ECM es inferior ( $7.65 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y la correlación temporal es superior (0.54). Esto es un resultado esperable ya que los vectores radiales son más precisos cuando el flujo predominante se desplaza en dirección radial respecto a la localización relativa entre la boya y la estación de radar. En

este sentido, la estación de radar de Silleiro y la boya de Silleiro se encuentran situadas prácticamente a la misma latitud (Figura 1), por lo que los vectores radiales medidos por esta estación serán más precisos en el eje x (componente zonal de la velocidad).

ii) En promedio, la tendencia de la corriente en esta localización es a tomar valores negativos para ambas componentes. Es decir, la dirección predominante del flujo en superficie es hacia el suroeste, en concordancia con el viento de componente norte predominante durante la mayor parte del tiempo.

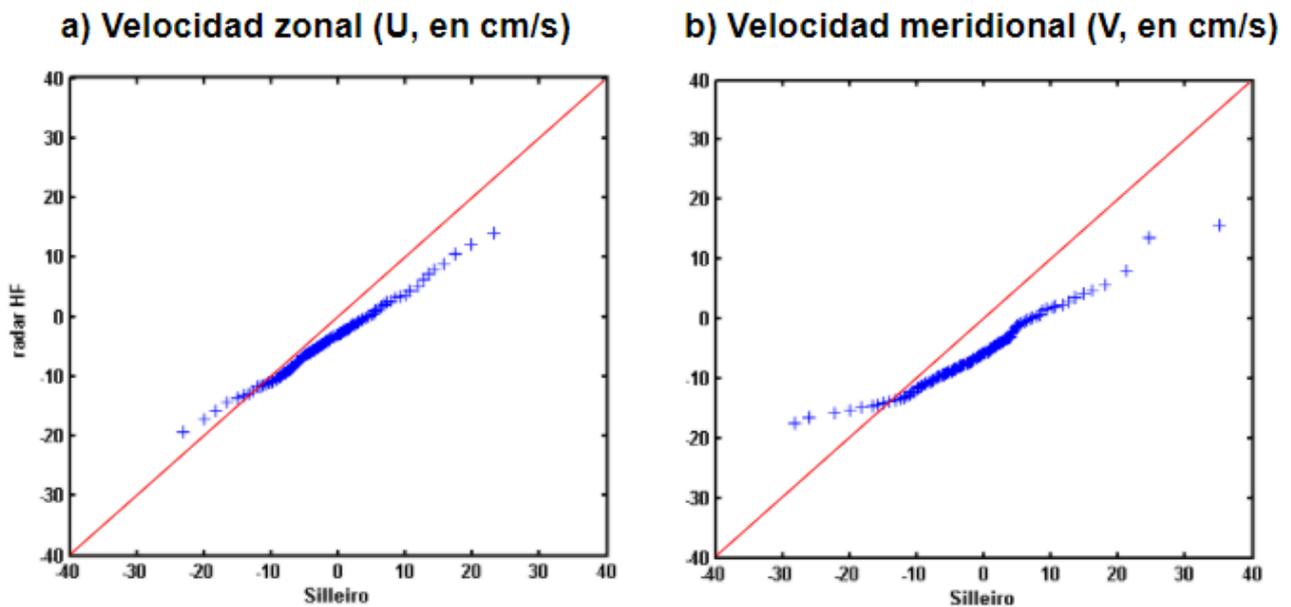
iii) Respecto a la correlación compleja, el coeficiente es 0.51 y la fase es  $-0.03^\circ$ . Estos valores son consistentes con las estadísticas reportadas en estudios previos (Lorente *et al.*, 2020).

Por otro lado, a tenor de los resultados expuestos en los diagramas de dispersión y los correspondientes ajustes lineales realizados, podemos afirmar que las estimaciones remotas proporcionadas por el radar HF tienden a subestimar la velocidad de las corrientes marinas registradas en el correntímetro instalado en la boya de Silleiro (Figura 5).



**Figura 5.** Ajuste lineal (diagramas de dispersión) para la componente zonal (a) y meridional (b) de la velocidad de la corriente registrada en la boya de Silleiro y observaciones remotas tomadas por el radar HF, en el punto de la malla más cercano a la localización de la boya para el periodo de abril a noviembre del 2021. Las series han sido filtradas aplicando un filtro pasa-baja de Butterworth de 30 horas. Los colores representan la densidad de datos.

Los diagramas cuantil-cuantil para cada componente de la velocidad de las corrientes (Figura 6), calculados para un rango de cuantiles de 5% a 99%, confirman lo anteriormente expuesto: el radar HF parece subestimar la intensidad de las corrientes, especialmente en los rangos de velocidades más altas. Dicha subestimación es más acentuada en el caso de la componente meridional del flujo (Figura 6b).



**Figura 6.** Diagramas cuantil-cuantil (“QQ plots”) para la componente zonal (a) y meridional (b) de la velocidad de la corriente registrada en la boya de Silleiro y observaciones remotas tomadas por el radar HF, en el punto de la malla más cercano a la localización de la boya para el periodo de abril a noviembre del 2021. Las series han sido filtradas aplicando un filtro pasa-baja de Butterworth de 30 horas.

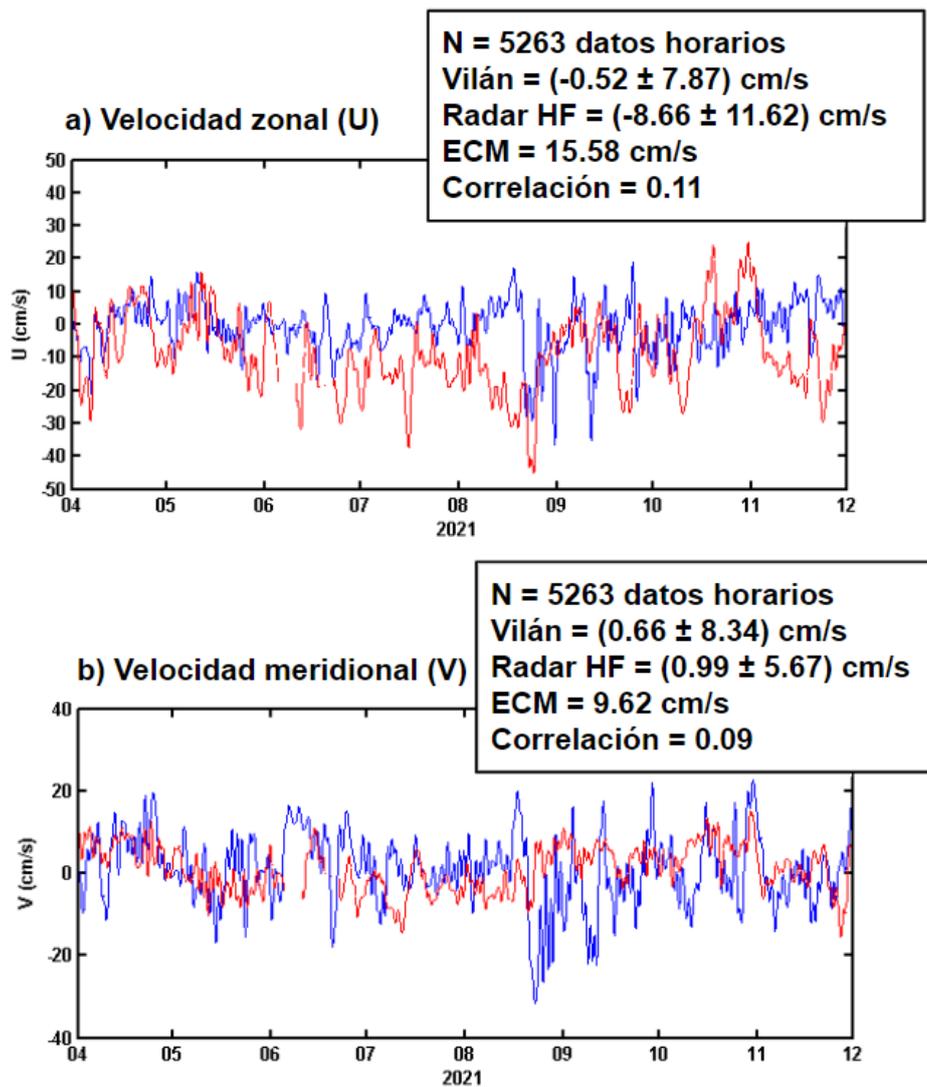
### 3.2. Validación con la boya de Vilán

Los resultados de la validación de los datos de corrientes proporcionados por el radar HF en el punto de la malla más cercano (9.2107°W, 43.5002°N) a la localización de la boya de Vilán (9.21°W, 43.50°N) se muestran en las figuras 7, 8 y 9.

Al comparar visualmente las series temporales (filtradas) de la componente zonal (Figura 7a) y meridional (Figura 7b) de la velocidad de la corriente en superficie, podemos indicar que:

- i) Se obtienen peores métricas estadísticas (en términos de ECM mayores y correlaciones temporales más bajas) que aquellas mostradas en el apartado anterior (3.1) para la boya de Silleiro.
- ii) En promedio, la tendencia de la corriente en esta localización es a tomar valores negativos para la componente zonal y positivos para la meridional. Es decir, la dirección predominante del flujo en superficie es hacia el noroeste.
- iii) Respecto a la correlación compleja, el coeficiente es 0.17 y la fase es fase -52.57°.

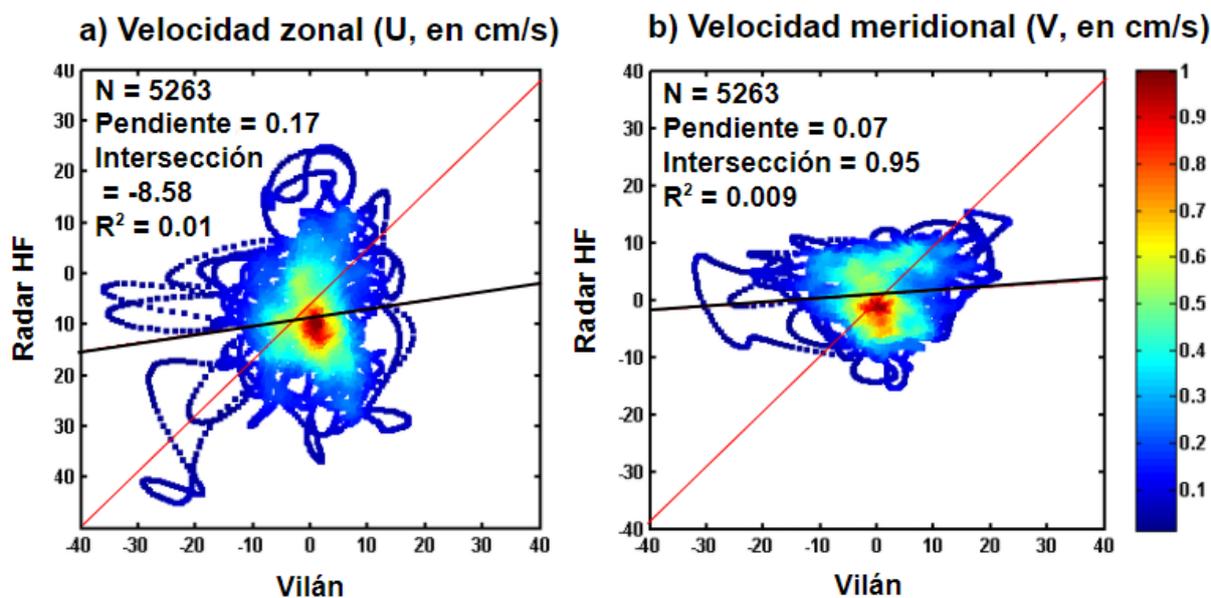
A tenor de estos resultados, podemos sospechar que las dos estaciones situadas más al norte (Vilán y Prior, mostradas en la Figura 1) están proporcionando vectores radiales con una precisión inferior a la esperada. Por ello, se recomienda análisis complementarios y la posibilidad de reprocesar estos datos con la calibración llevada a cabo a finales de noviembre 2021 e incorporada a las estaciones de Vilán en colaboración con la empresa instaladora.



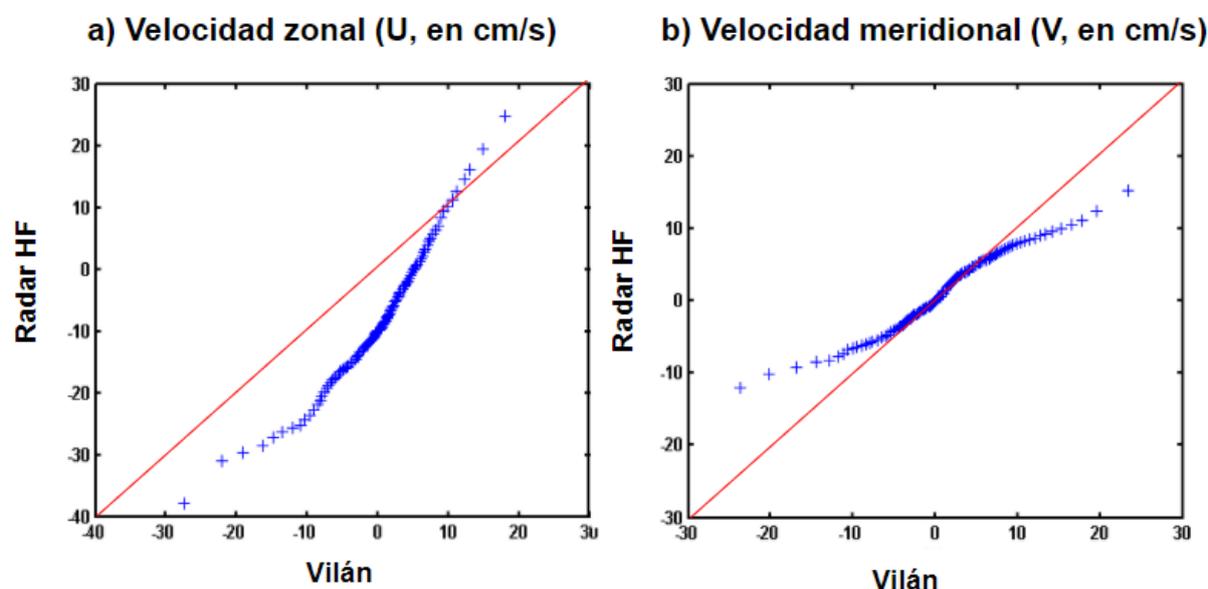
**Figura 7.** Series temporales horarias de velocidad de la corriente, componente zonal (a) y meridional (b) para el periodo de abril a noviembre del 2021. Las series han sido filtradas aplicando un filtro pasa-baja de Butterworth de 30 horas. La línea azul representa las observaciones *in situ* registradas por el correntímetro instalado en la boya de Vilán. La línea roja muestra las observaciones remotas tomadas por el radar HF RAIA\_NW\_Iberian, en el punto de la malla más cercano a la localización de la boya.

Los resultados de los diagramas de dispersión (y los correspondientes ajustes lineales realizados), mostrados en la Figura 8, vienen a confirmar que:

- i) las estimaciones remotas proporcionadas por el radar HF tienden a subestimar la velocidad de las corrientes marinas registradas en el correntímetro instalado en la boya de Vilán, especialmente para la componente meridional (Figura 8b).
- ii) La escasa concordancia entre los datos *in situ* y remotos.



**Figura 8.** Ajuste lineal (diagramas de dispersión) para la componente zonal (a) y meridional (b) de la velocidad de la corriente registrada en la boya de Vilán y observaciones remotas tomadas por el radar HF, en el punto de la malla más cercano a la localización de la boya para el periodo de abril a noviembre del 2021. Las series han sido filtradas aplicando un filtro pasa-baja de Butterworth de 30 horas. Los colores representan la densidad de datos.

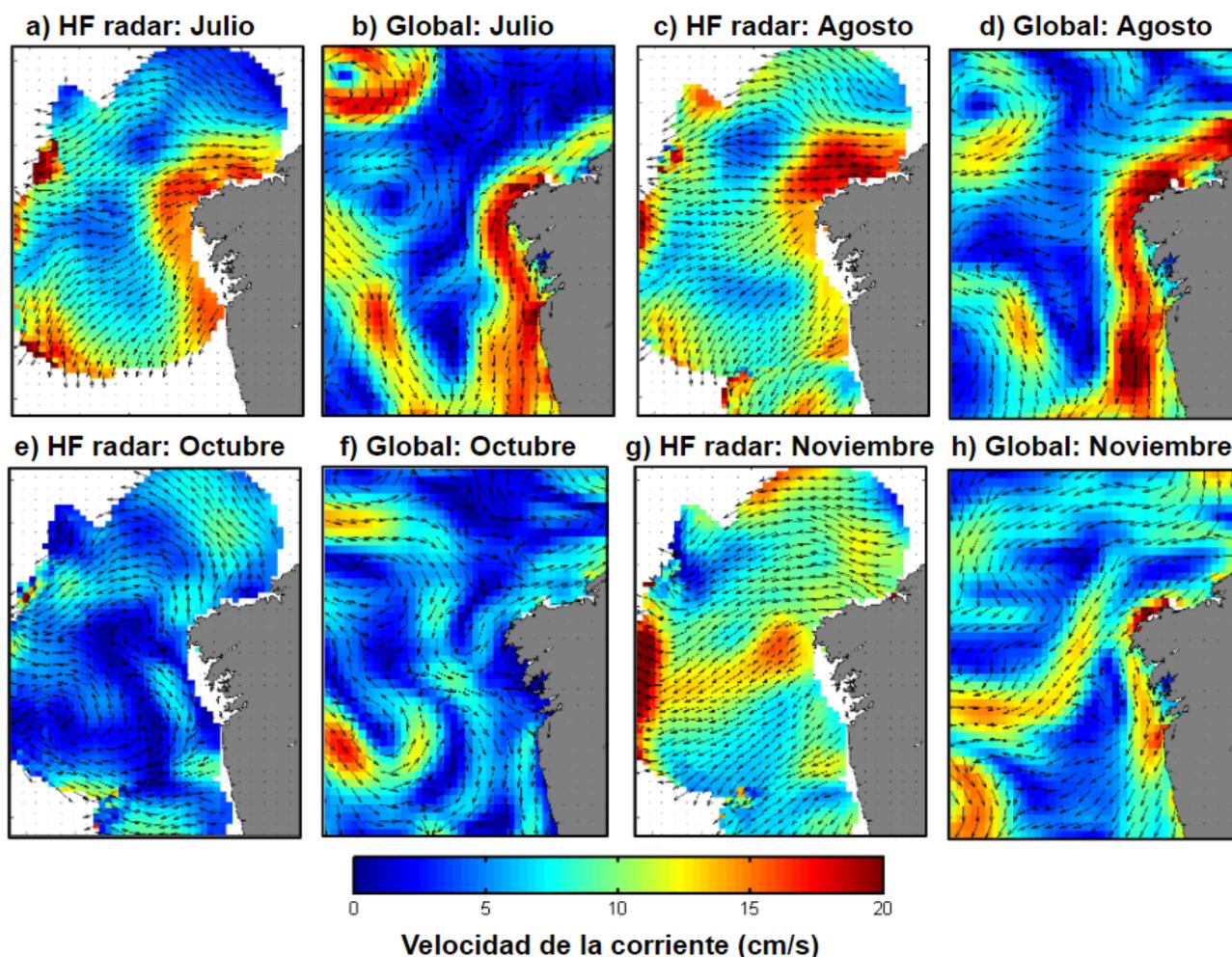


**Figura 9.** Diagramas cuantil-cuantil (“QQ plots”) para la componente zonal (a) y meridional (b) de la velocidad de la corriente registrada en la boya de Vilán y observaciones remotas tomadas por el radar HF, en el punto de la malla más cercano a la localización de la boya para el periodo de abril a noviembre del 2021. Las series han sido filtradas aplicando un filtro pasa-baja de Butterworth de 30 horas.

Los diagramas cuantil-cuantil para cada componente de la velocidad de las corrientes (Figura 9), calculados para un rango de cuantiles de 5% a 99%, confirman lo anteriormente expuesto: el radar HF parece subestimar la intensidad de la corriente meridional, especialmente en los rangos de velocidades más altas (Figura 9b). Por el contrario, el radar HF sobrestima claramente las corrientes hacia el oeste (valores negativos de la componente zonal), como se observa en la Figura 9a.

### 3.3. Análisis cualitativo de la consistencia

Con la finalidad de complementar el apartado anterior, se ha realizado una comparación cualitativa (puramente visual) de los patrones mensuales de circulación superficial obtenidos a partir de datos del radar HF contra las predicciones del modelo GLOBAL del Servicio Marino Copernicus (Figura 10). Dicha comparación nos permite realizar una interpretación física de los resultados, así como cotejar el grado de similitud entre ambas fuentes de datos.



**Figura 10.** Mapas mensuales de corrientes en superficie, obtenidas a partir de datos horarios proporcionados por el radar HF desplegado en la zona de estudio y por el modelo GLOBAL del Servicio Marino Copernicus.

La comparación modelo-radar es un procedimiento habitual en oceanografía operacional, si bien es cierto que suele aplicarse para validar los modelos de predicción y cuantificar su grado de fiabilidad (y no al revés, como es el caso que nos ocupa). En cualquier caso, dada la amplia aceptación del modelo GLOBAL (usado por gran cantidad de usuarios finales e intermedios, ya que el GLOBAL proporciona condiciones de contorno consistentes para multitud de modelos regionales anidados al primero, dentro y fuera del ámbito Copernicus), y gracias también a la abundante literatura que corrobora su calidad y precisión como sistema de predicción oceánica a escala global (Lorente *et al.*, 2019; Lellouche *et al.*, 2018), podemos realizar la siguiente aproximación: tomaremos los mapas mensuales del GLOBAL como “sistema de referencia” para así validar e interpretar los patrones de corrientes obtenidos con datos del radar HF. No obstante, a la hora de interpretar los mapas debemos tener presente que el modelo GLOBAL no incluye mareas y que los

forzamientos de agua dulce procedentes de descargas fluviales proceden de una climatología y no de datos reales (observacionales o proporcionados por un modelo hidrológico), lo cual puede introducir ciertas discrepancias en la circulación costera.

Para los meses de julio (Figura 10a,b) y Agosto (Figura 10c,d), los patrones mensuales de circulación proporcionados por el radar HF y el modelo GLOBAL presentan bastantes similitudes. El flujo superficial parece notablemente organizado hacia el oeste (suroeste) en la subregión norte (centro-sur) del dominio común. Asimismo, se aprecia una aceleración de las corrientes (por encima de 15 cm/s) sobre la plataforma continental, de manera que la circulan de norte a sur bordeando toda la línea de costa gallega desde A Coruña hasta el norte de Portugal. Estos patrones son consistentes con el viento predominante en esta época del año, que es de componente norte, favoreciendo así el establecimiento del afloramiento costero. Por otro lado, también es cierto que el modelo GLOBAL presenta algunas estructuras (como meandros y remolinos submesoscales) en aguas abiertas que no aparecen en el campo de corrientes proporcionado por el radar HF, el cual aparece mucho más suavizado y homogéneo.

Para el mes de Noviembre (Figura 10g,h), el patrón de circulación es el típico observable durante condiciones de viento del norte y afloramiento costero, aunque en esta ocasión las velocidades de las corrientes son inferiores sobre la plataforma continental respecto a aquellas observadas durante el periodo estival (Figura 10a-d). El radar HF y el modelo GLOBAL coinciden al indicar un flujo predominantemente hacia el suroeste. Además, en ambos mapas aparece un pico de velocidad de la corriente en las inmediaciones del Cabo de Finisterre, que se propaga hacia el suroeste en forma de jet (con velocidades alrededor de 13-14 cm/s).

En cuanto a los mapas de corrientes en superficie para octubre (Figura 10e,f), se observa que son más dispares y caóticos, con multitud de meandros y estructuras de recirculación resultado de una mayor variabilidad espacio-temporal del viento en la zona. El radar HF y el modelo GLOBAL coinciden al capturar un flujo superficial hacia la costa (este) en las inmediaciones de las Rías Baixas y una estructura ciclónica (anti-horaria) en la región suroeste del dominio. Asimismo, ambos reproducen un flujo hacia el norte sobre la plataforma continental, desde Finisterre hasta la Ría de Ferrol. No obstante, podemos aseverar que en líneas generales hay diferencias notables en la dirección de la corriente, especialmente en el sector noroeste.

A tenor de estos resultados aquí expuestos, podemos concluir que, bajo unas condiciones de viento homogéneo, intenso y prolongado del norte, el parecido visual entre los mapas mensuales proporcionados por el radar HF y el modelo GLOBAL es relevante.

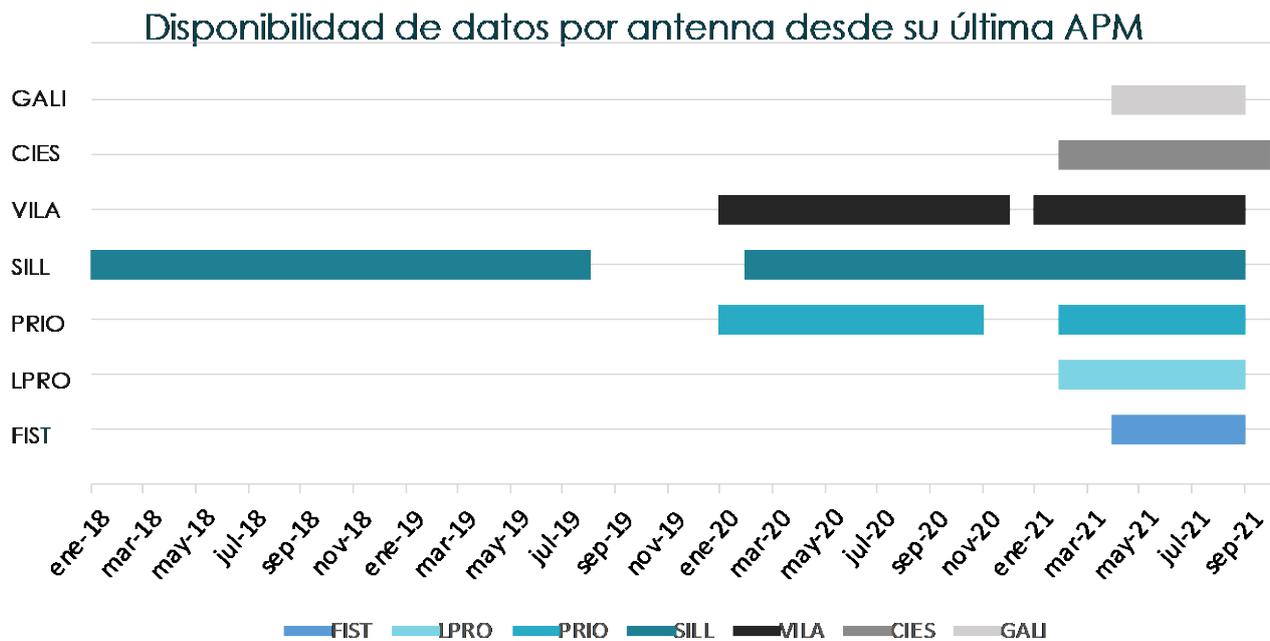
## 4. Validación Lagrangiana

Las validaciones lagrangianas se han llevado a cabo con dos tipos de boyas: las boyas GPRS para la red RAIA\_Vigo y las SPOT para la red RAIA\_NW\_Iberian. Estas boyas ya han sido descritas en los entregables 2.5 (Definición de los criterios estadísticos de validación) y 2.7 (Plan de Campañas de medidas lagrangianas) y en *Martínez-Fernández et al. (2021)*. Las validaciones se han llevado a cabo con datos de velocidades radiales *measured* horarias, es decir después de aplicar las correcciones de las APMs a los espectros y después de promediar cada hora (RAIA\_NW\_Iberian) o cada media hora (RAIA\_Vigo) según corresponda en cada red de radares, y a las velocidades totales por componentes.

### 4.1. Datos HF Radar

En la Figura 11 se puede observar el cronograma de la disponibilidad de datos de cada antena desde su última calibración de APM. El acrónimo GALI hace referencia a los datos de velocidades totales que se genera

en RAIA\_NW\_Iberian a partir de la combinación de velocidades radiales de las antenas: Vilano (VILA), Silleiro (SILL), Prior (PRIO), Leça de Palmeira (LPRO) y Fisterra (FIST). Desgraciadamente para la red RAIA\_Vigo no se pudo validar la antenna de Toralla, instalada en la ECIMAT (UVIGO), porque dos días antes de liberar las boyas GPRS en la ría el cable que unía la antenna con la electrónica sufrió un acto de vandalismo, fue robado, y la estación HF quedó inutilizada durante varios meses. Por este mismo motivo, tampoco se ha podido hacer validación de las velocidades totales de RAIA\_Vigo.



**Figura 11.** Cronograma de la disponibilidad de datos para cada antenna/site desde su última APM.

Para cada antenna, desde su última APM, y para la malla RAIA\_NW\_Iberian se han calculado para cada una de sus celdas las medias, las desviaciones estándares y percentiles (80%) temporales de las velocidades (radiales y totales) y de las propias desviaciones estándares espaciales (ESPC) y temporales (ETMP) proporcionadas por el sistema CODAR. Estos estadísticos son utilizados para etiquetar datos que puedan ser sospechosos de *outliers* y ayudar a filtrar o cribar las series de datos para cada celda de cada antenna o malla. Juntamente con la cobertura de cada antenna (desde su última APM), estas medias y desviaciones estándares temporales se pueden ver georeferenciadas en los mapas del Anexo A (sección 7).

## 4.2. Datos de boyas de deriva

Como se indica en el Entregable 2.7 se realizaron un total de 3 campañas de liberación de boyas SPOT para validar las velocidades radiales de las antenas y las velocidades totales de RAIA\_NW\_Iberian. Las campañas de liberación se hicieron en colaboración con los proyectos MyCoast (EU INTERREG Atlantic Area) y Meloá (EU Horizonte 2020), con el Instituto Español de Oceanografía (dentro de su campaña Pelacus) y con la ayuda de Gardacostas de Galicia (Tabla 1). El listado completo de boyas liberadas se puede consultar en la tabla B1 del Anexo B (sección 8).

Campaña	Colaboración	N Boyas	N Posiciones
SPOT1	Oil Spill MyCoast/MELOA	2	80 260
SPOT2	Pelacus IEO	6	97 470
SPOT3	Gardacostas Galicia	2	41 253
Total		10	218 983

**Tabla 1.** Resumen boyas SPOT liberadas para la validación.

Por otra parte, un total de 38 boyas GPRS, liberadas en dos campañas en colaboración con el Grupo de Oceanografía Física y la ECIMAT de la Universidad de Vigo, enviaron un total de 27096 posiciones GPS (Tabla 2). El listado completo de boyas liberadas se puede consultar en la Tabla B2 del Anexo B (sección 8).

Campaña	Colaboración	N Boyas	Posiciones
1	UVIGO	18	6 072
2	UVIGO	20	21 024
Total		38	27 096

**Tabla 2.** Resumen boyas SPOT liberadas para la validación.

Los números totales de posiciones GPS anteriores se corresponden con los datos brutos, sin procesamiento de ningún tipo, recogidos por las boyas SPOT y GPRS. En general, para los dos tipos de boyas, los registros de posiciones de cada boya fueron cribados en busca de datos erróneos. Concretamente se aplicaron tres criterios para cribar:

- i) eliminar datos con fechas y horas duplicadas (tolerancia de 5 segundos),
- ii) eliminar datos con velocidades superiores a 120 cm/s,
- iii) eliminar *outliers* (datos alejados de la media en más de 2 desviaciones estándares) en latitud y longitud usando ventanas móviles de 900 segundos.

Una vez cribados los registros de posición de cada boya, se calcularon las trazas medias temporales (posiciones, velocidades y desviaciones estándar asociadas) de las boyas de acuerdo con las ventanas de tiempo de medición de las antenas: boyas GPRS cada 30 minutos para antenas de RAIA\_Vigo y boyas SPOT cada hora para antenas de RAIA\_NW\_Iberian. En el Anexo B se pueden consultar los mapas en los que se presentan los datos brutos de las boyas, las posiciones cribadas, las trazas a partir de datos cribados y las trazas promediadas tanto para las boyas GPRS (sección 8.1) como para las SPOT (sección 8.2).

El último paso en el procesado de las boyas consistió en emparejar en tiempo y espacio los datos de las trazas promediadas con los datos horarios *measured* de las antenas. A cada dato de una traza promedio hay que asignarle la celda de la antena por la que está pasando en la ventana horaria correspondiente. Para ello, se usaron radios de búsqueda proporcionales a la superficie de las celdas puesto que las celdas más alejadas a la antena cubren una mayor área. Los datos de radar y boya se emparejan cuando la distancia es menor que el radio de búsqueda. Que un dato de las trazas esté dentro de una celda no implica que haya emparejamiento puesto que en esa ventana temporal la antena pudo no estar operativa o sus datos haberse cribado (por ejemplo, porque su  $VFLG > 0$ ) y etiquetado como erróneos. El emparejamiento de cada traza promedio con los datos de radar se pueden consultar en el Anexo B (secciones 8.3 a 8.7).

## 4.3. Validaciones

### 4.3.1. Filtrado de los datos emparejados

Tras el emparejamiento de los datos de boyas y radares ya se está en disposición de hacer las validaciones. Aunque el diseño de las boyas de deriva ha sido pensado para minimizar el efecto del viento y maximizar el seguimiento de la capa de agua que observan las antenas HF, lo cierto es que las boyas y las antenas no miden exactamente la misma parcela de agua ni lo hacen exactamente en los mismos tiempos. La medición de los radares en una de sus celdas se corresponde a un área, y un volumen, de agua mucho más grande que la que puedan representar varias boyas y mientras una boya puede emitir varias posiciones por minuto el radar obtiene unas pocas observaciones independientes por hora. Por lo tanto, cada uno de estos instrumentos tiene asociadas unas incertidumbres intrínsecas a sus capacidades de observación y también otras asociadas a la electrónica y a los algoritmos de procesado de la señal de dicha electrónica. Tampoco hay que olvidar que las propias corrientes presentan una variabilidad natural a escalas tanto espaciales como temporales que introducen incertidumbres en las observaciones proporcionadas por los instrumentos.

	N Pares Antena - Boyas		
	Sin Filtrar	Filtro	Filtrados
<b>GALI</b>	1116	Percentil (80%) en SD	730
<b>CIES</b>	304	Percentil (80%) en SD	201
<b>VILA</b>	311	Percentil (80%) en SD y $ Vel  > 2$ cm/s	176
<b>SILL</b>	1418	Percentil 80% en SD	873
<b>PRIO</b>	767	Percentil (80%) en SD y $ Vel  > 2$ cm/s	447
<b>LPRO</b>	202	Percentil (80%) en SD y $ Vel  > 2$ cm/s	106
<b>FIST</b>	1055	Percentil 80 en SD	596

**Tabla 3.** Número de pares de datos boya-radar generados inicialmente para cada antena/malla, filtros aplicados para reducir varianza y número de pares tras filtrar.

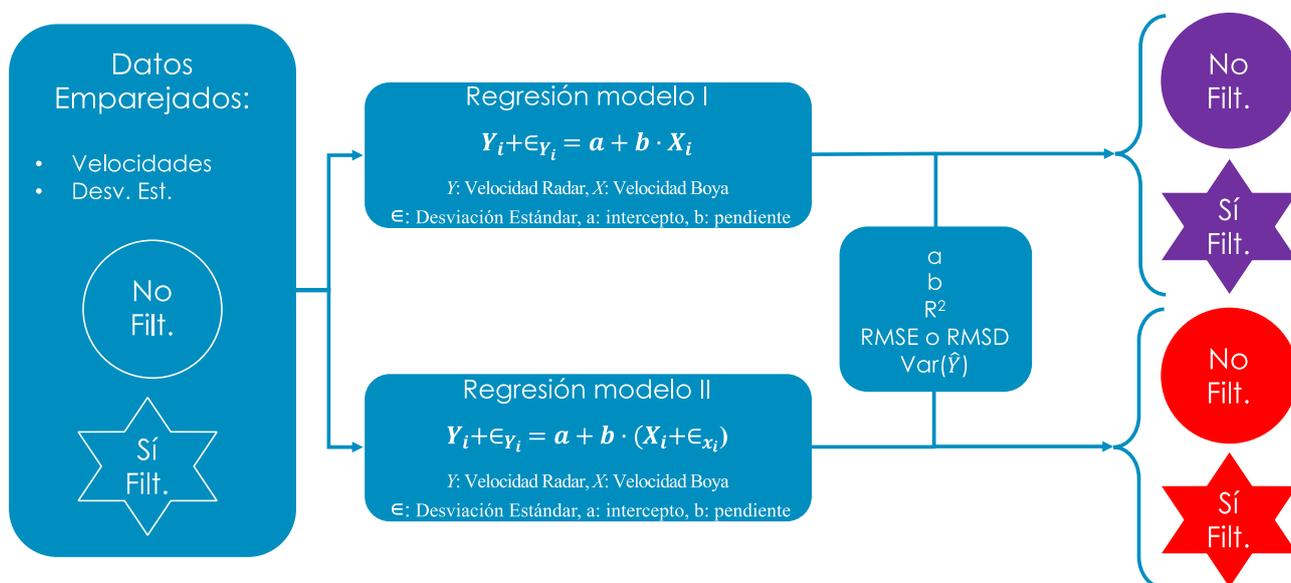
En la Tabla 3 se presentan el número de datos emparejados entre boyas y radar para cada antena o malla de velocidades totales. También, en la tercera columna, aparecen los filtros que hemos aplicado a los datos emparejados con el objetivo de reducir varianza natural, para buscar un conjunto de datos en los que las corrientes reales hayan sido lo más homogéneas posibles de manera que la comparación entre instrumentos se haga en condiciones más favorables. En general, se ha aplicado un filtro de percentil (80%) a las desviaciones estándar de las velocidades de las boyas y del radar: si alguna de las desviaciones estándar en alguno de los instrumentos es superior su percentil del 80% entonces el dato emparejado se rechaza. Si ambos instrumentos estiman una desviación estándar contenida entonces es más probable que las corrientes verdaderamente tengan una varianza espacial y temporal igualmente contenida. El 80% es arbitrario, pero nos ha permitido mantener un número de datos emparejados filtrados que no baje de la mitad del número original de datos emparejados (60% en números totales). Reducir mucho el número de datos emparejados también es contraproducente porque se reduce el rango de velocidades en el que se hace la validación.

### 4.3.2. Modelos de regresión lineal

Las validaciones se realizan tradicionalmente con regresiones lineales, concretamente con las denominadas regresiones modelo I, aquellas que suponen existencia de error sólo en la variable dependiente

puesto que la independiente está totalmente controlada. Usualmente, en las validaciones de radares HF para la observación de corrientes marinas la variable dependiente suele tomarse como las velocidades proporcionadas por el radar y la variable independiente como las velocidades de otro instrumento, boyas de deriva en el caso de validaciones lagrangianas. Sin embargo, puesto que en nuestro caso tenemos información sobre la varianza de las velocidades de las boyas de deriva y también sobre las varianzas de las velocidades del radar, nosotros añadiremos regresiones modelo II a las validaciones.

Las regresiones modelo II no sólo tienen en cuenta los errores en la variable dependiente sino también los errores en la independiente (Bevington y Robinson, 2003; Laws, 1997) y han sido usados frecuentemente en estudios alométricos en peces (Ricker, 1973). Estos modelos de regresión lineal utilizan pesos que ponderan la función de coste (la suma de cuadrados de los residuos) que al ser minimizada permite estimar la pendiente y el intercepto. Concretamente estos pesos se obtienen combinando los errores de las observaciones individuales de las variables independiente y dependiente. Aquí recurriremos a las desviaciones estándar de cada velocidad (de radar o de boya) disponibles en los datos emparejados para obtener los pesos necesarios para el modelo II (Figura 12). La implementación de estos modelos se ha hecho en Python con las ecuaciones propuestas por York et al. (2004) y evaluadas por Cantrell (2008).



**Figura 12.** Esquema del conjunto de datos disponibles, modelos de regresión usados y conjuntos de resultados (estima, estadísticos y coeficientes del ajuste) de las validaciones. La variable dependiente (Y) es la velocidad del radar y su error su desviación estándar ( $\epsilon_{Y_i} = SD(Y_i)$ ), la independiente (X) es la velocidad de la boya y su error su desviación estándar ( $\epsilon_{X_i} = SD(X_i)$ ), y las regresiones devuelven la pendiente (b) y el intercepto (a), estima de la regresión ( $\hat{Y}_i = a + b \cdot X_i$ ), el coeficiente de determinación entre la estima y los datos originales ( $R^2_{\hat{Y}}$ ), el error cuadrático medio (RMSE) y/o la diferencia cuadrática media (RMSD) y la varianza ( $Var(\hat{Y})$ ) o desviación estándar de la estima ( $SD(\hat{Y})$ ).

Partiendo de dos conjuntos de datos emparejados, sin filtrar y filtrados, y de aplicarles dos modelos de regresión distintos llegamos a obtener cuatro conjuntos de resultados de regresión, cada uno con sus estadísticos y con sus coeficientes de ajuste (Figura 12). Como ambos modelos de regresión son lineales y de una sola variable los coeficientes de la regresión son el intercepto (a) y la pendiente (b). Los estadísticos que usaremos serán el coeficiente de correlación (R, o el de determinación, R<sup>2</sup>), la varianza (y/o la desviación estándar, SD) de la estima generada por la regresión ( $Var(\hat{Y})$ ) y el error cuadrático medio (RMSE) o la diferencia cuadrática media (RMSD).

### 4.3.3. Selección de modelos de regresión: la RWSD

Para seleccionar el mejor modelo de regresión para las validaciones tenemos que elegir entre cuatro conjuntos de datos de resultados (Figura 12) para cada antena o malla. Las cuatro regresiones por antena/malla están graficadas en las Figuras C1 y C2 del Anexo C (sección 9). Necesitamos un criterio, un estadístico o métrica, que nos ayude en este cometido.

Podemos comenzar refrescando las expresiones para el error (*RMSE*) y la diferencia cuadrática media (*RMSD*). Recordemos, siendo  $E(Y)$  la media de  $Y$ , que:

$$RMSE^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (1)$$

$$RMSD^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left( (\hat{Y}_i - E(\hat{Y})) - (Y_i - E(Y)) \right)^2 \quad (2)$$

$$RMSD^2 = RMSE^2 - \left( E(\hat{Y}) - E(Y) \right)^2 \quad (3)$$

En el caso de regresiones lineales de una sola variable se cumple que  $E(Y) = E(\hat{Y})$  y, por lo tanto, llegamos a que  $RMSD = RMSE$  para nuestros modelos de regresión. Por otra parte, desarrollando ( 2 ) obtendremos

$$RMSD^2 = Var(\hat{Y}) + Var(Y) - 2 \cdot SD(\hat{Y}) \cdot SD(Y) \cdot R_{Y\hat{Y}} \quad (4)$$

De esta manera vemos que la ecuación ( 4 ) relaciona los tres estadísticos en cuestión, la diferencia cuadrática media, la varianza de la estima y el coeficiente de correlación. Incluye, además, la varianza de los datos originales. La *RMSD* suele utilizarse como uno de los criterios más importantes para elegir la regresión que mejor ajusta los datos, a menor *RMSD* mejor desempeño de la regresión. Por ejemplo, en los diagramas de Taylor (*Taylor, 2001*) frecuentemente usados para comparar el desempeño de distintos modelos frente a datos de referencia utilizan la ecuación ( 4 ) para mostrar el *RMSD* de cada modelo en función de  $SD(\hat{Y})$  y  $R_{Y\hat{Y}}$  (*Jolliff et al., 2009*). En estos diagramas el modelo que mejor desempeña suele elegirse como aquel que menor *RMSD* tiene y, además, está más cercano a la desviación estándar de los datos de referencia ( $SD(Y)$ ).

Las regresiones modelo I estiman la pendiente y el intercepto que minimizan el *RMSE* o, en nuestro caso, el *RMSD* ya que son iguales. Evaluando los términos que hay a la derecha de la ecuación ( 4 ) vemos que la  $Var(Y)$  (y la  $SD(Y)$ ) ya viene impuesta por los datos de origen, la regresión no puede modificarla. Por otra parte, en una regresión lineal de una sola variable  $R_{Y\hat{Y}} = R_{YX}$  así que tampoco puede modificarse, el coeficiente de correlación también viene dado por los datos originales con los que se calcula la regresión. La única manera que tiene la regresión modelo I de minimizar la *RMSD* es variando la varianza de la estima,  $Var(\hat{Y})$ , el único término de ( 4 ) que depende de la propia regresión. De nuevo, como es una regresión lineal de una sola variable, el intercepto no influye en la varianza de la estima, sólo la pendiente puede cambiar la  $Var(\hat{Y})$  y, por lo tanto, la *RMSD* de la regresión.

Normalmente, con  $R_{Y\hat{Y}} > 0$ , el modelo I la regresión tiende a disminuir la pendiente para así bajar la varianza de la estima  $y$ , en consecuencia, minimizar la *RMSD*. Esta tendencia se acrecienta cuando el coeficiente de correlación es bajo y positivo porque, al restar en ( 4 ), deja de contribuir a la disminución de la *RMSD*. Otra consecuencia es que al disminuir mucho la varianza de la estima ésta se aleja mucho del valor de la varianza original, i.e.  $Var(\hat{Y}) \ll Var(Y)$  y  $SD(\hat{Y}) \ll SD(Y)$ . Cuando hay coeficientes de correlación bajos (positivos) el modelo de regresión I proporciona pendientes bajas, desviaciones estándar de la estima bajas  $y$ , normalmente, alejadas de la *SD* original.

Cuando el  $R$  es alto (y positivo) su contribución negativa en ( 4 ) hace disminuir la *RMSD* y también activa la contribución negativa de  $SD(\hat{Y})$ . Como  $Var(\hat{Y}) = SD^2(\hat{Y})$ , la regresión modelo I con  $R$  altos no puede disminuir tanto la  $Var(\hat{Y})$  porque la  $SD(\hat{Y})$  dejaría de contribuir a la reducción de la *RMSD*. Cuando  $R^2=1$  la regresión es perfecta, tendremos que  $SD(\hat{Y}) = SD(Y)$  y  $RSMD=0$ .

Selección de regresiones con RMSD							
Antena	Regresión	Pendiente	Intercepto	R <sup>2</sup>	N	RMSD	RWSD
PRIO	MI_f	0.198 (±0.027)	+2.169 (±0.501)	0.11	447	10.60	8.36
VILA	MII	0.047 (±0.007)	+0.482 (±0.168)	0.11	311	2.58	1.86
FIST	MI_f	0.217 (±0.029)	+1.714 (±0.423)	0.09	596	10.22	8.28
SILL	MI_f	0.212 (±0.021)	+0.578 (±0.334)	0.11	873	9.83	7.81
LPRO	MII	0.427 (±0.016)	-1.218 (±0.344)	0.21	202	9.67	4.95
GALI_vx	MI_f	0.383 (±0.022)	-1.503 (±0.380)	0.29	730	10.24	7.07
GALI_vy	MI	0.304 (±0.019)	-0.553 (±0.399)	0.18	1116	12.50	9.27
CIES	MI	0.401 (±0.056)	+11.949 (±0.654)	0.14	304	9.94	7.60

**Tabla 4.** Modelos de regresión elegidos por antena según el criterio de *RMSD* (ec. ( 4 )) más bajo. En la columna Regresión se especifica la regresión elegida para la antena en cuestión: MI y MII indican modelo I y II de regresión respectivamente, MI\_f y MII\_f igual pero para datos emparejados filtrados. Tanto el intercepto como la *RMSD* y la *RWSD* tienen unidades de cm/s. Todas las regresiones son significativas al 99%.

Lo ideal es que el modelo de regresión elegido tenga una *RMSD* baja pero que la varianza de su estima no se aleje mucho de la varianza original. Esto con el modelo I es difícil de conseguir cuando los  $R^2$  son bajos  $y$ , como podemos observar en las tablas 4 y 5, los coeficientes de determinación bajos son la tónica general en todas las regresiones hechas. Para contrarrestar el efecto de disminución de  $Var(\hat{Y})$  y su alejamiento de la varianza de los datos originales ( $Var(Y)$ ) hemos planteado un criterio de selección de modelo de regresión para las validaciones que se basa en un nueva métrica: la diferencia cuadrática ponderada (Root Weighted Square Difference, *RWSD*):

$$RWSD^2 = (SD(\hat{Y}) - SD(Y))^2 \cdot w_V + RMSD^2 \cdot w_R \quad (5)$$

con  $w_V + w_R = 1$  y que puede expandirse a

$$RWSD^2 = Var(\hat{Y}) + Var(Y) - 2 \cdot SD(\hat{Y}) \cdot SD(Y) \cdot (w_V + R_{Y\hat{Y}} \cdot w_R) \quad (6)$$

cuyo mínimo, en función de  $Var(\hat{Y})$ , es

$$\min\{RWSD^2\} = Var(Y) \cdot (1 - (w_V + R_{Y\hat{Y}} \cdot w_R)^2) \quad (7)$$

que se produce cuando

$$SD(\hat{Y}) = SD(Y) \cdot (w_V + R_{Y\hat{Y}} \cdot w_R) \quad (8)$$

Viendo ( 7 ) y ( 8 ) podemos deducir que si hacemos  $w_V=0.75$  ( $w_R=0.25$ ) la desviación estándar de la estima será siempre (con  $R_{Y\hat{Y}} > 0$ ) igual o mayor que el 75% de la desviación estándar de los datos originales. Así nuestra *RWSD* elegida finalmente es:

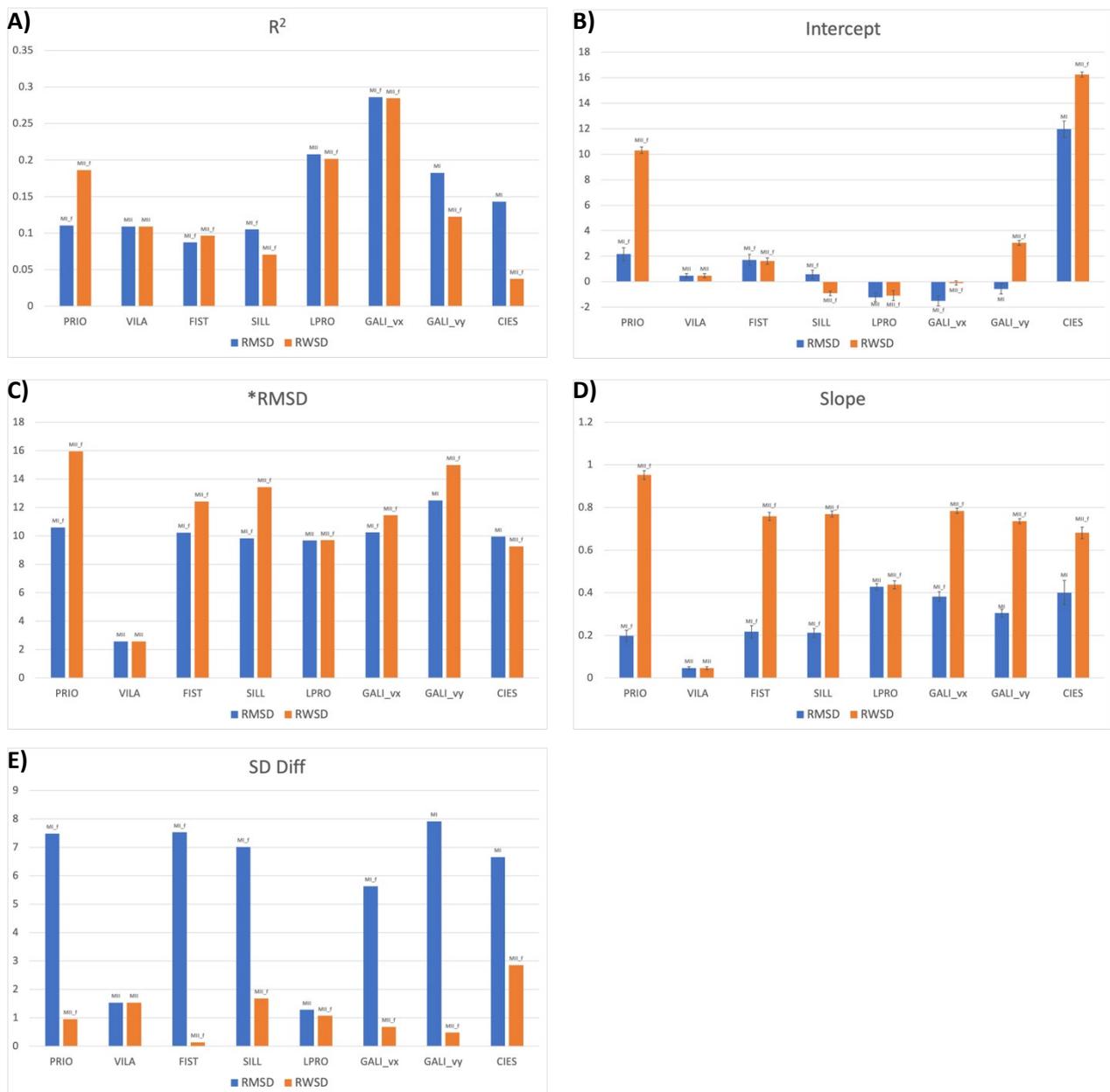
$$RWSD^2 = Var(\hat{Y}) + Var(Y) - 2 \cdot SD(\hat{Y}) \cdot SD(Y) \cdot (0.75 + R_{Y\hat{Y}} \cdot 0.25) \quad (9)$$

Selección de regresiones con <i>RWSD</i>							
Antena	Regresión	Pendiente	Intercepto	R <sup>2</sup>	N	RMSD	RWSD
<b>PRIO</b>	MII_f	0.953 (±0.021)	+10.296 (±0.262)	0.19	447	15.96	8.01
<b>VILA</b>	MII	0.047 (±0.007)	+0.482 (±0.168)	0.11	311	2.58	1.86
<b>FIST</b>	MII_f	0.758 (±0.019)	+1.638 (±0.245)	0.10	596	12.42	6.21
<b>SILL</b>	MII_f	0.769 (±0.014)	-0.896 (±0.178)	0.07	873	13.43	6.87
<b>LPRO</b>	MII_f	0.438 (±0.019)	-1.078 (±0.382)	0.20	106	9.69	4.91
<b>GALI_vx</b>	MII_f	0.784 (±0.012)	-0.106 (±0.163)	0.28	730	11.45	5.75
<b>GALI_vy</b>	MII_f	0.736 (±0.011)	+3.045 (±0.191)	0.12	719	14.99	7.50
<b>CIES</b>	MII_f	0.681 (±0.027)	+16.237 (±0.197)	0.04	201	9.26	5.24

**Tabla 5.** Modelos de regresión elegidos por antena según el criterio de *RWSD* (ec. ( 9 )) más bajo. En la columna Regresión se especifica la regresión elegida para la antena en cuestión: MI y MII indican modelo I y II de regresión respectivamente, MI\_f y MII\_f igual pero para datos emparejados filtrados. Tanto el intercepto como la RMSD y la RWSD tienen unidades de cm/s. Todas las regresiones son significativas al 99%.

En la Tabla 5 aparece el listado de regresiones seleccionadas, según la *RWSD* más baja, para cada antena/malla y en la Figura 13 se recoge la comparativa de forma gráfica con el listado de la Tabla 4 (criterio de *RMSD* más bajo). Como se esperaba, el criterio *RMSD* (Tabla 4) elige casi siempre, excepto en dos antenas (Vilán y Leça de Palmeira) las regresiones modelo I. Cuando se incluye en el criterio que la desviación estándar de la estima no se distancie más de un 25% de la de los datos originales entonces las regresiones modelo II son seleccionadas mayoritariamente y sólo la antena de Vilán no elige la regresión con datos filtrados (Tabla 5). Incluyendo ambas tablas, el coeficiente de determinación más alto no llega a 0.3 (Figura 13A). Excepto en un caso (componente X de la velocidad total de RAIA\_NW\_Iberian) los interceptos aumentan (en valor absoluto) al pasar de criterio *RMSD* a *RWSD* (Figura 13B) y el propio *RMSD* es casi siempre más alto al usar *RWSD* como criterio de selección (Figura 13C). En contrapartida, las pendientes (Figura 13D) son más altas y cercanas a 1 (lo ideal para una validación perfecta) y, como se espera del nuevo criterio de selección, las

diferencias entre las desviaciones estándar de la estima y de los datos originales disminuye ampliamente en todos los casos menos uno (Leça de Palmeira).



**Figura 13.** Resultados de las regresiones elegidas para cada antena/malla según el mínimo *RMSD* (barras azules, ec. ( 4 )) o el mínimo *RWSD* (barras naranjas, ec. ( 9 )), las etiquetas en las columnas indican la regresión elegida: MI y MII indican modelo I y II de regresión respectivamente; MI\_f y MII\_f igual pero para datos emparejados filtrados. A) Coeficiente de determinación, B) intercepto (cm/s), C) *RMSD* (cm/s), D) pendiente y E) valor absoluto de la diferencia entre las desviaciones estándar de los datos de partida y de la estima de la regresión (cm/s).

#### 4.3.4. Validaciones seleccionadas por antena/malla

*Cies*. Modelo II con datos filtrados (Figura C1B, línea azul). El  $R^2$  es muy bajo (0.04) indicando que la regresión es baja (explica una parte pequeña de la varianza en los datos originales), la pendiente moderada (0.681), el intercepto alto (16.24 cm/s) y el *RMSD* moderado (9.26 cm/s). El mayor inconveniente de

esta calibración parece ser el poco rango de velocidades usado en la calibración, en parte de ahí su bajo  $R^2$ , debido a que sólo se hicieron dos liberaciones de boyas, en dos días que el mar estaba muy calmo y, por lo tanto, no se muestreó una gran variedad de situaciones oceanográficas.

*Prior.* Modelo II con datos filtrados (Figura C1D, línea azul). El  $R^2$  es bajo (0.19) indicando que la regresión no es alta, la pendiente alta (0.95), el intercepto moderado (10.30 cm/s) y el *RMSD* alto (15.96 cm/s). La validación, teniendo en cuenta que  $R^2$  es bajo, es en general buena, aunque su intercepto y *RMSD* son moderados/altos y presenta muchos datos acumulados paralelamente al eje-X a bajos valores del eje-Y.

*Vilán.* Modelo I con datos sin filtrar (Figura C1F, línea naranja). El  $R^2$  es bajo (0.11) indicando que la regresión no es alta, la pendiente es muy baja (0.05), el intercepto muy bajo (0.48 cm/s) y el *RMSD* muy bajo (2.58 cm/s). La validación no es la esperada ni compara bien con el resto de validaciones: la regresión no baja, pero es significativa y también lo son la pendiente y el intercepto que nos indican que no hay relación alguna entre las velocidades observadas por el radar y las aportadas por las boyas de deriva.

*Fisterra.* Modelo II con datos filtrados (Figura C1H, línea azul). El  $R^2$  es bajo (0.10) indicando que la regresión no es alta, la pendiente es alta (0.76), el intercepto muy bajo (1.64 cm/s) y el *RMSD* moderado (12.42 cm/s). En general, para su baja regresión, presenta una buena validación.

*Silleiro.* Modelo II con datos filtrados (Figura C2B, línea azul). El  $R^2$  es muy bajo (0.07) indicando que la regresión no es alta, la pendiente es alta (0.77), el intercepto muy bajo (-0.90 cm/s) y el *RMSD* moderado (13.43 cm/s). En general, para su baja regresión y la acumulación de datos paralelamente al eje-X a bajos valores de eje-Y, presenta una buena validación.

*Leça de Palmeira.* Modelo II con datos filtrados (Figura C2D, línea azul). El  $R^2$  es bajo (0.20) indicando que la regresión es baja, la pendiente es baja (0.44), el intercepto muy bajo (-1.08 cm/s) y el *RMSD* bajo (9.69 cm/s). La validación no es la esperada ni compara bien con el resto de validaciones: la regresión es baja, pero es significativa y también lo son la pendiente y el intercepto que nos indican que la relación entre las velocidades observadas por el radar y las aportadas por las boyas de deriva es baja (0.44 de pendiente). La validación está hecha con pocos datos, hay muchos datos acumulados paralelos al eje-X a bajos valores en el eje-Y y, demás, esto es extremadamente marcado a valores negativos del eje-X.

*Componente X de RAIA\_NW\_Iberian.* Modelo II con datos filtrados (Figura C2F, línea azul). El  $R^2$  es moderado (0.28) indicando que la regresión también moderada, la pendiente es alta (0.78), el intercepto muy bajo (-0.11 cm/s) y el *RMSD* bajo (11.45 cm/s). En general, presenta una buena validación.

*Componente Y de RAIA\_NW\_Iberian.* Modelo II con datos filtrados (Figura C2H, línea azul). El  $R^2$  es bajo (0.12) indicando que la regresión no es alta, la pendiente es alta (0.74), el intercepto bajo (3.04 cm/s) y el *RMSD* alto (14.99 cm/s). En general, presenta una buena validación para su  $R^2$  y su *RMSD* alta.

## 5. Conclusiones

A grandes rasgos, desde el punto de vista de las validaciones eulerianas, el funcionamiento de los sistemas de radar HF desplegado en Galicia-Norte de Portugal ha mostrado ser razonablemente consistente en las inmediaciones de la boya de Silleiro, no así en los alrededores de la boya de Vilán. Mientras que las estaciones situadas más al sur (Fisterra, Silleiro, mostradas en la Figura 1) funcionan dentro de unos márgenes de calidad estándar, las dos estaciones situadas más al norte (Vilán y Prior) aparentemente no están operando al mismo nivel de precisión. Las validaciones lagrangianas corroboran el comportamiento general razonable de las velocidades totales en RAIA\_NW\_Iberian y apuntan a una mayor pérdida de calidad en la

antena de Vilán que en la de Prior. Por ello, se recomiendan análisis complementarios. De hecho, ya se han reprocesado datos históricos de estas dos antenas usando la última calibración o AMP realizada y puesta en operacional a finales de 2021. Para el presente entregable, debido al muy reciente reprocesamiento, no ha dado tiempo a recalculer las validaciones con los datos reprocesados.

La validación lagrangiana de datos de corrientes proporcionados por las otras dos antenas, Leça de Palmeira y Cíes, arrojan unas métricas estadísticas dudosas que podrían estar relacionadas con un número bajo de observaciones para tener un rango de velocidades mínimo en las regresiones. O, por el contrario, podrían estar indicando realmente una pérdida en su nivel de prestaciones en los momentos en los que las boyas de deriva pasaron por sus áreas de cobertura.

También debemos recalcar que las comparaciones entre dos instrumentos presentan ciertas limitaciones asociadas a las diferencias intrínsecas en el funcionamiento de cada sensor, así como en la profundidad nominal de las medidas de corrientes proporcionadas por cada sensor. Por tanto, una fracción de las discrepancias radar-boya observadas se puede explicar en términos de diferentes estrategias espacio-temporales de muestreo y promediado (*Ohlmann et al., 2007*). Por un lado, el radar proporciona valores promediados horizontalmente para cada celda de la malla mientras que las boyas suministran valores puntuales representativos de un lugar específico. Por otro lado, en las boyas fondeadas, hay una clara disparidad en las escalas verticales ya que estas boyas miden a unos 3.5 metros de profundidad mientras que las 4 estaciones de radar gallegas de RAIA\_NW\_Iberian y la quinta estación del norte de Portugal proporcionan, respectivamente, estimaciones radiales que son representativas una capa de 2 metros y 1 metro de profundidad.

Otra porción de las discrepancias observadas en las estimaciones de corrientes se puede atribuir, además, a una serie de factores tales como interferencias, calibraciones, fallos de hardware, contribuciones de diversos procesos como la deriva de Stokes, la deriva de Ekman, la baroclinicidad o estratificación en la columna de agua (*Laws et al., 2003; Kohut et al., 2006*).

## 6. Referencias

- Alfonso, M., Álvarez-Fanjul, E., López, J.D.: Comparison of CODAR SeaSonde HF Radar operational waves and currents measurements with Puertos del Estado buoys. *Final Internal Report of Puertos del Estado*, p. 32, 2006.
- Bevington, P. R., and D. K. Robinson: *Data reduction and error analysis for the physical sciences*, 3 ed., 320 pp., McGraw-Hill, New York, 2003.
- Cantrell, C. A.: Technical Note: Review of methods for linear least-squares fitting of data and application to atmospheric chemistry problems. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(17), 5477-5487, 2008.
- Chapman, R.D. and Graber, H.C.: Validation of HF radar measurements. *Oceanography*, Vol. 10(2), pages 76–79, 1997.
- De Paolo, T., Terril, E., and Kirincich, A.: Improving SeaSonde radial velocity accuracy and variance using radial metrics, *IEEE Oceans 2015*, Genova, Italy, 1–9, 2015.
- Emery, W.J. and Thomson, R.E.: *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier Science, ISBN 9780080477008, 654 pages, Amsterdam, 2001.
- Graber, H.V., Haus, B.K., Shay, L.K. and Chapman, R.F.: HF radar comparisons with moored estimates of current speed and direction: Expected differences and implications. *Journal of Geophysical Research*, 102(C08), 18, pages 749–766, 1997.
- Jolliff, J. K., J. C. Kindle, I. Shulman, B. Penta, M. A. M. Friedrichs, R. Helber, and R. A. Arnone: Summary diagrams for coupled hydrodynamic-ecosystem model skill assessment. *Journal of Marine Systems*, 76(1-2), 64-82, 2009.
- Kaplan, D.M., Largier, J. and Botsford, L.W.: HF radar observations of surface circulation off Bodega Bay (northern California, USA). *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110(C10), pages 1-25, 2005.
- Kohut, J., Roarty, H.J. and Glenn, S.: Characterizing Observed Environmental variability with HF Doppler radar surface mappers and Acoustic Doppler Current Profilers: Environmental variability in the Coastal Ocean. *Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 31(4), pages 876-884, 2006.
- Laws, E. A. : *Mathematical methods for oceanographers: An introduction*, 1 ed., 343 pp., John Wiley and Sons, Inc., New York, 1997.
- Laws, K.E, Paduan, J.D. and Fernandez, D.M.: Effect of Stokes drift on HF radar measurements. *Radiowave Oceanography the First International Workshop*, University of Miami, Rosentiel School of Marine and Atmospheric Science, pages 49-55, 2003.
- Lellouche, J.-M., Greiner, E., Le Galloudec, O., Garric, G., Regnier, C., Drevillon, M., Benkiran, M., Testut, C.-E., Bourdalle-Badie, R., Gasparin, F., Hernandez, O., Levier, B., Drillet, Y., Remy, E., and Le Traon, P.-Y.: Recent updates to the Copernicus Marine Service global ocean monitoring and forecasting real-time 1/12° high-resolution system. *Ocean Sci.*, Vol. 14, 1093–1126, <https://doi.org/10.5194/os-14-1093-2018>, 2018.
- Lorente, P., Piedracoba, S. and Álvarez-Fanjul, E.: Validation of high-frequency radar ocean surface current observations in the NW of the Iberian Peninsula. *Cont. Shelf Res.*, Vol. 92, 1–15, 2015.
- Lorente, P., García-Sotillo, M., Amo-Baladrón, A., Aznar, R., Levier, B., Sánchez-Garrido, J. C., Sammartino, S., de Pascual-Collar, Á., Reffray, G., Toledano, C., and Álvarez-Fanjul, E.: Skill assessment of global, regional, and coastal circulation forecast models: evaluating the benefits of dynamical downscaling in IBI (Iberia–Biscay–Ireland) surface waters. *Ocean Sci.*, Vol. 15, 967–996, <https://doi.org/10.5194/os-15-967-2019>, 2019.
- Lorente, P., Piedracoba, S., Montero, P., Sotillo, M.G., Ruiz, M.I. and Álvarez-Fanjul, E.: Comparative Analysis of Summer Upwelling and Downwelling Events in NW Spain: A Model-Observations Approach. *Remote Sens.*, Vol. 12, 2762, 2020.
- Matínez-Fernández, A., Redondo-Caride, W., Alonso-Pérez, F., Piedracoba, S., Lorente, P., Montero, P., Torres-López, S., Fernández-Baladrón, A., Varela, R.A., Velo, A., and Gilcoto, M.: SPOT and GPRS drifting buoys for HF Radar validation. *MARTECH 2021*, Marine Technology Workshop, 17-19 June, Vigo, Spain, 2021.

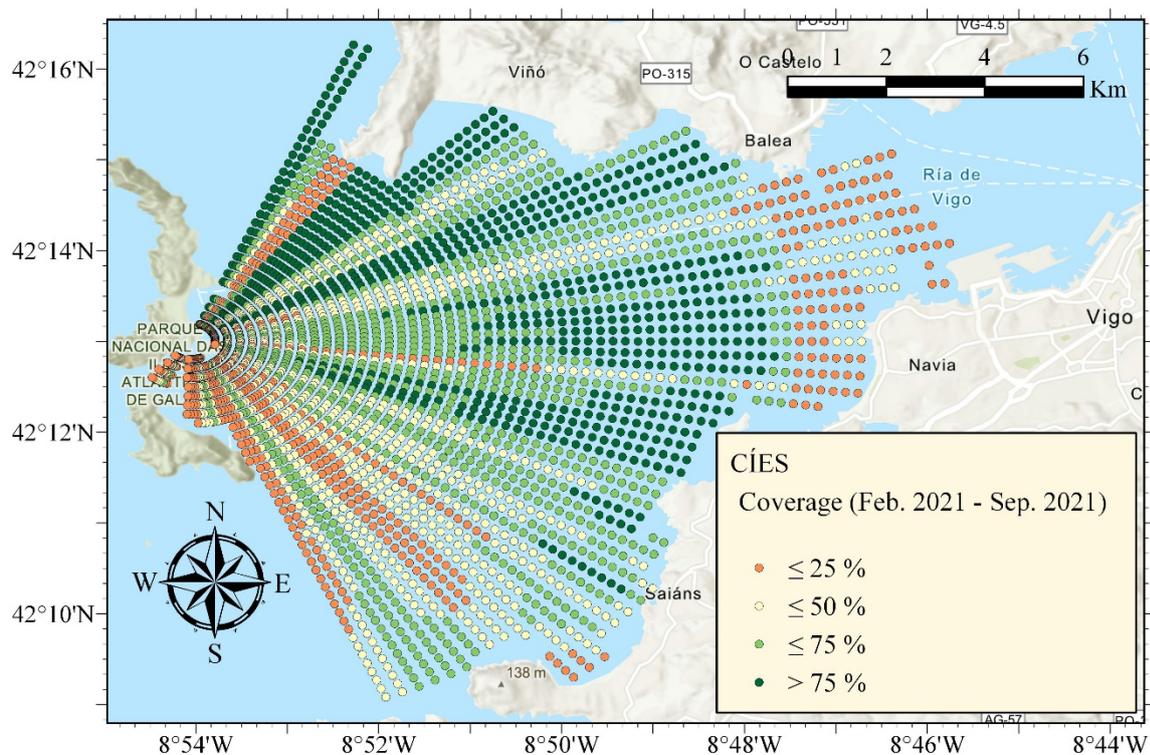
- Ohlmann, C., White, P., Washburn, L., Terril, E., Emery, B. and Otero, M.: Interpretation of coastal HF radar-derived currents with high-resolution drifter data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 24, pages 666-680, 2007.
- Roarty, H., Smith, M., Kerfoot, J., Kohut, J., and Glenn, S.: Automated Quality Control of High Frequency Radar Data. *IEEE Oceans 2012*, 1–7, 2012.
- Taylor, K. E.: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192, 2001.
- York, D., N. M. Evensen, M. L. Martínez, and J. De Basabe Delgado: Unified equations for the slope, intercept, and standard errors of the best straight line, *American Journal of Physics*, 72(3), 367-375, 2004.

## 7. Anexo A. Mapas de estadísticas para los radares HF

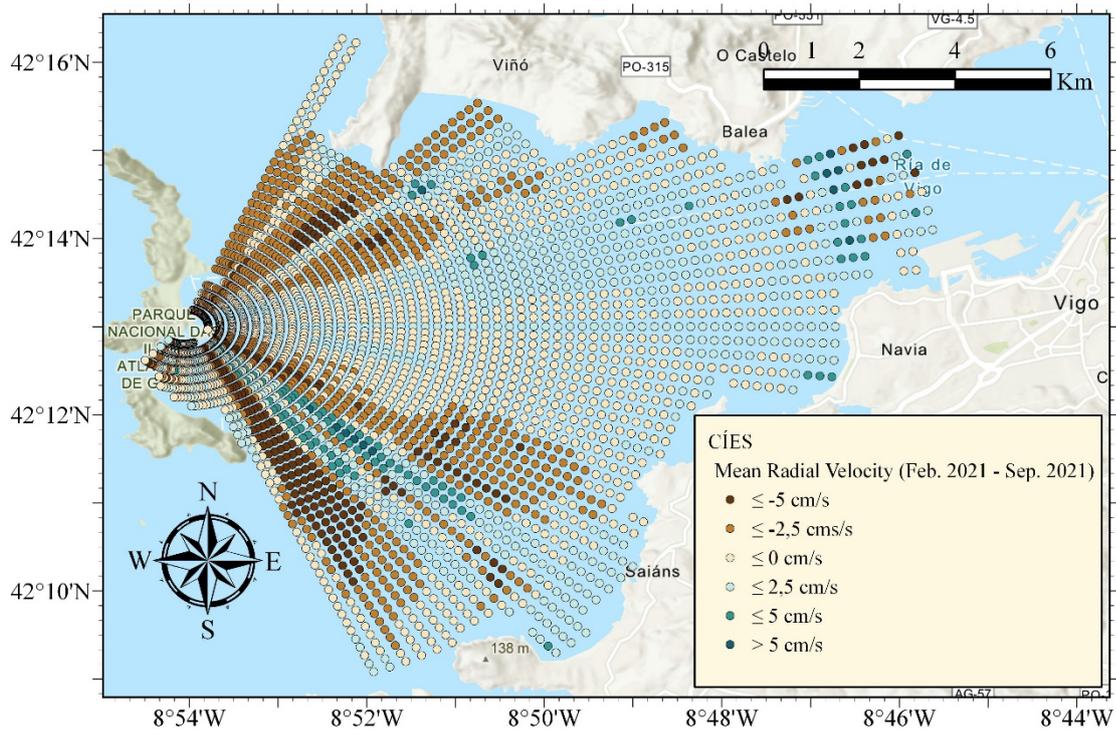
### 7.1. Radiales *measured* de la antena de Cíes (CIES)

	RV	SD RV	ESPC	SD ESPC	ETMP	SD ETMP
<b>Media (cm/s)</b>	1.09	14.55	8.87	8.77	7.95	7.50

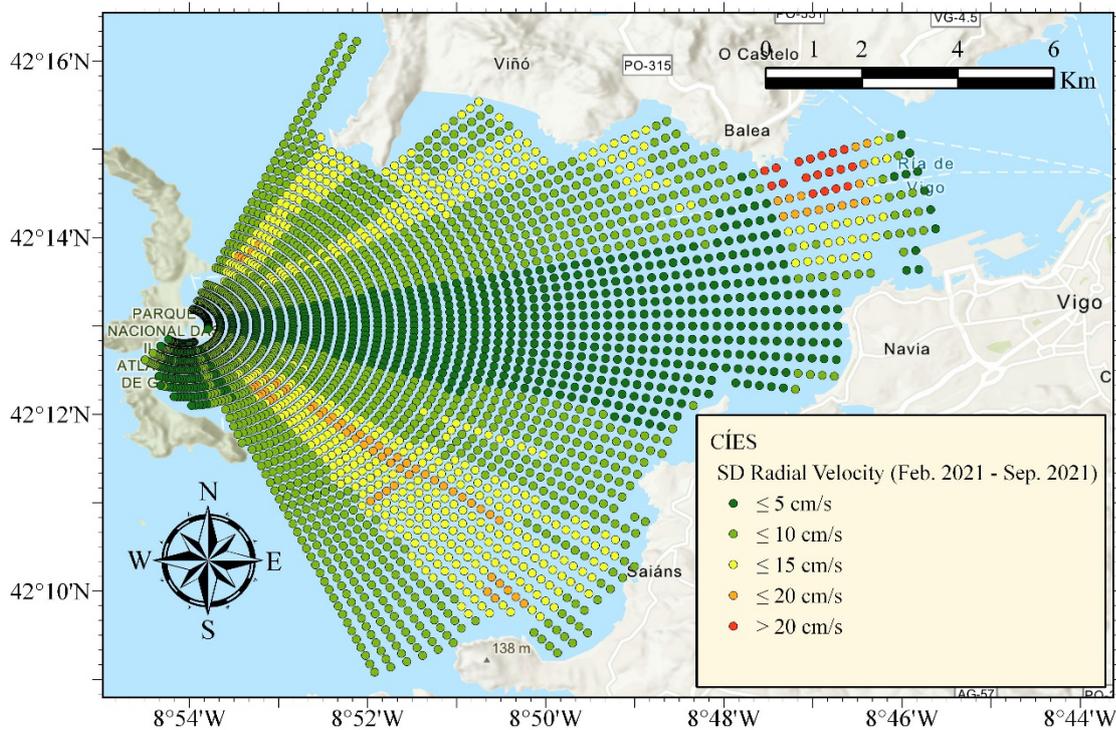
**Tabla A1.** Medias espaciales, calculadas para todo el conjunto de celdas de la antena de Cíes, de: media temporal de las velocidades radiales (RV) en cada celda (Figura A2), desviación estándar temporal de RV (SD RV) en cada celda (Figura A3), media temporal de la desviación estándar espacial (ESPC) en cada celda (Figura A4), desviación estándar temporal de ESPC para cada celda (Figura A5), media temporal de la desviación estándar temporal (ETMP) para cada celda (Figura A6) y desviación estándar temporal de ETMP (SD ETMP) para cada celda (Figura A7).



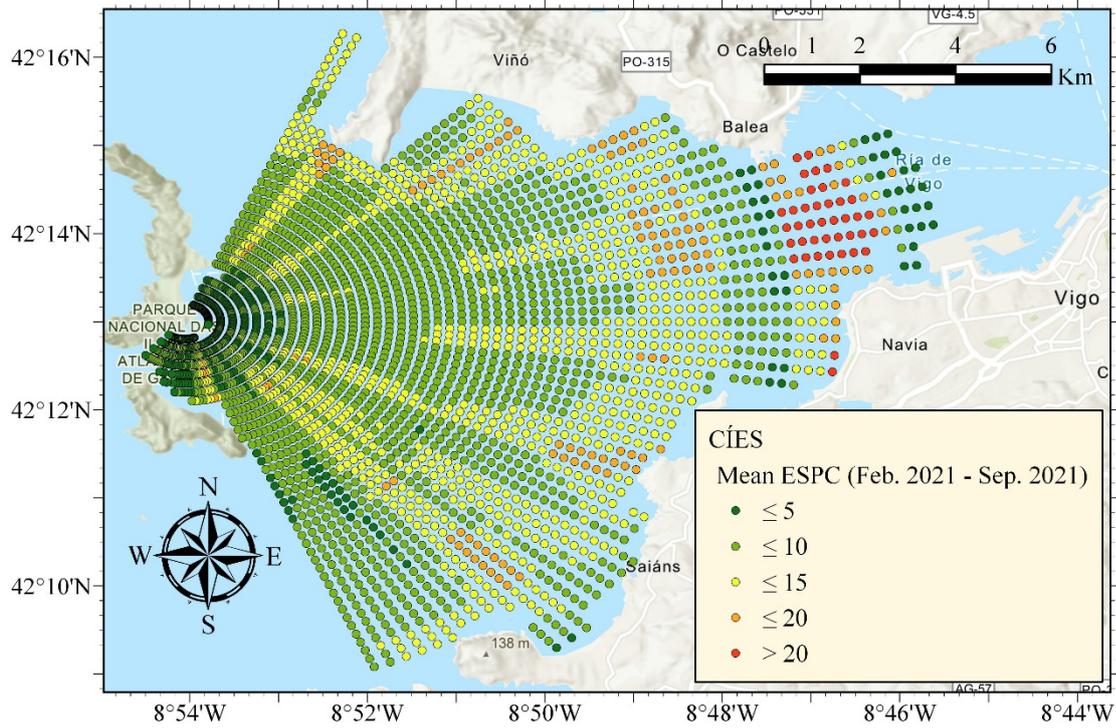
**Figura A1.** Cobertura (Coverage) en cada celda de medición del radar situado en Cíes para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y septiembre de 2021.



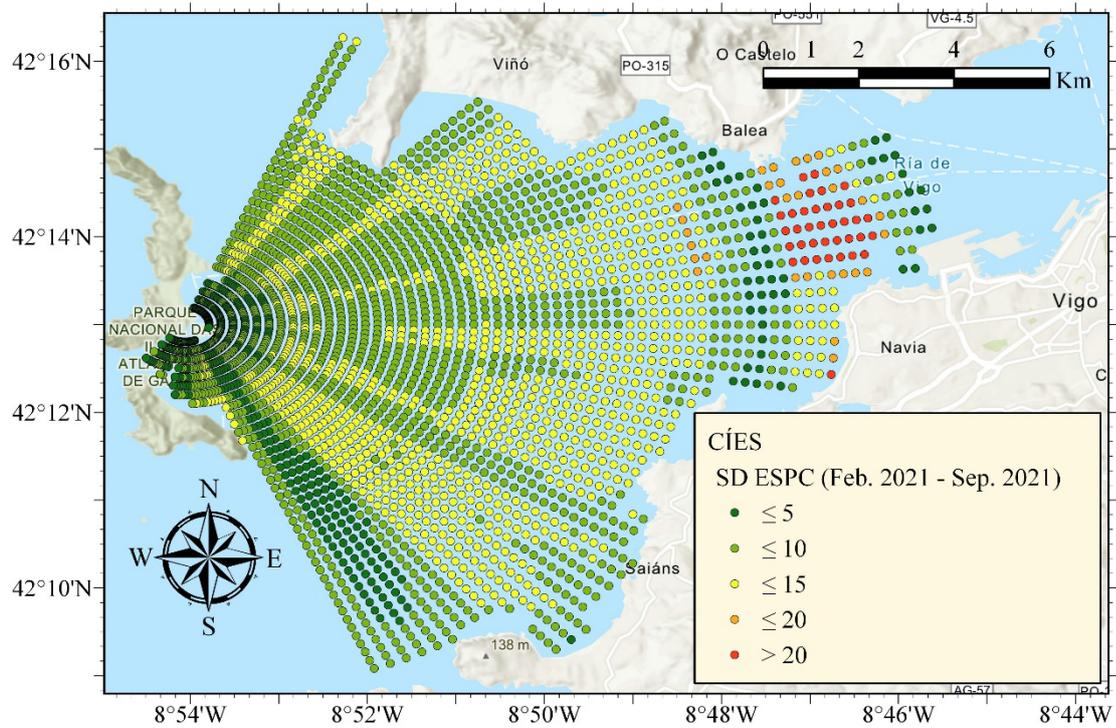
**Figura A2.** Media temporal de la *Velocidad radial* (Radial Velocity) en cada celda de medición del radar situado en Cíes para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y septiembre de 2021.



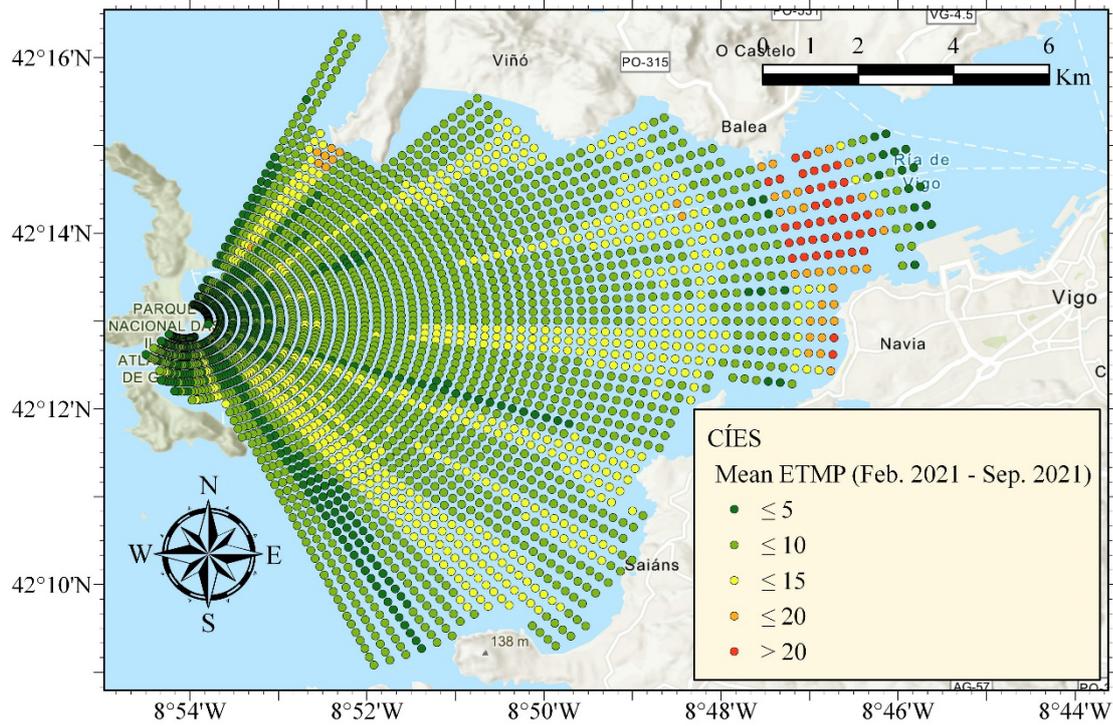
**Figura A3.** Desviación estándar temporal de la *Velocidad radial* (Radial Velocity) en cada celda de medición del radar situado en Cíes para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y septiembre de 2021.



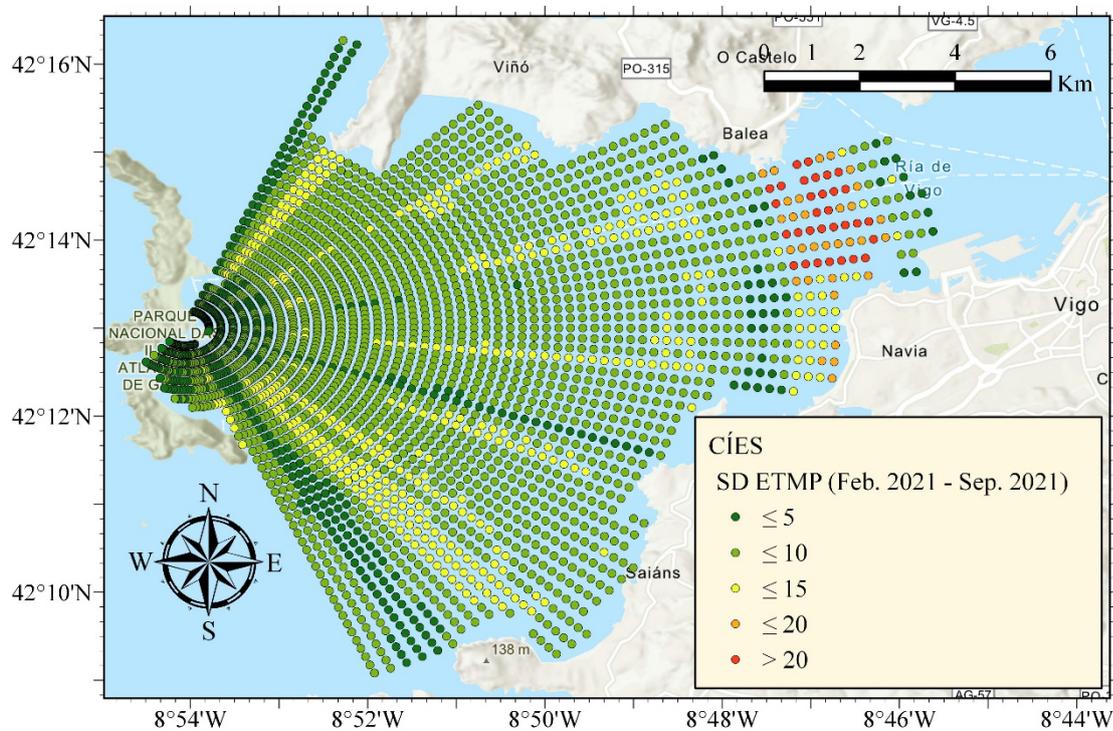
**Figura A4.** Media temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Cíes para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y septiembre de 2021.



**Figura A5.** Desviación estándar temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Cíes para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y septiembre de 2021.



**Figura A6.** Media temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Cíes para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y septiembre de 2021.

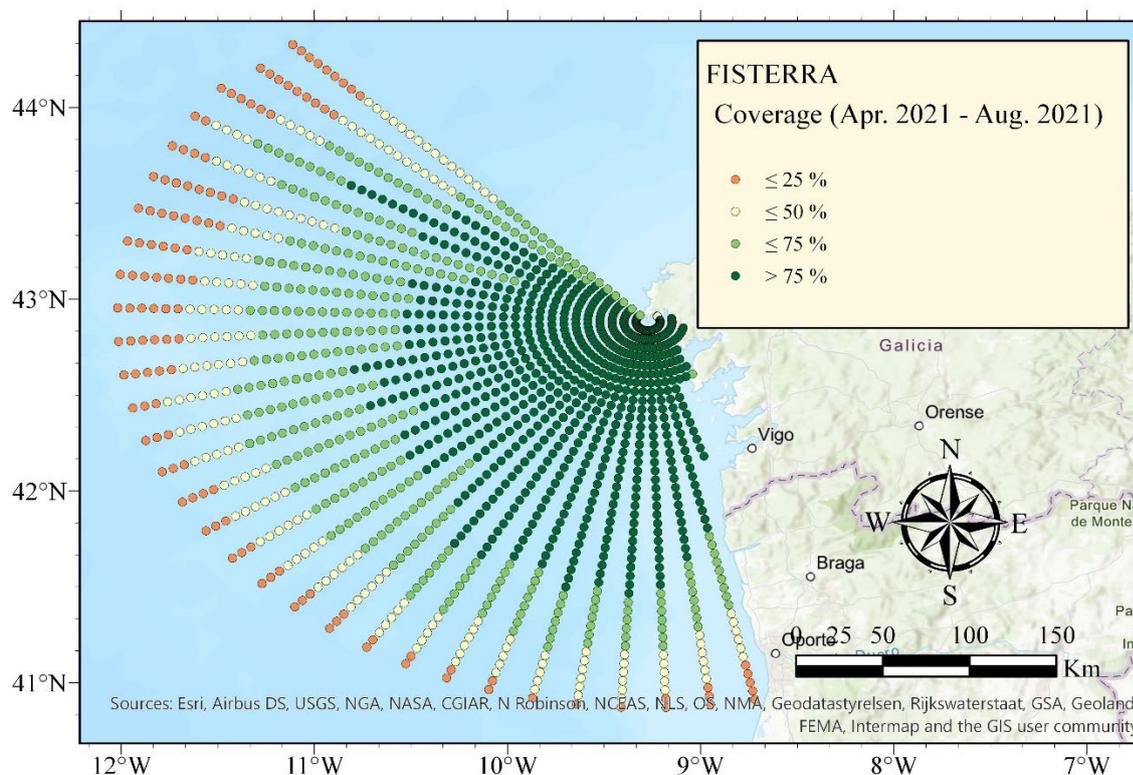


**Figura A7.** Desviación estándar temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Cíes para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y septiembre de 2021.

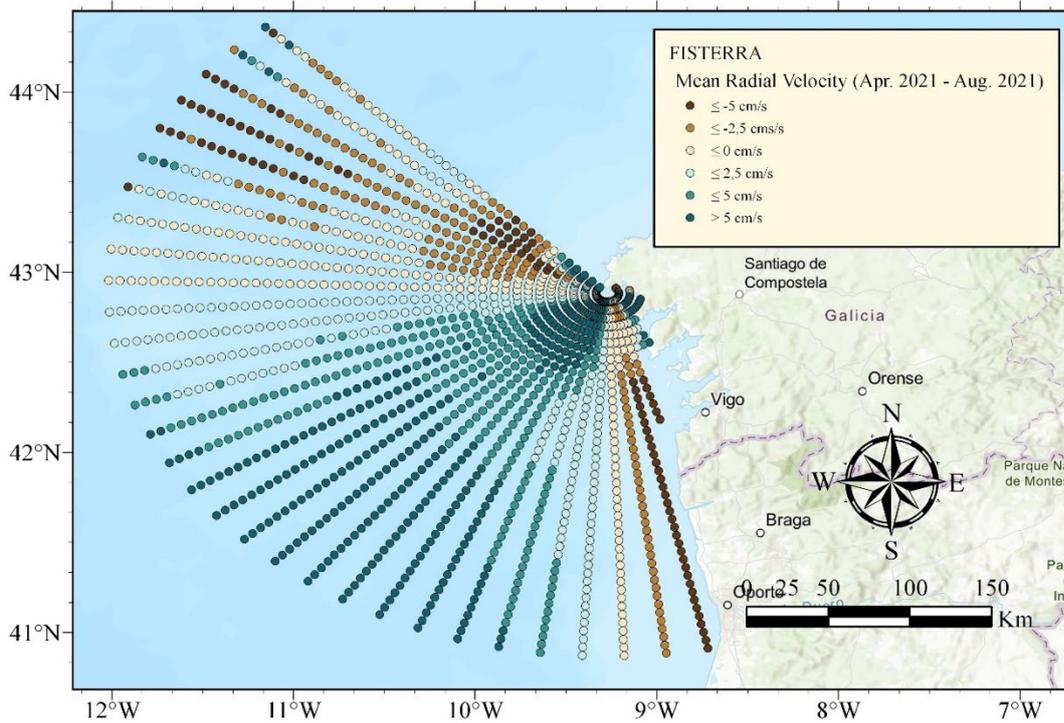
## 7.2. Radiales *measured* de la antena de Fisterra (FIST)

	RV	SD RV	ESPC	SD ESPC	ETMP	SD ETMP
<b>Media (cm/s)</b>	4.94	14.29	11.22	9.22	9.43	6.91

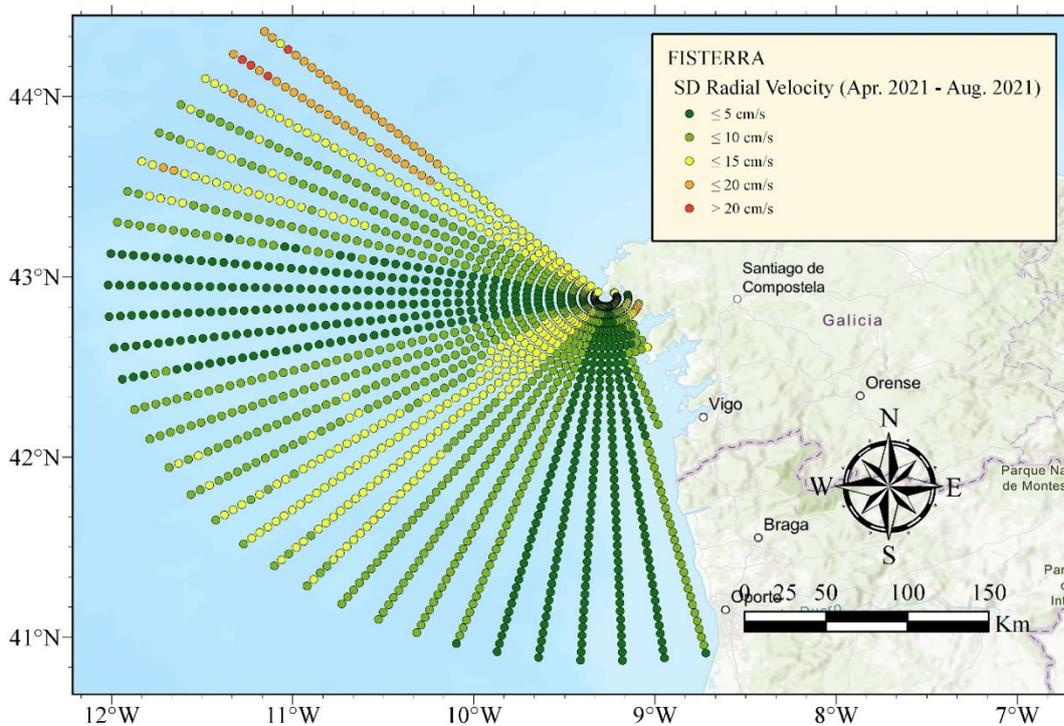
**Tabla A2.** Medias espaciales, calculadas para todo el conjunto de celdas de la antena de Fisterra, de: media temporal de las velocidades radiales (RV) en cada celda (Figura A9), desviación estándar temporal de RV (SD RV) en cada celda (Figura A10), media temporal de la desviación estándar espacial (ESPC) en cada celda (Figura A11), desviación estándar temporal de ESPC para cada celda (Figura A12), media temporal de la desviación estándar temporal (ETMP) para cada celda (Figura A13) y desviación estándar temporal de ETMP (SD ETMP) para cada celda (Figura A14).



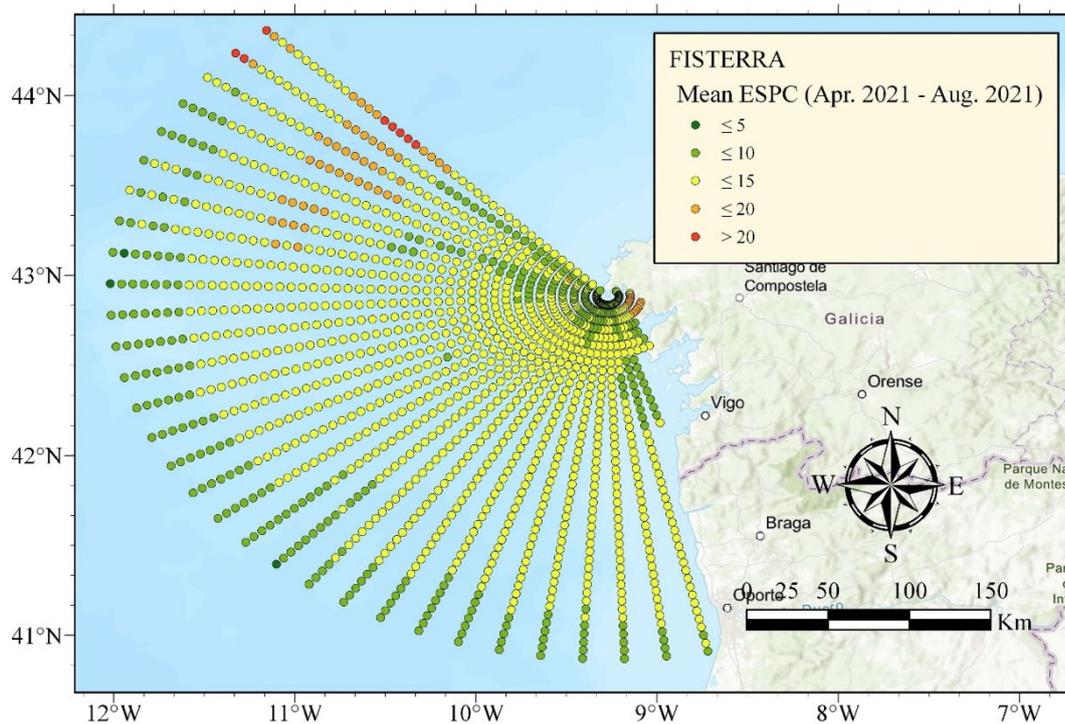
**Figura A8.** Cobertura (Coverage) en cada celda de medición del radar situado en Fisterra para el periodo comprendido entre abril del 2021 y agosto de 2021.



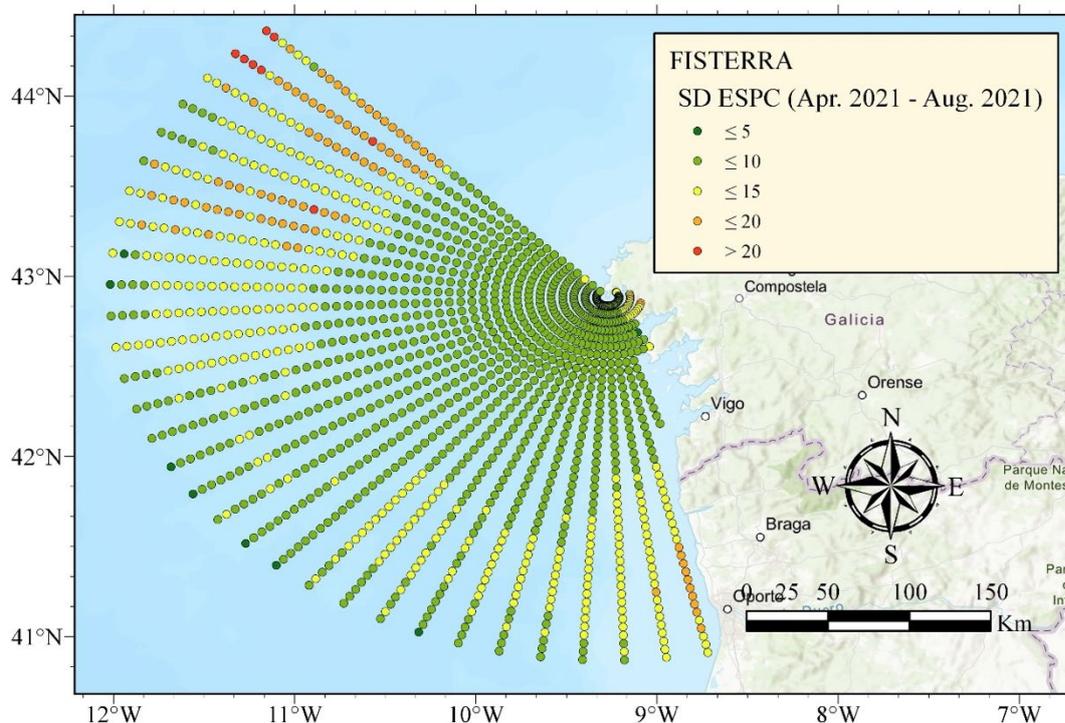
**Figura A9.** Media temporal de la Velocidad radial (*Radial Velocity*) en cada celda de medición del radar situado en Fisterra para el periodo comprendido entre abril del 2021 y agosto de 2021.



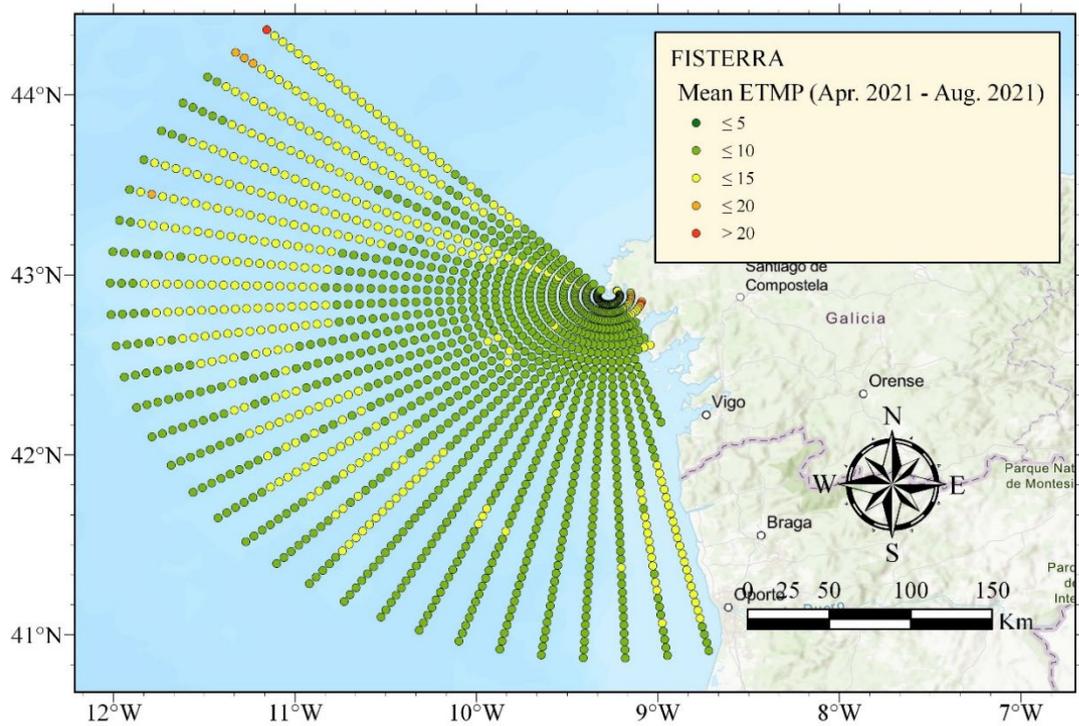
**Figura A10.** Desviación estándar temporal de la *Velocidad radial* (*Radial Velocity*) en cada celda de medición del radar situado en Fisterra para el periodo comprendido entre abril del 2021 y agosto de 2021.



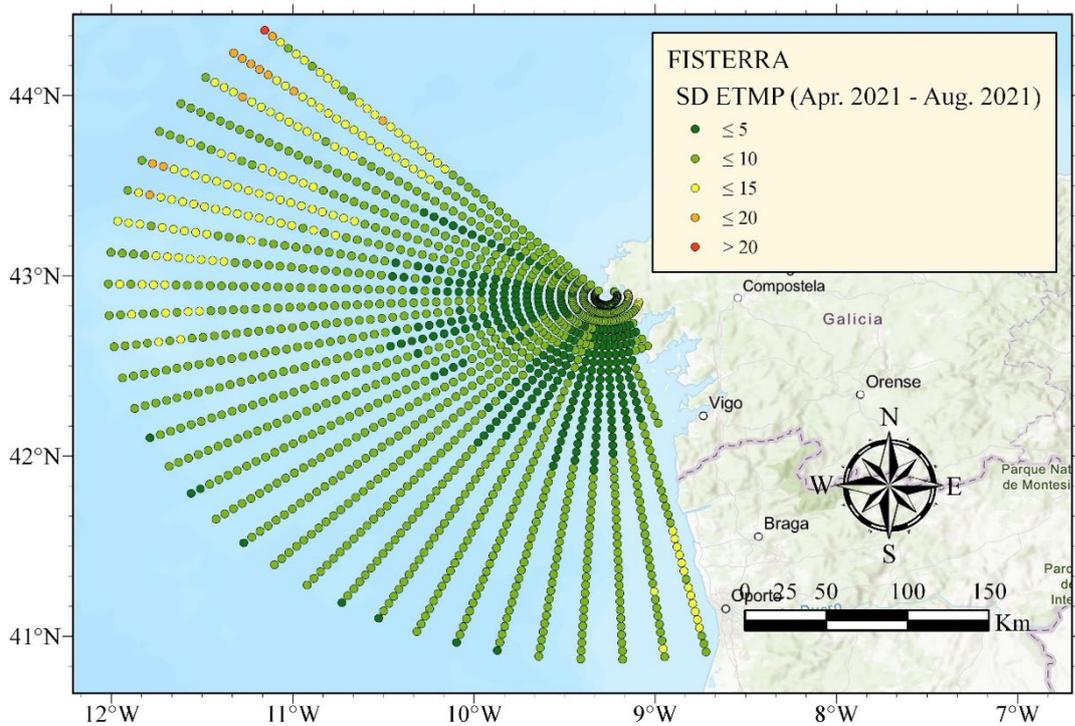
**Figura A11.** Media temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Fisteria para el periodo comprendido entre abril del 2021 y agosto de 2021.



**Figura A12.** Desviación estándar temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Fisteria para el periodo comprendido entre abril del 2021 y agosto de 2021.



**Figura A13.** Media temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Fisterra para el periodo comprendido entre abril del 2021 y agosto de 2021.

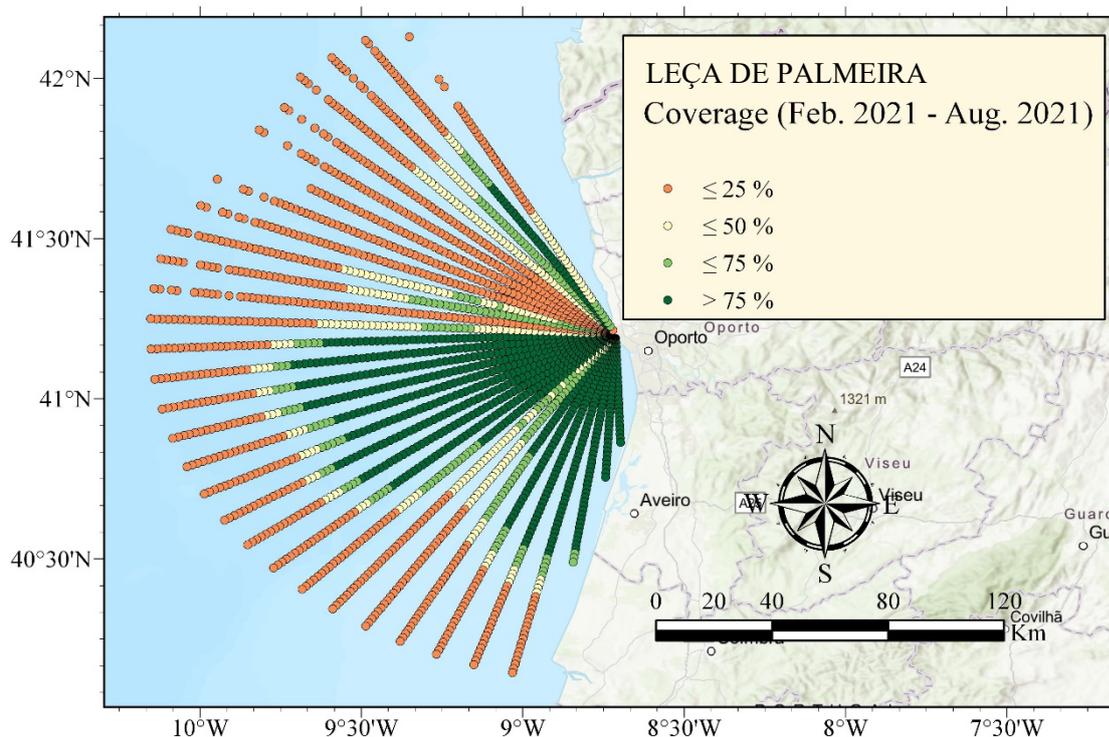


**Figura A14.** Desviación estándar temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Fisterra para el periodo comprendido entre abril del 2021 y agosto de 2021.

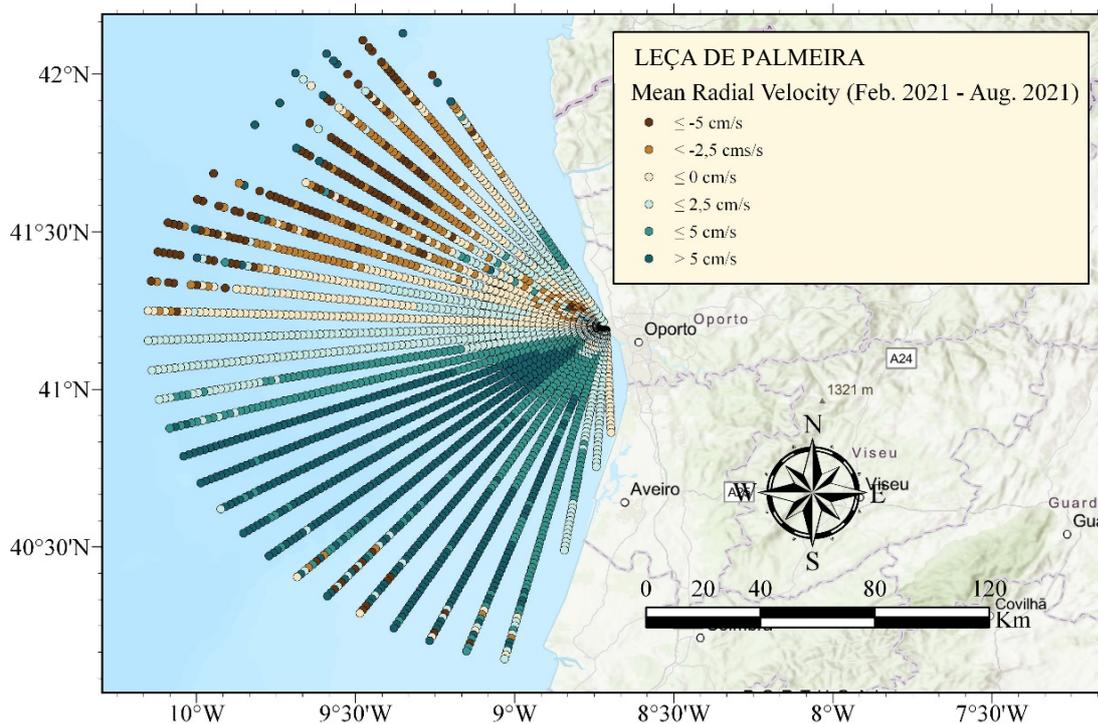
### 7.3. Radiales *measured* de la antenna de Leça de Palmeira (LPRO)

	RV	SD RV	ESPC	SD ESPC	ETMP	SD ETMP
<b>Media (cm/s)</b>	4.42	10.51	7.61	6.93	10.15	7.38

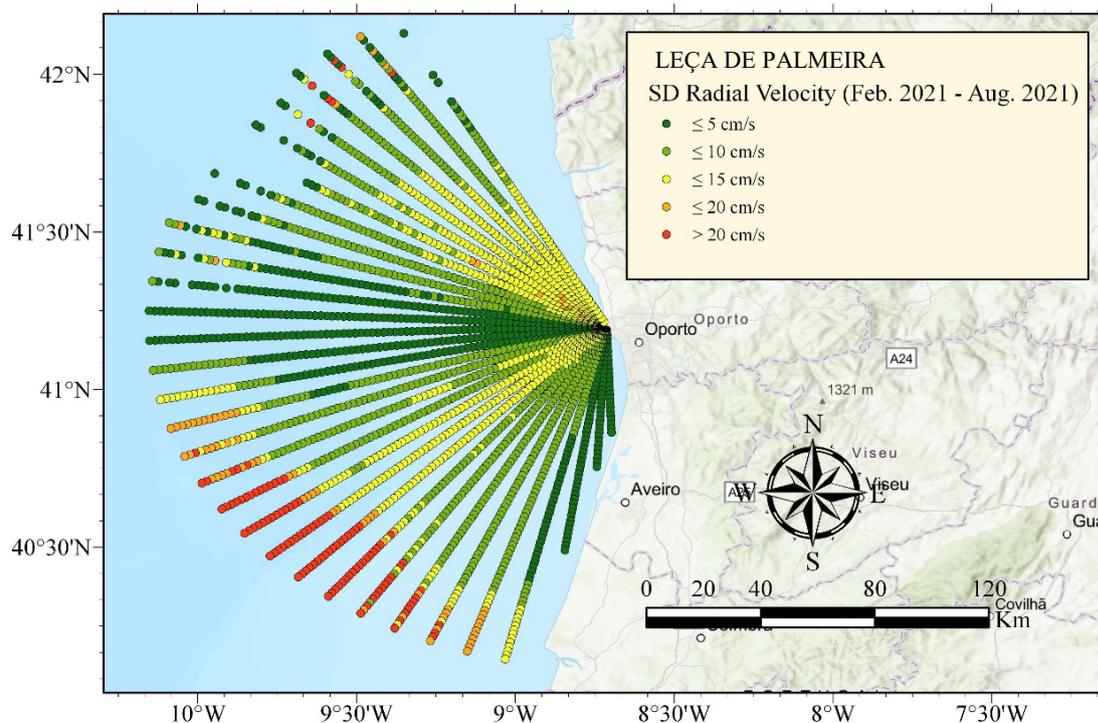
**Tabla A3.** Medias espaciales, calculadas para todo el conjunto de celdas de la antenna de Leça de Palmeira, de: media temporal de las velocidades radiales (RV) en cada celda (Figura A16), desviación estándar temporal de RV (SD RV) en cada celda (Figura A17), media temporal de la desviación estándar espacial (ESPC) en cada celda (Figura A18), desviación estándar temporal de ESPC para cada celda (Figura A19), media temporal de la desviación estándar temporal (ETMP) para cada celda (Figura A20) y desviación estándar temporal de ETMP (SD ETMP) para cada celda (Figura A21).



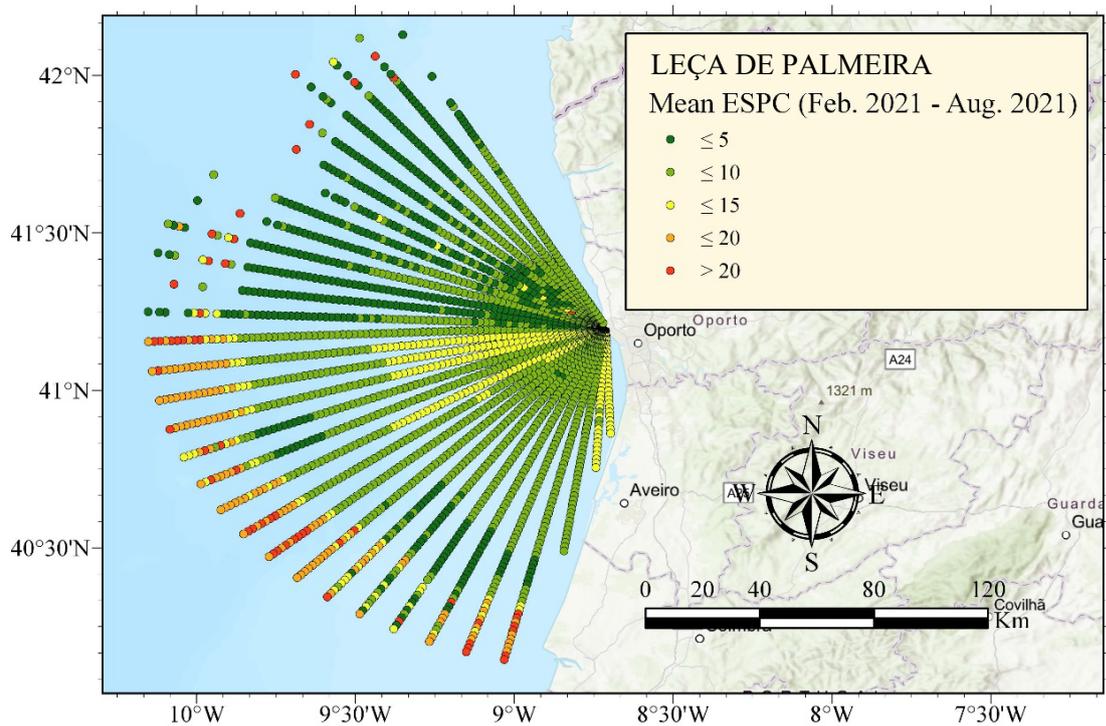
**Figura A15.** Cobertura (*Coverage*) en cada celda de medición del radar situado en Leça de Palmeira para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y agosto de 2021.



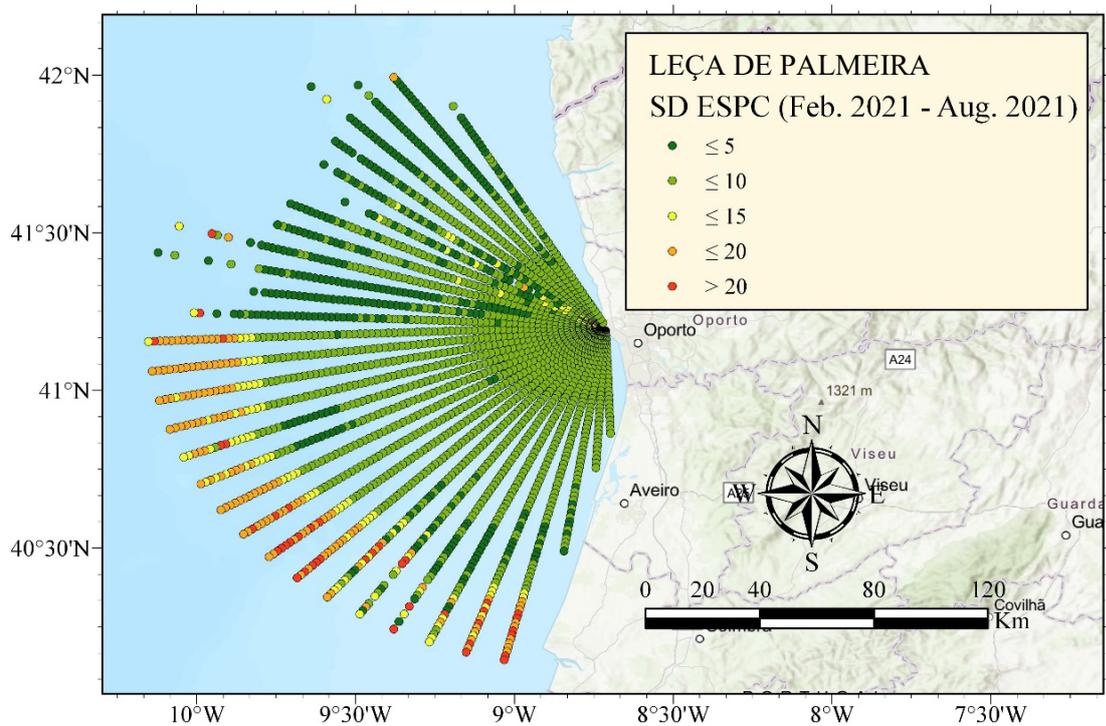
**Figura 16.** Media temporal de la *Velocidad radial* (Radial Velocity) en cada celda de medición del radar situado en Leça de Palmeira para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y agosto de 2021.



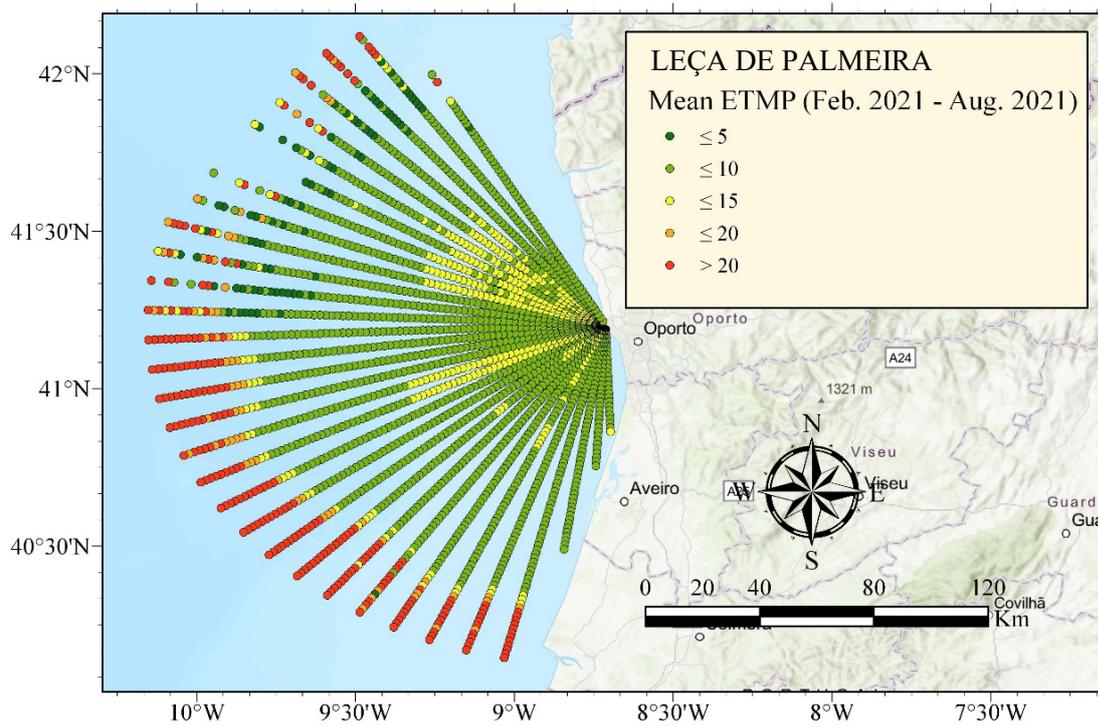
**Figura A17.** Desviación estándar temporal de la *Velocidad radial* (Radial Velocity) en cada celda de medición del radar situado en Leça de Palmeira para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y agosto de 2021.



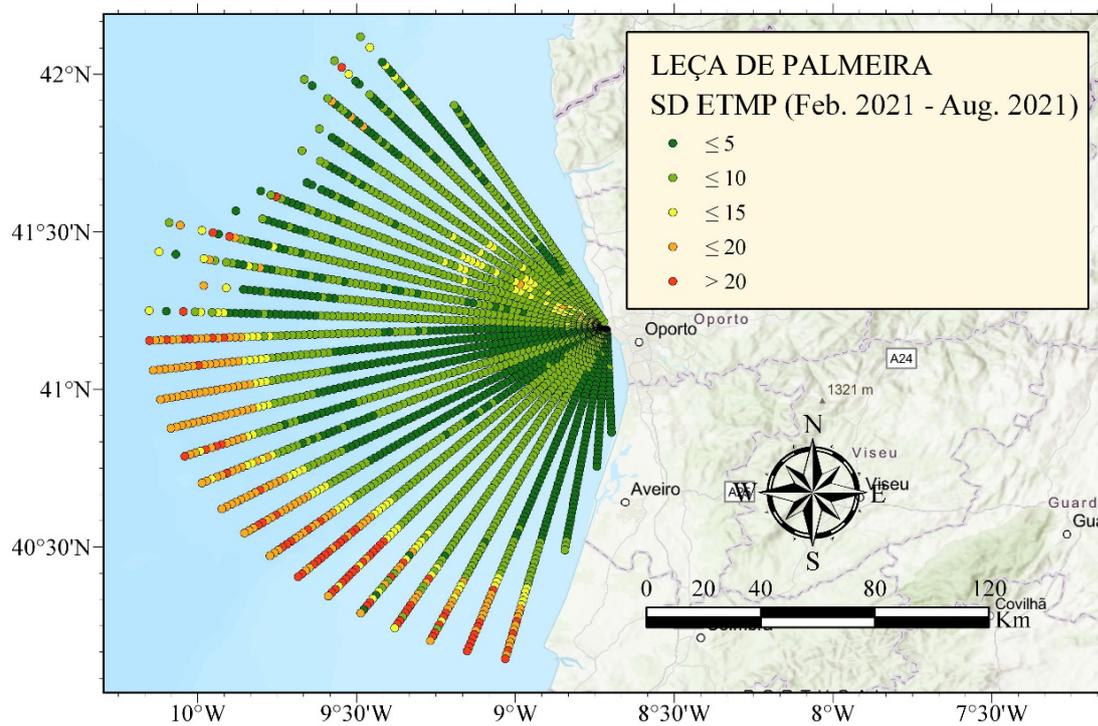
**Figura A18.** Media temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Leça de Palmeira para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y agosto de 2021.



**Figura A19.** Desviación estándar temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Leça de Palmeira para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y agosto de 2021.



**Figura A20.** Media temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Leça de Palmeira para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y agosto de 2021.

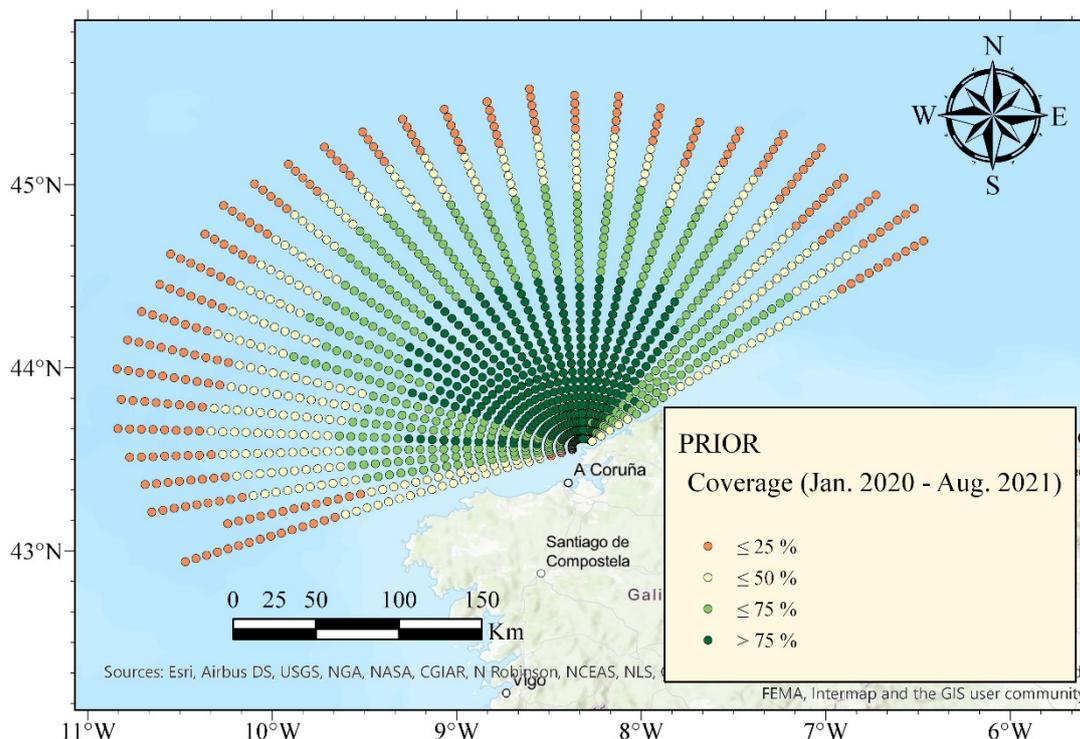


**Figura A21.** Desviación estándar temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Leça de Palmeira para el periodo comprendido entre febrero del 2021 y agosto de 2021.

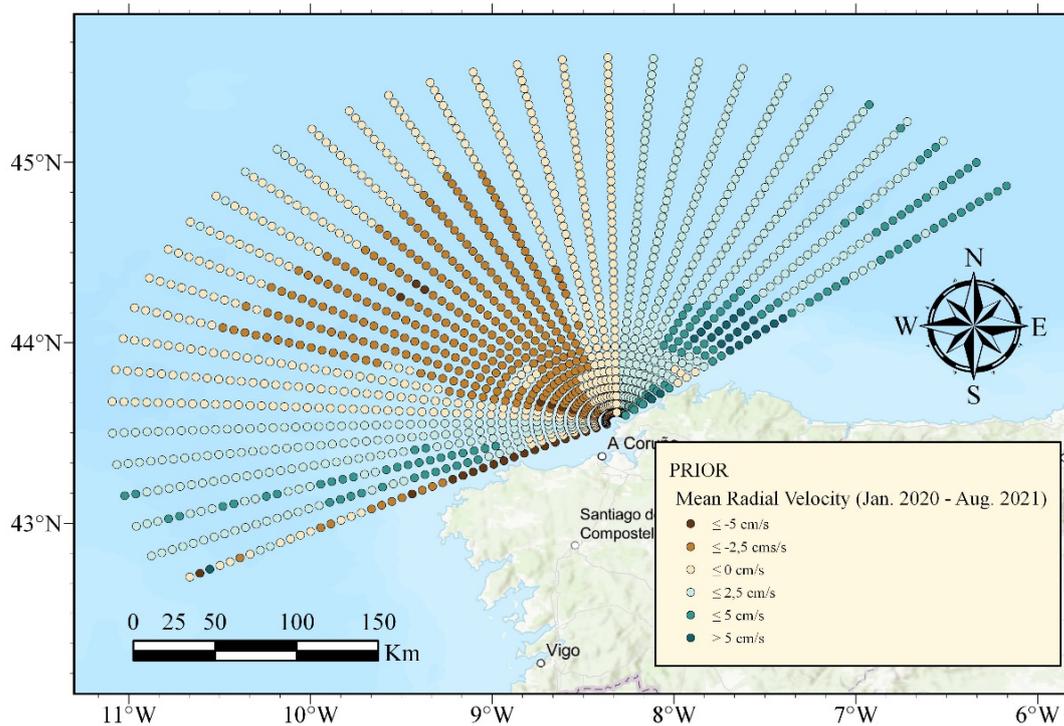
## 7.4. Radiales *measured* de la antena de Prior (PRIO)

	RV	SD RV	ESPC	SD ESPC	ETMP	SD ETMP
<b>Media (cm/s)</b>	2.25	14.55	8.52	7.06	8.58	6.15

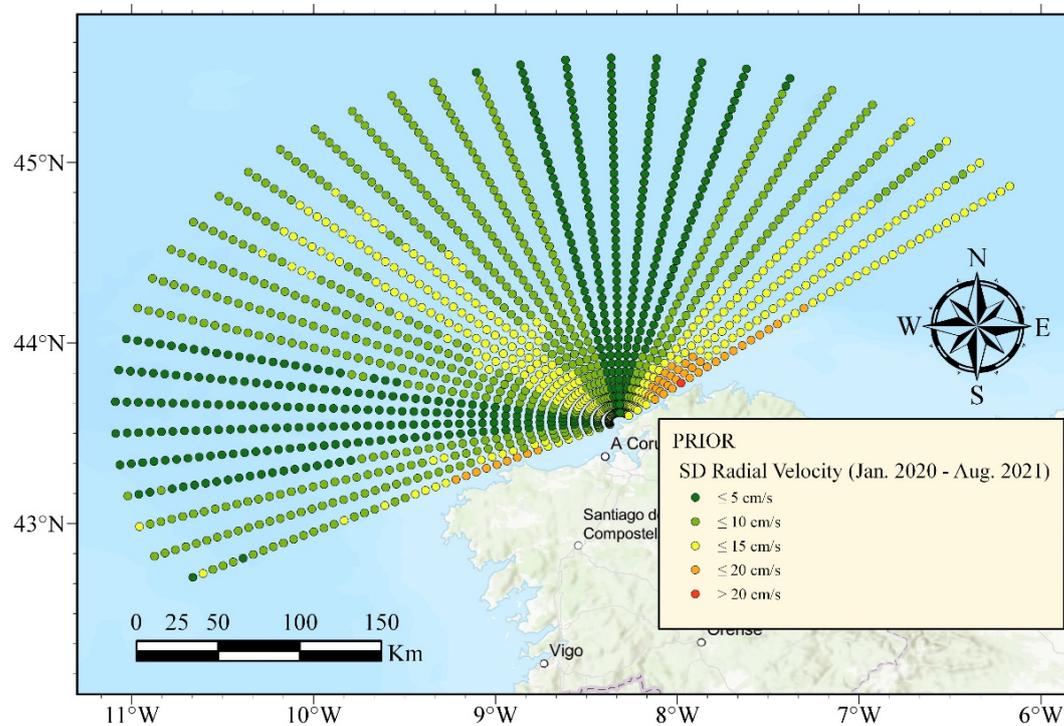
**Tabla A4.** Medias espaciales, calculadas para todo el conjunto de celdas de la antena de Prior, de: media temporal de las velocidades radiales (RV) en cada celda (Figura A23), desviación estándar temporal de RV (SD RV) en cada celda (Figura A24), media temporal de la desviación estándar espacial (ESPC) en cada celda (Figura A25), desviación estándar temporal de ESPC para cada celda (Figura A26), media temporal de la desviación estándar temporal (ETMP) para cada celda (Figura A27) y desviación estándar temporal de ETMP (SD ETMP) para cada celda (Figura A28).



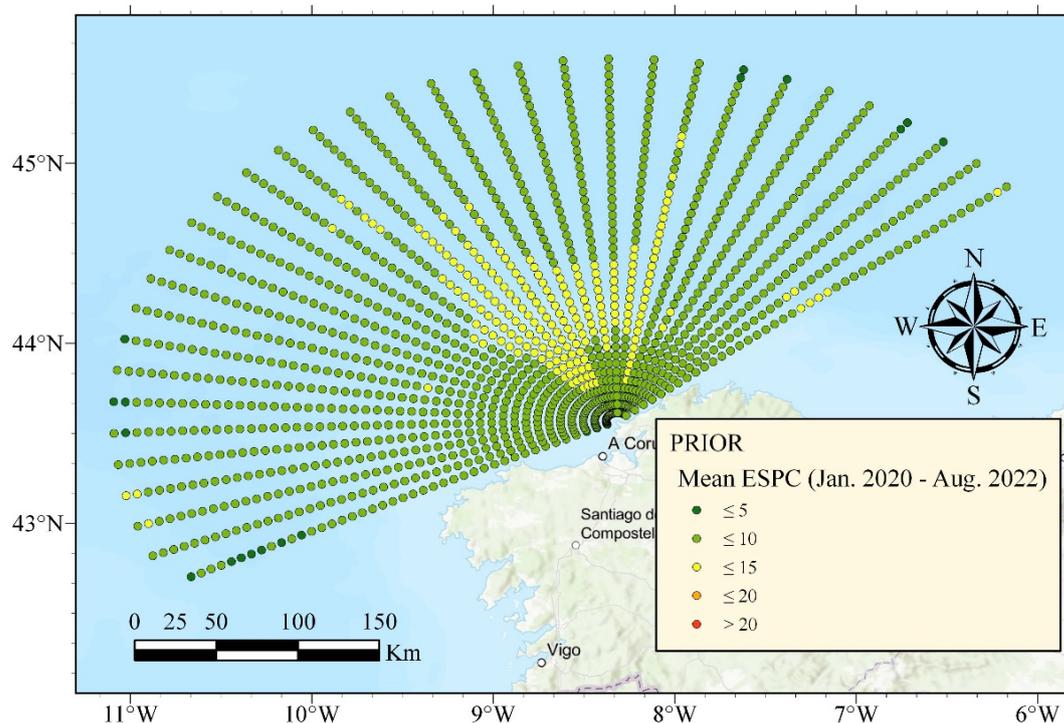
**Figura A22.** Cobertura (*Coverage*) en cada celda de medición del radar situado en Prior para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.



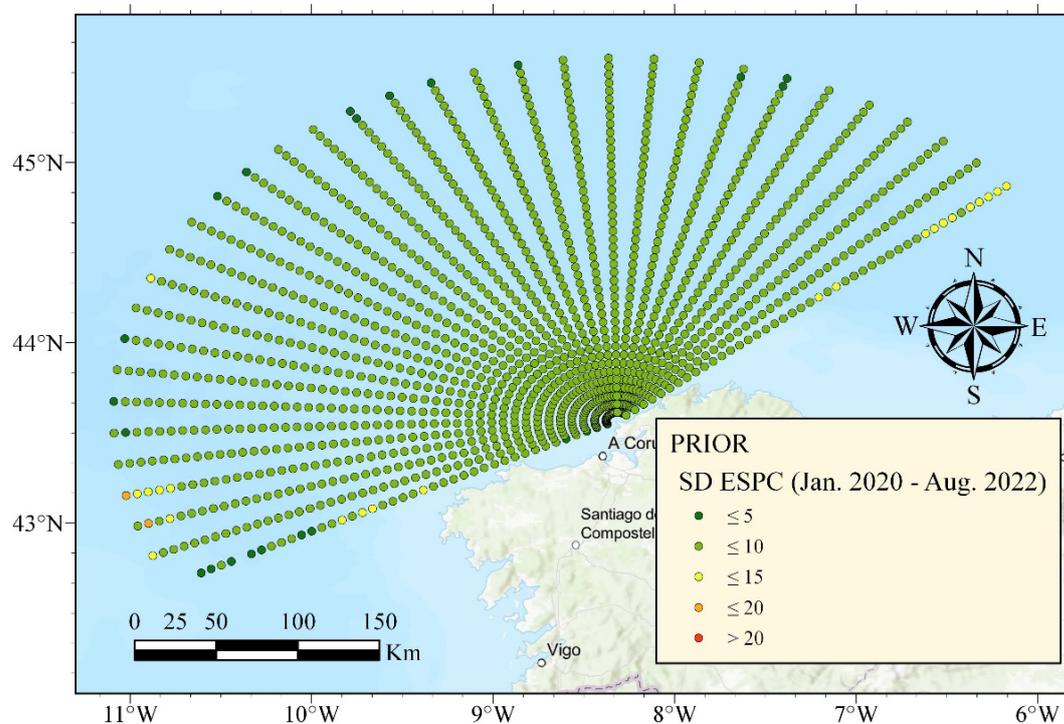
**Figura A23.** Media temporal de la *Velocidad radial* (Radial Velocity) en cada celda de medición del radar situado en Prior para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.



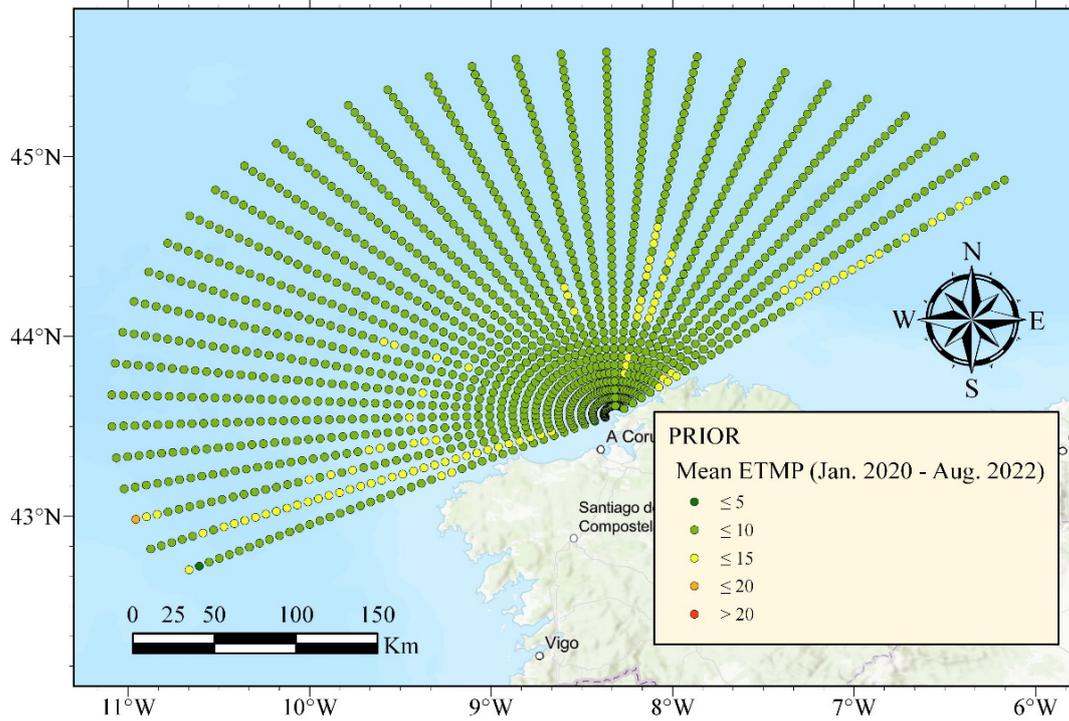
**Figura A24.** Desviación estándar temporal de la *Velocidad radial* (Radial Velocity) en cada celda de medición del radar situado en Prior para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.



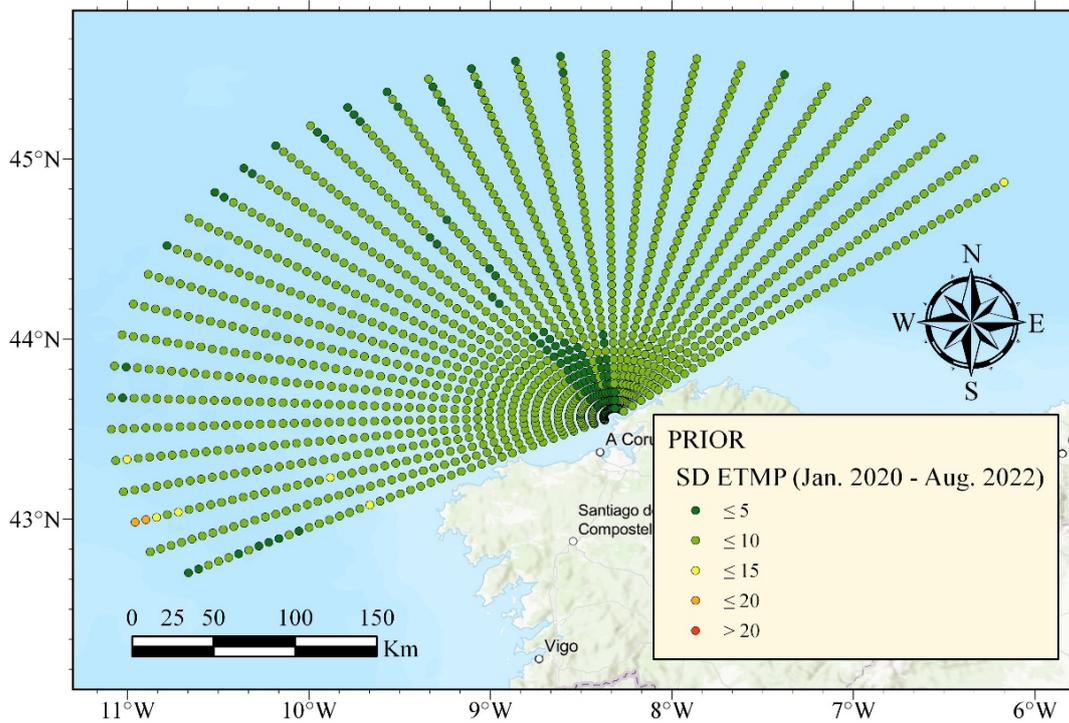
**Figura A25.** Media temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Prior para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.



**Figura A26.** Desviación estándar temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Prior para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.



**Figura A27.** Media temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Prior para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.

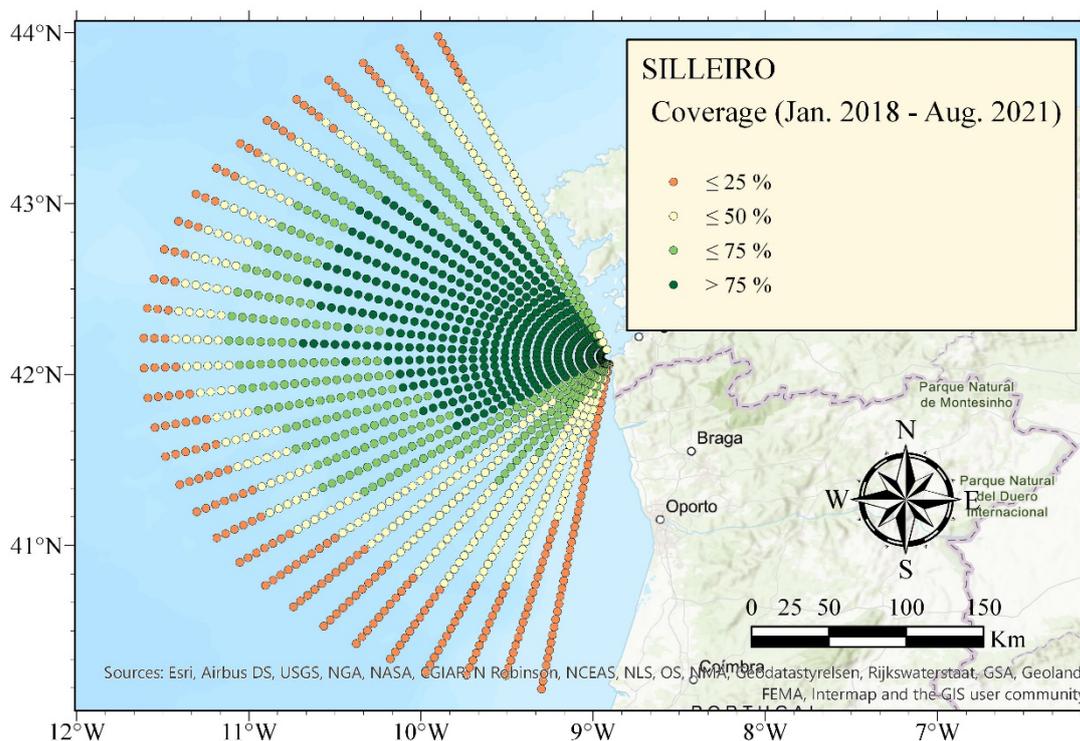


**Figura A28.** Desviación estándar temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Prior para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.

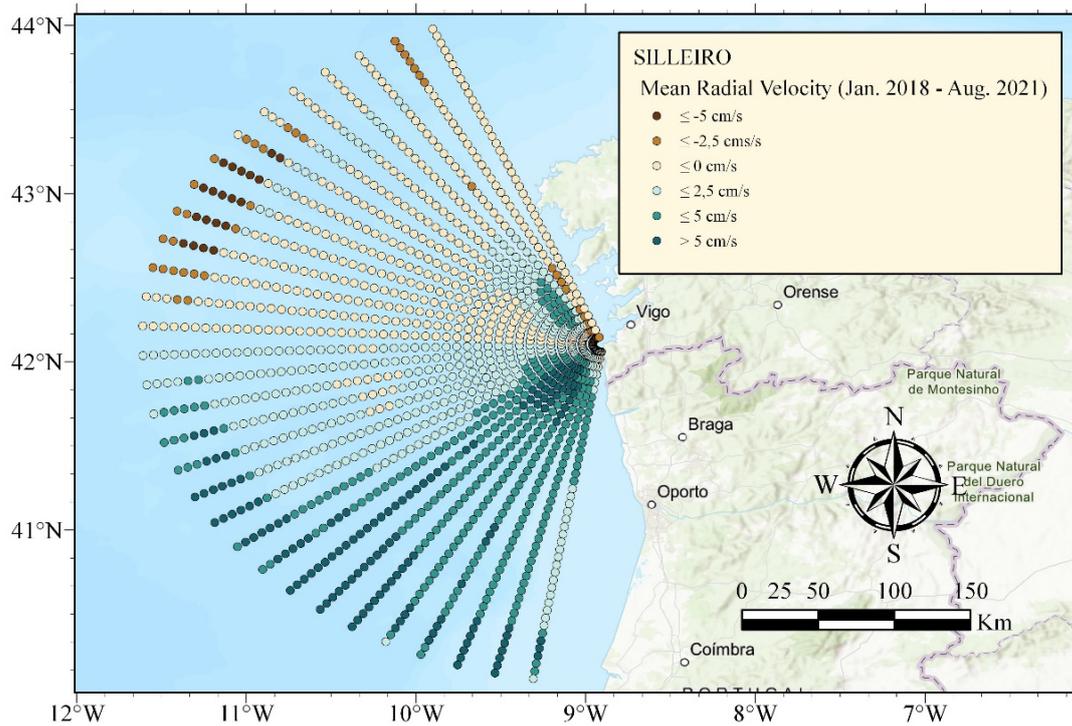
## 7.5. Radiales *measured* de la antena de Silleiro (SILL)

	RV	SD RV	ESPC	SD ESPC	ETMP	SD ETMP
<b>Media (cm/s)</b>	2.55	15.31	8.64	7.24	8.17	5.97

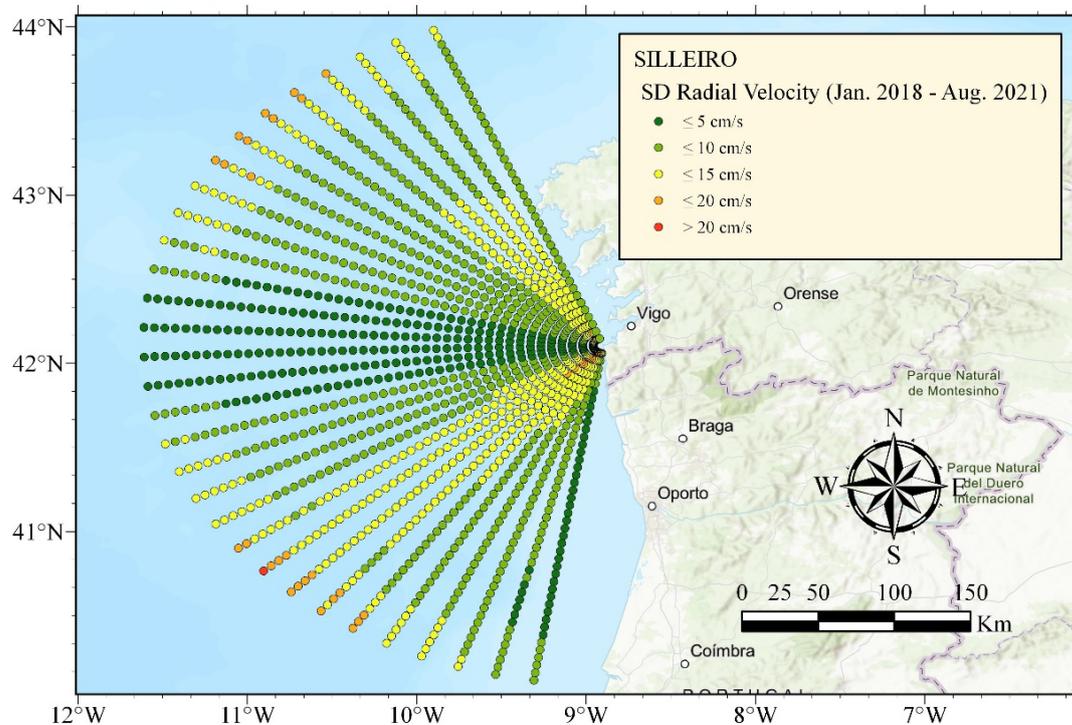
**Tabla A5.** Medias espaciales, calculadas para todo el conjunto de celdas de la antena de Silleiro, de: media temporal de las velocidades radiales (RV) en cada celda (Figura A30), desviación estándar temporal de RV (SD RV) en cada celda (Figura A31), media temporal de la desviación estándar espacial (ESPC) en cada celda (Figura A32), desviación estándar temporal de ESPC para cada celda (Figura A33), media temporal de la desviación estándar temporal (ETMP) para cada celda (Figura A34) y desviación estándar temporal de ETMP (SD ETMP) para cada celda (Figura A35).



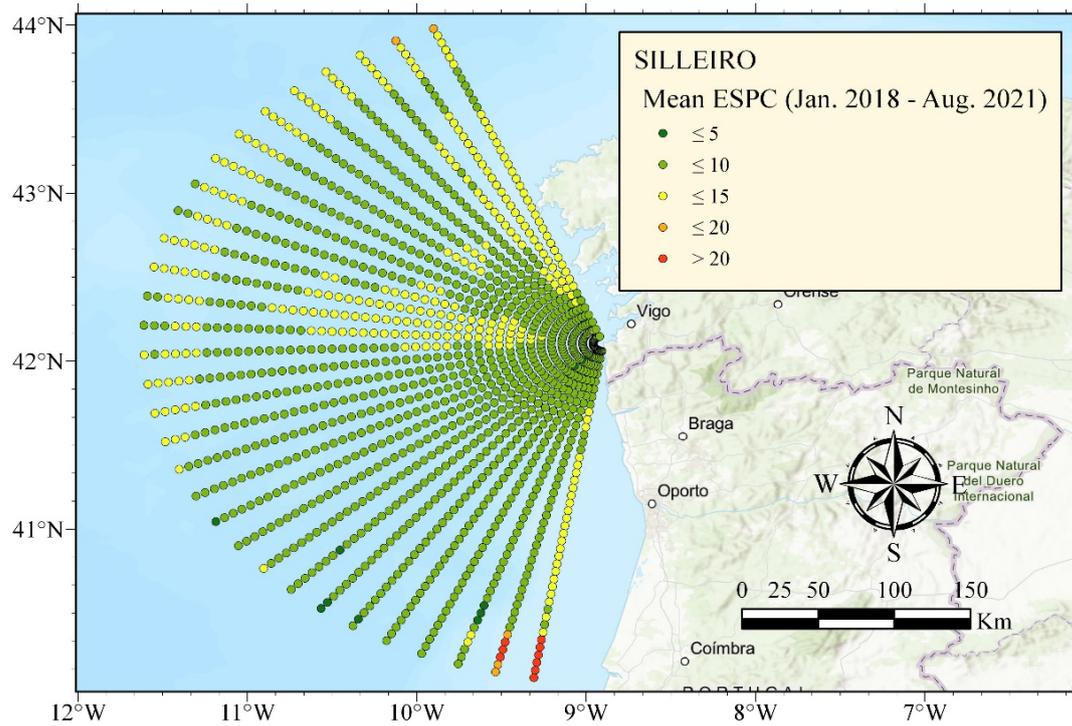
**Figura A29.** Cobertura (Coverage) en cada celda de medición del radar situado en Silleiro para el periodo comprendido entre enero 2018 y agosto de 2021.



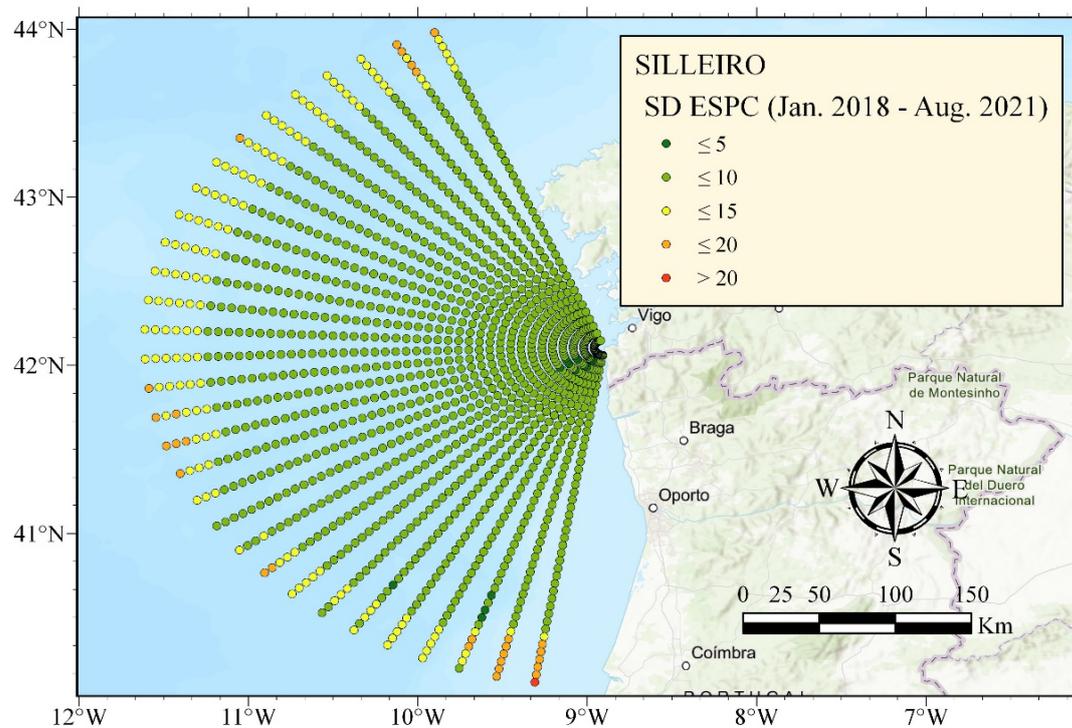
**Figura A30.** Media temporal de la *Velocidad radial* (Radial Velocity) en cada celda de medición del radar situado en Silleiro para el periodo comprendido entre enero 2018 y agosto de 2021.



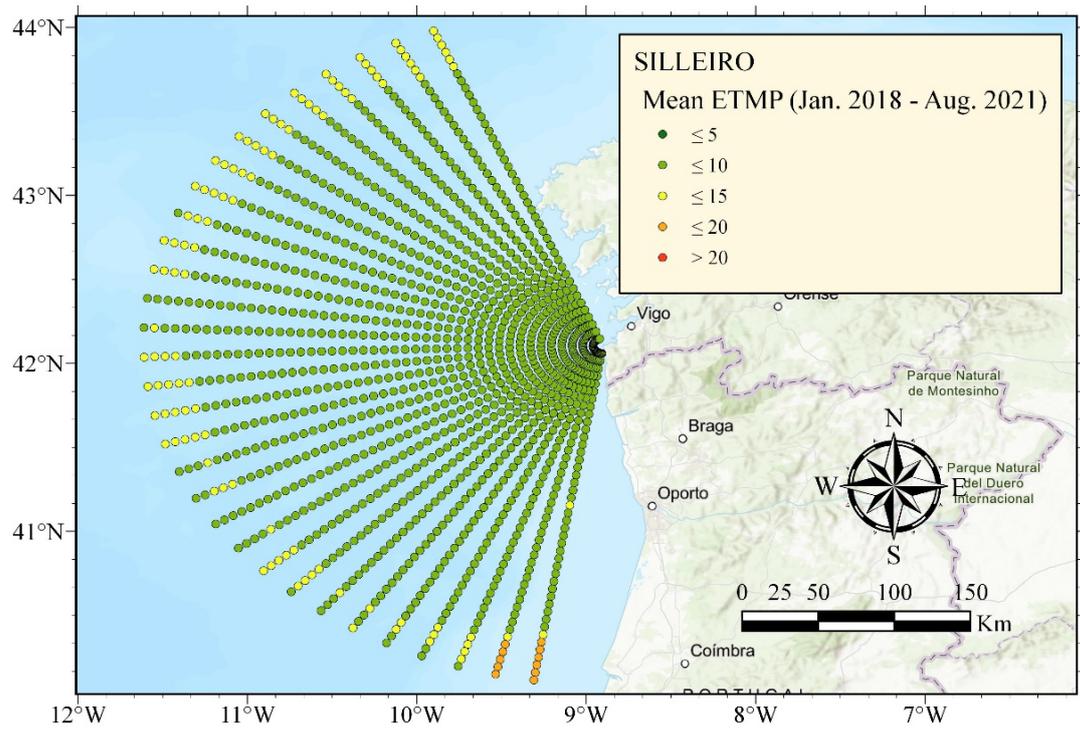
**Figura A31.** Desviación estándar temporal de la *Velocidad radial* (Radial Velocity) en cada celda de medición del radar situado en Silleiro para el periodo comprendido entre enero 2018 y agosto de 2021.



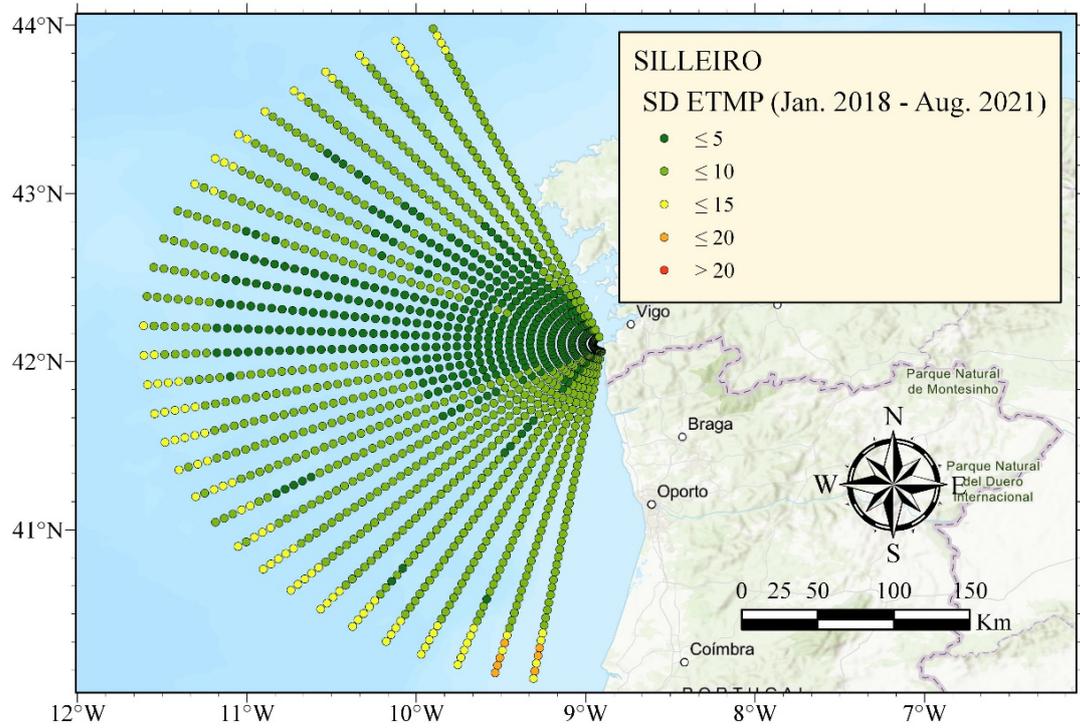
**Figura A32.** Media temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Silleiro para el periodo comprendido entre enero 2018 y agosto de 2021.



**Figura A33.** Desviación estándar temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Silleiro para el periodo comprendido entre enero 2018 y agosto de 2021.



**Figura A34.** Media temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Silleiro para el periodo comprendido entre enero 2018 y agosto de 2021.

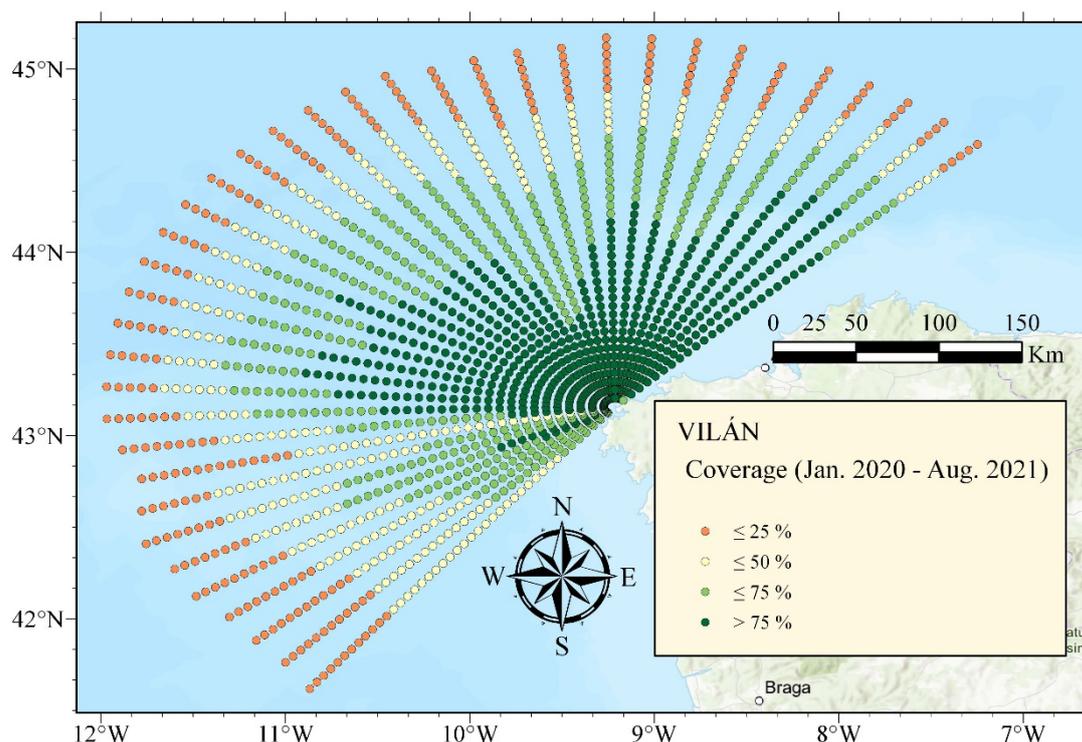


**Figura A35.** Desviación estándar temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Silleiro para el periodo comprendido entre enero 2018 y agosto de 2021.

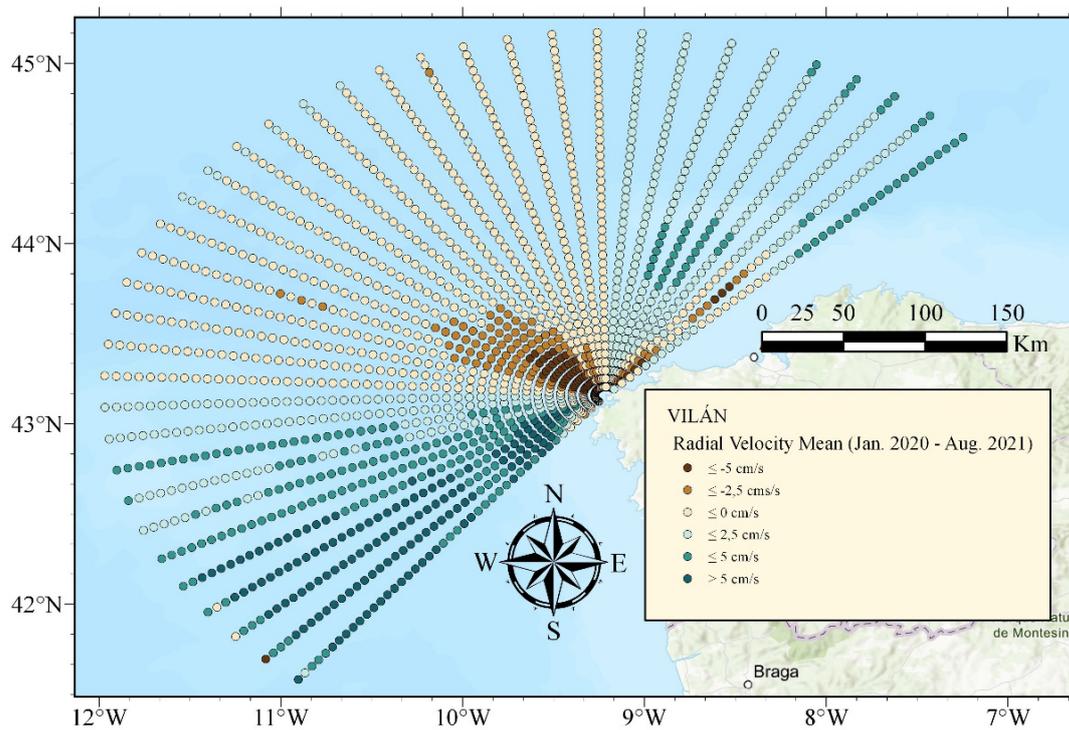
## 7.6. Radiales *measured* de la antenna de Vilán (VILA)

	RV	SD RV	ESPC	SD ESPC	ETMP	SD ETMP
<b>Media (cm/s)</b>	2.17	14.04	7.87	6.46	7.97	5.54

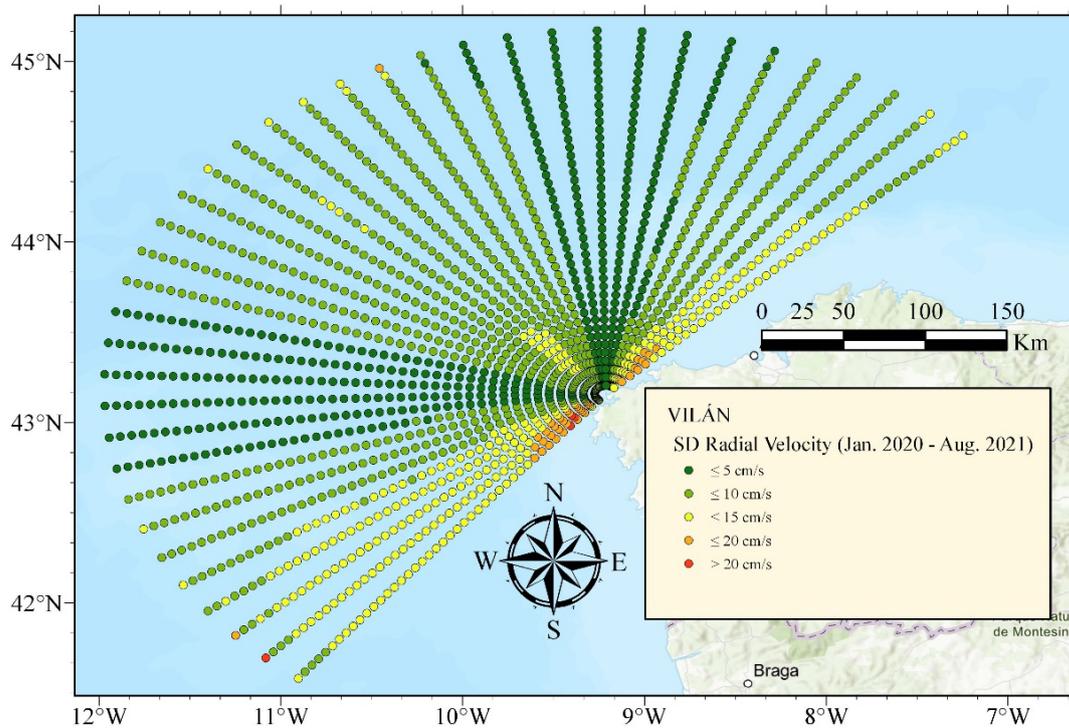
**Tabla A6.** Medias espaciales, calculadas para todo el conjunto de celdas de la antenna de Vilán, de: media temporal de las velocidades radiales (RV) en cada celda (Figura A37), desviación estándar temporal de RV (SD RV) en cada celda (Figura A38), media temporal de la desviación estándar espacial (ESPC) en cada celda (Figura A39), desviación estándar temporal de ESPC para cada celda (Figura A40), media temporal de la desviación estándar temporal (ETMP) para cada celda (Figura A41) y desviación estándar temporal de ETMP (SD ETMP) para cada celda (Figura A42).



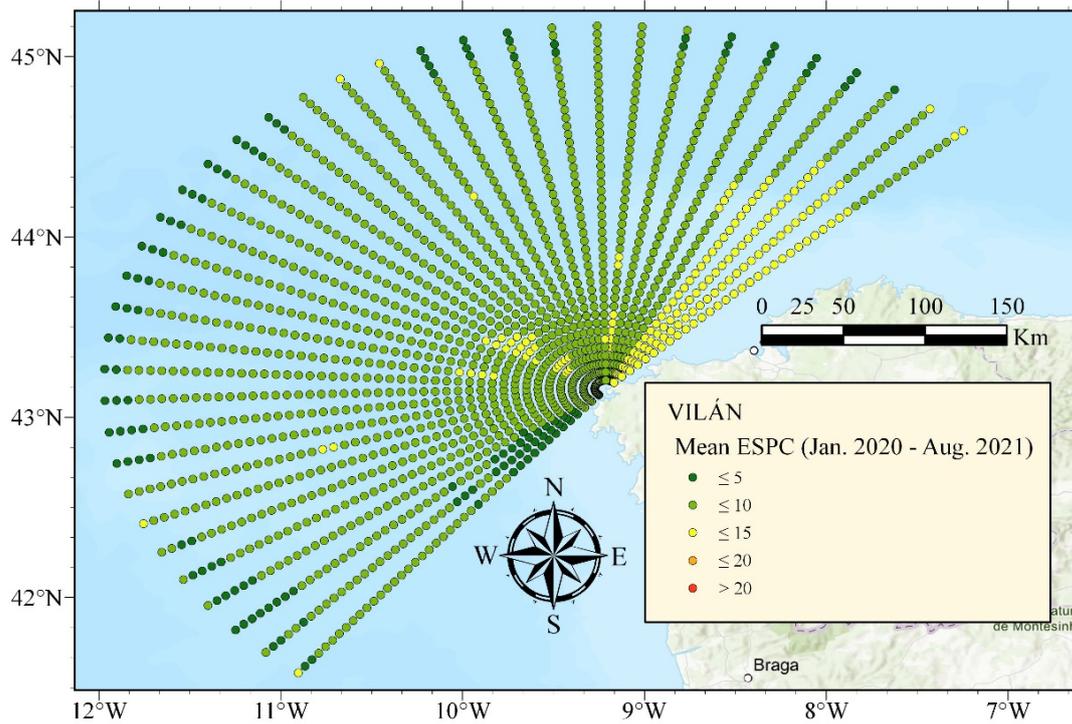
**Figura A36.** Cobertura (Coverage) en cada celda de medición del radar situado en Vilán para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.



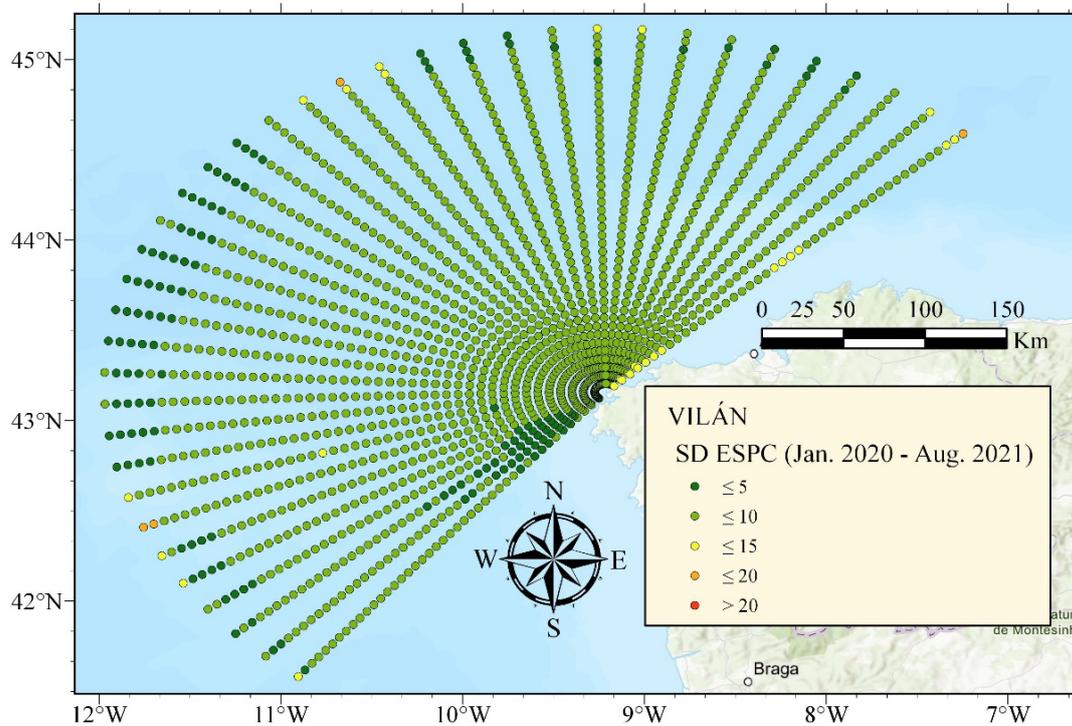
**Figura A37.** Media temporal de la *Velocidad radial* (Radial Velocity) en cada celda de medición del radar situado en Vilán para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.



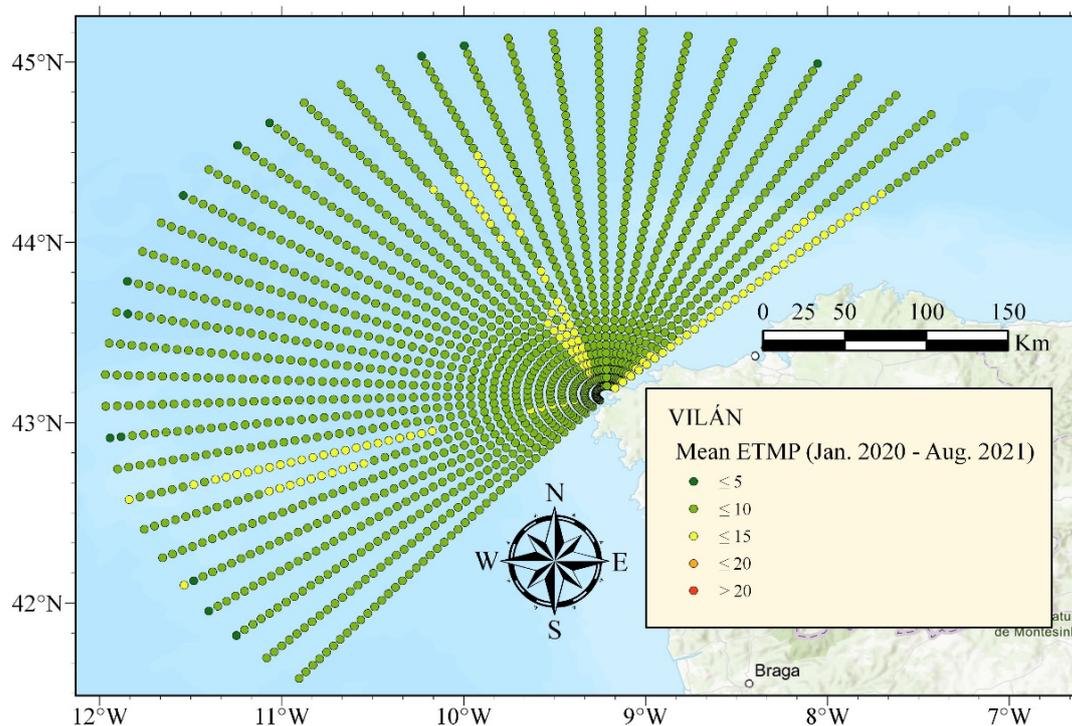
**Figura A38.** Desviación estándar temporal de la *Velocidad radial* (Radial Velocity) en cada celda de medición del radar situado en Vilán para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.



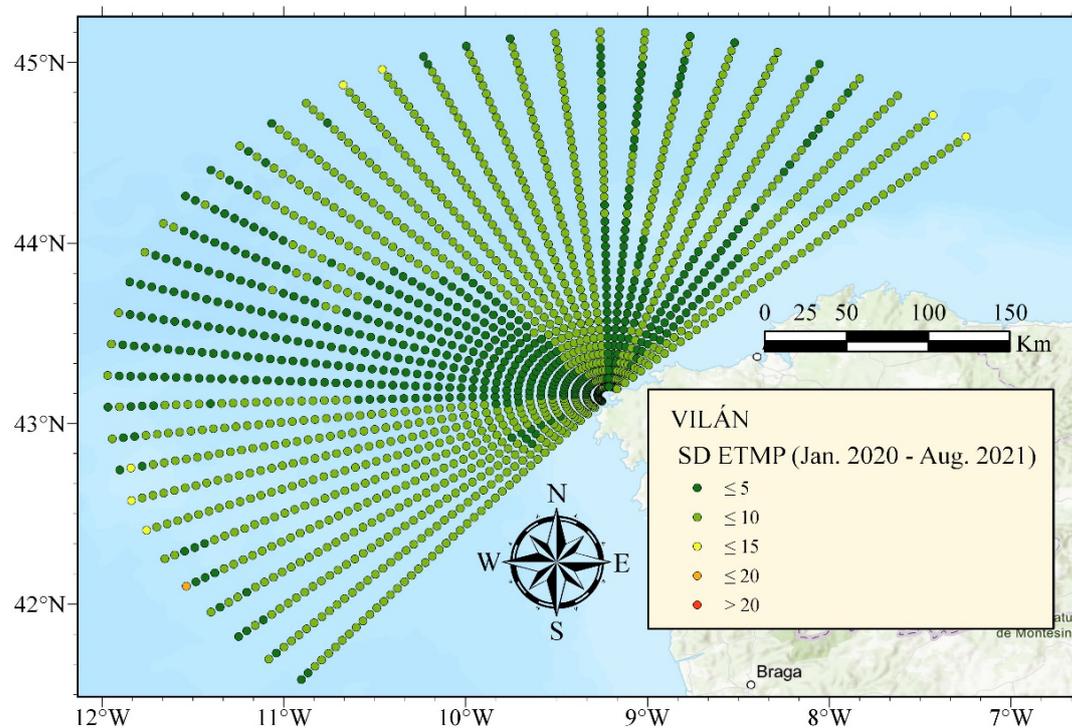
**Figura A39.** Media temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Vilán para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.



**Figura A40.** Desviación estándar temporal de la *Spatial Quality* (ESPC) en cada celda de medición del radar situado en Vilán para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.



**Figura A41.** Media temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Vilán para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.

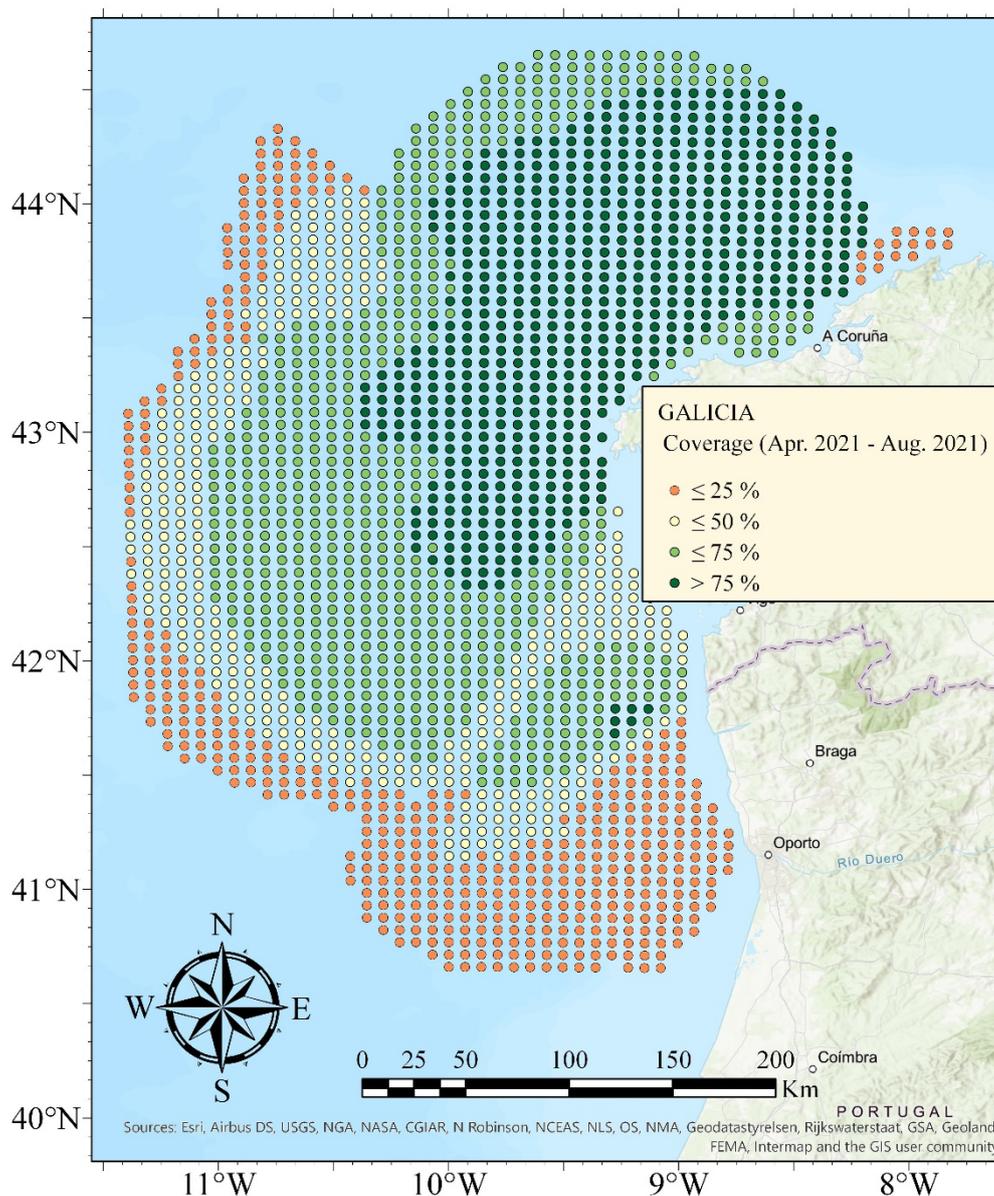


**Figura A42.** Desviación estándar temporal de la *Temporal Quality* (ETMP) en cada celda de medición del radar situado en Vilán para el periodo comprendido entre enero 2020 y agosto de 2021.

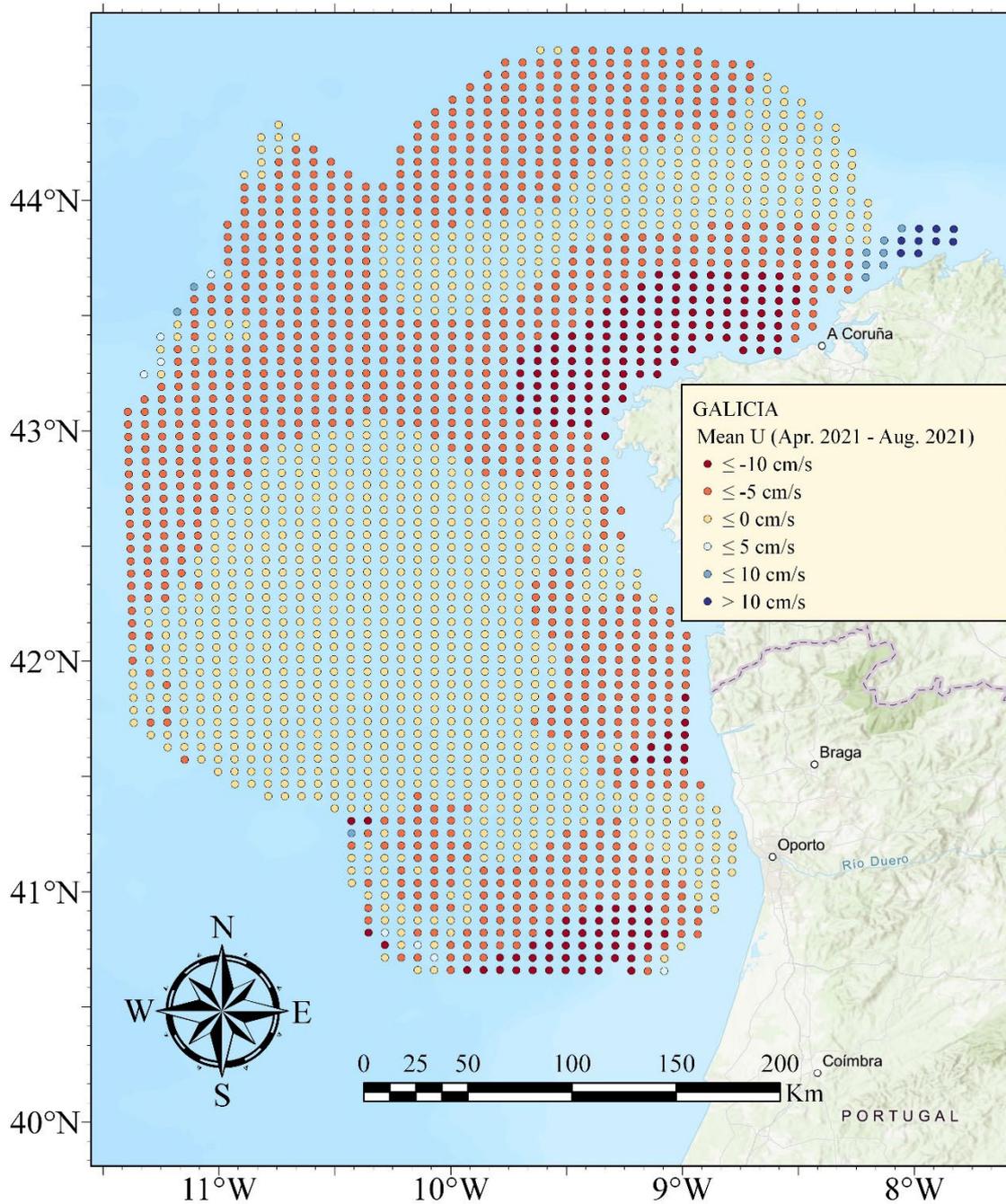
## 7.7.Velocidades totales de RAIA\_NW\_Iberian (GALI)

	U	SD U	V	SD V	UQAL	VQAL	CQAL
<b>Media (cm/s)</b>	-5.63	12.40	-2.74	14.17	19.25	20.67	30.62

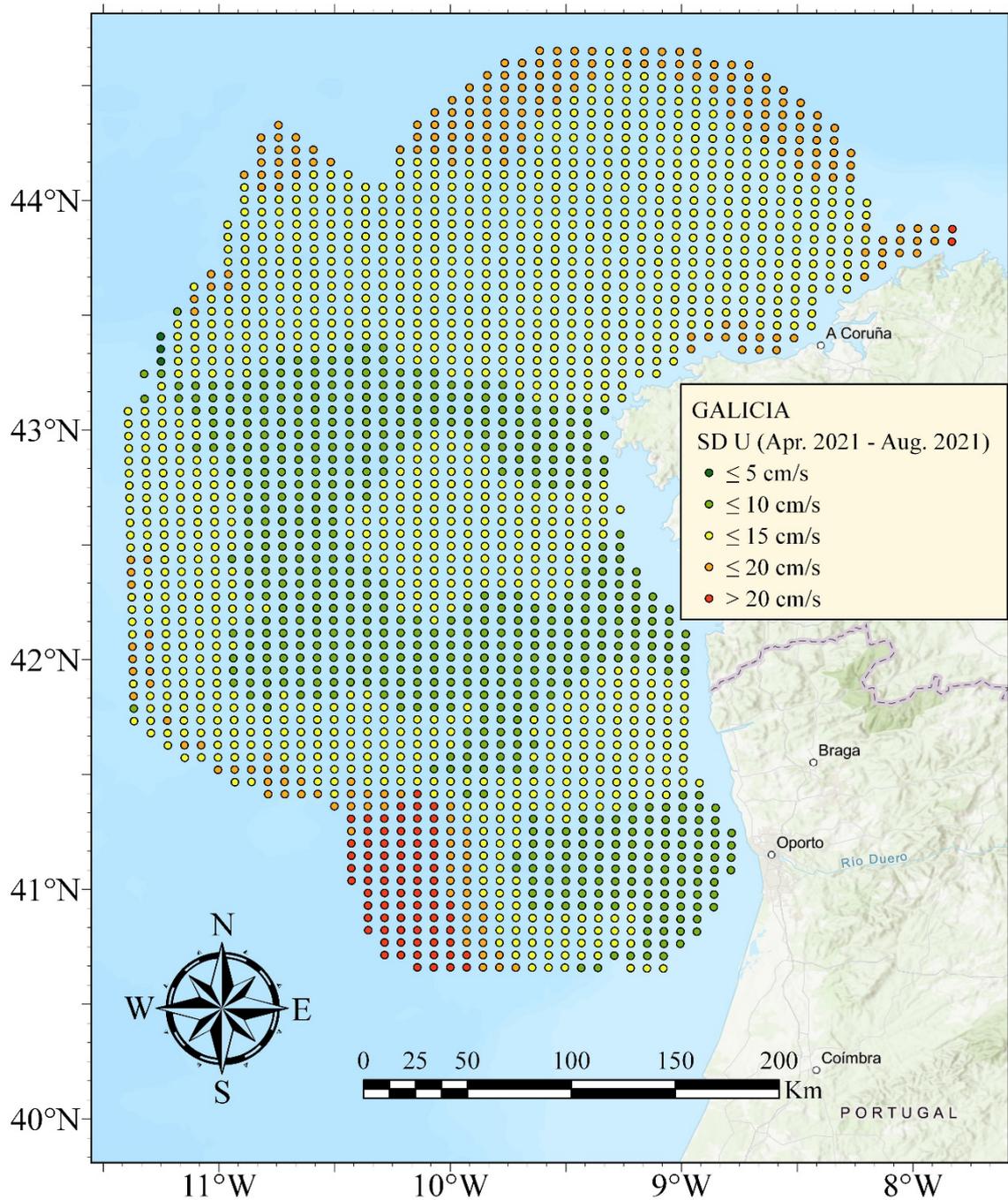
**Tabla A7.** Medias espaciales, calculadas para todo el conjunto de celdas de la malla RAIA\_NW\_Iberian, de: media temporal de la componente x de la velocidad (U) en cada celda (Figura A44), desviación estándar temporal de U (SD U) en cada celda (Figura A45), media temporal de la componente y de la velocidad (V) en cada celda (Figura A46), desviación estándar temporal de V (SD V) en cada celda (Figura A47), media temporal de la estima de la desviación estándar espacial de U (UQAL) en cada celda (Figura A48), media temporal de la estima de la desviación estándar espacial de V (VQAL) en cada celda (Figura A49) y media temporal de la estima de la covarianza U-V (CQAL) en cada celda (Figura A50).



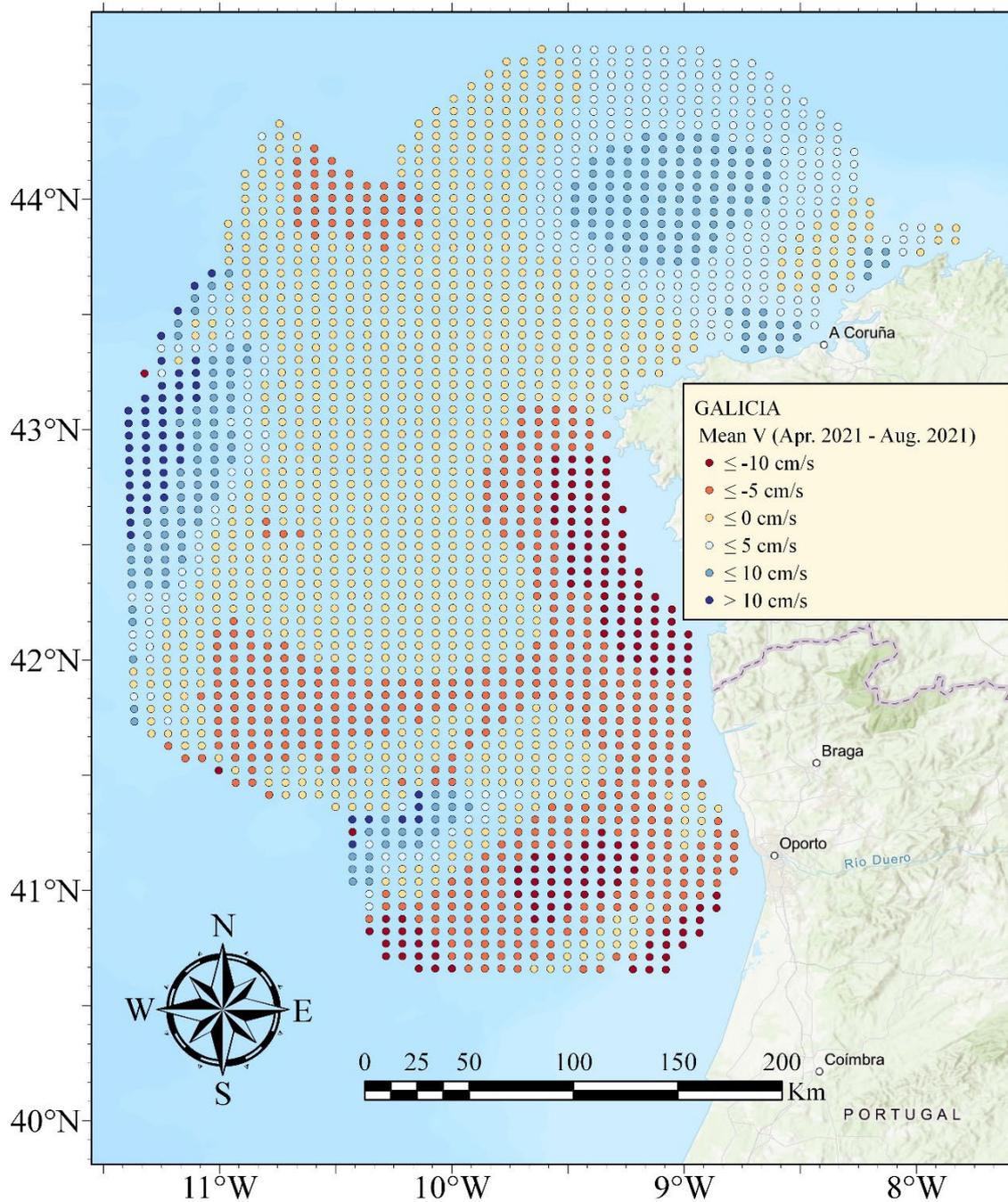
**Figura A43.** Cobertura (Coverage) en cada celda de medición de los vectores totales (RAIA\_NW\_Iberian) para el periodo comprendido entre abril 2021 y agosto de 2021.



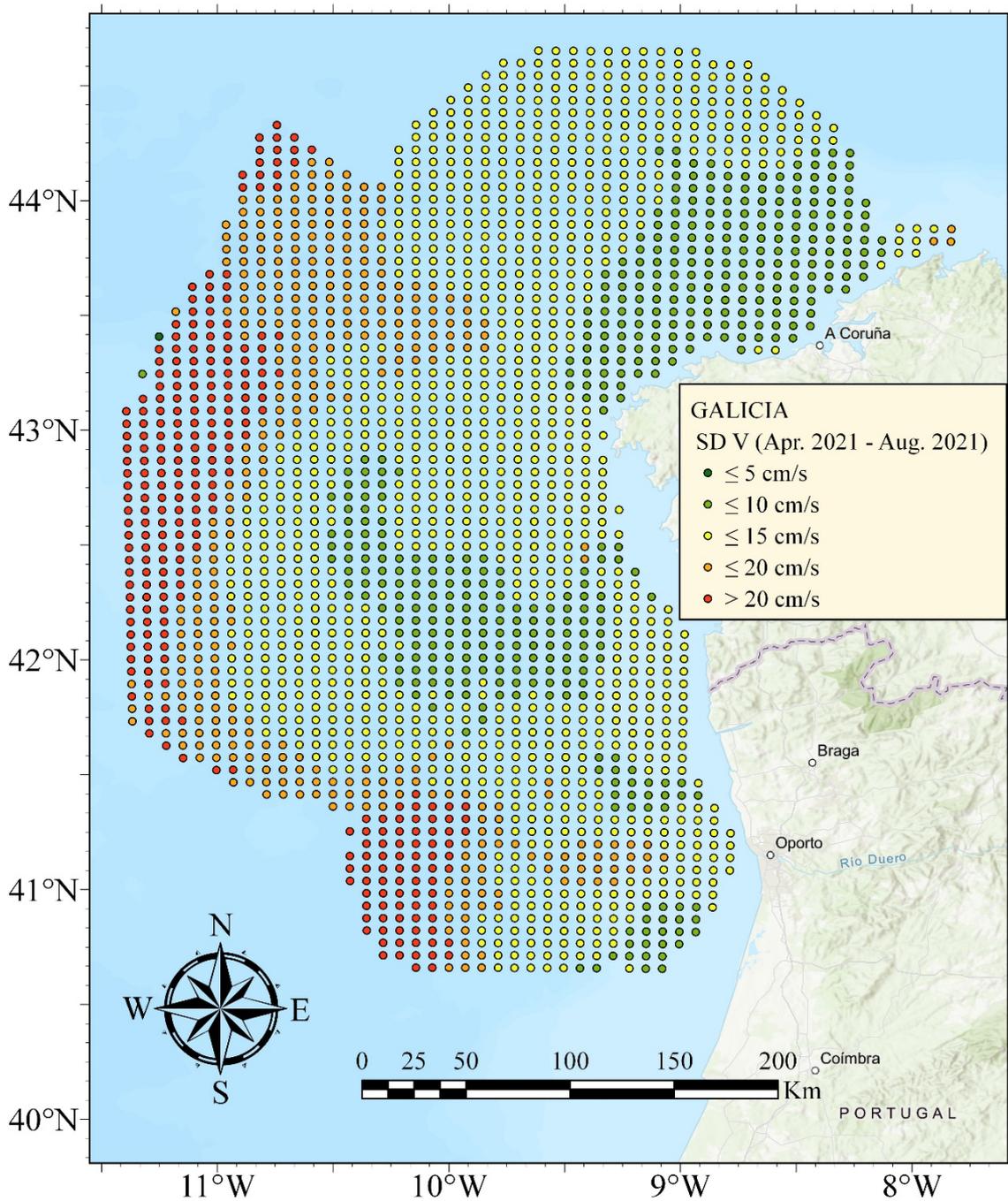
**Figura A44.** Media temporal de la componente x de la velocidad (U) en cada celda de medición de los vectores totales (RAIA\_NW\_Iberian) para el periodo comprendido entre abril 2021 y agosto de 2021.



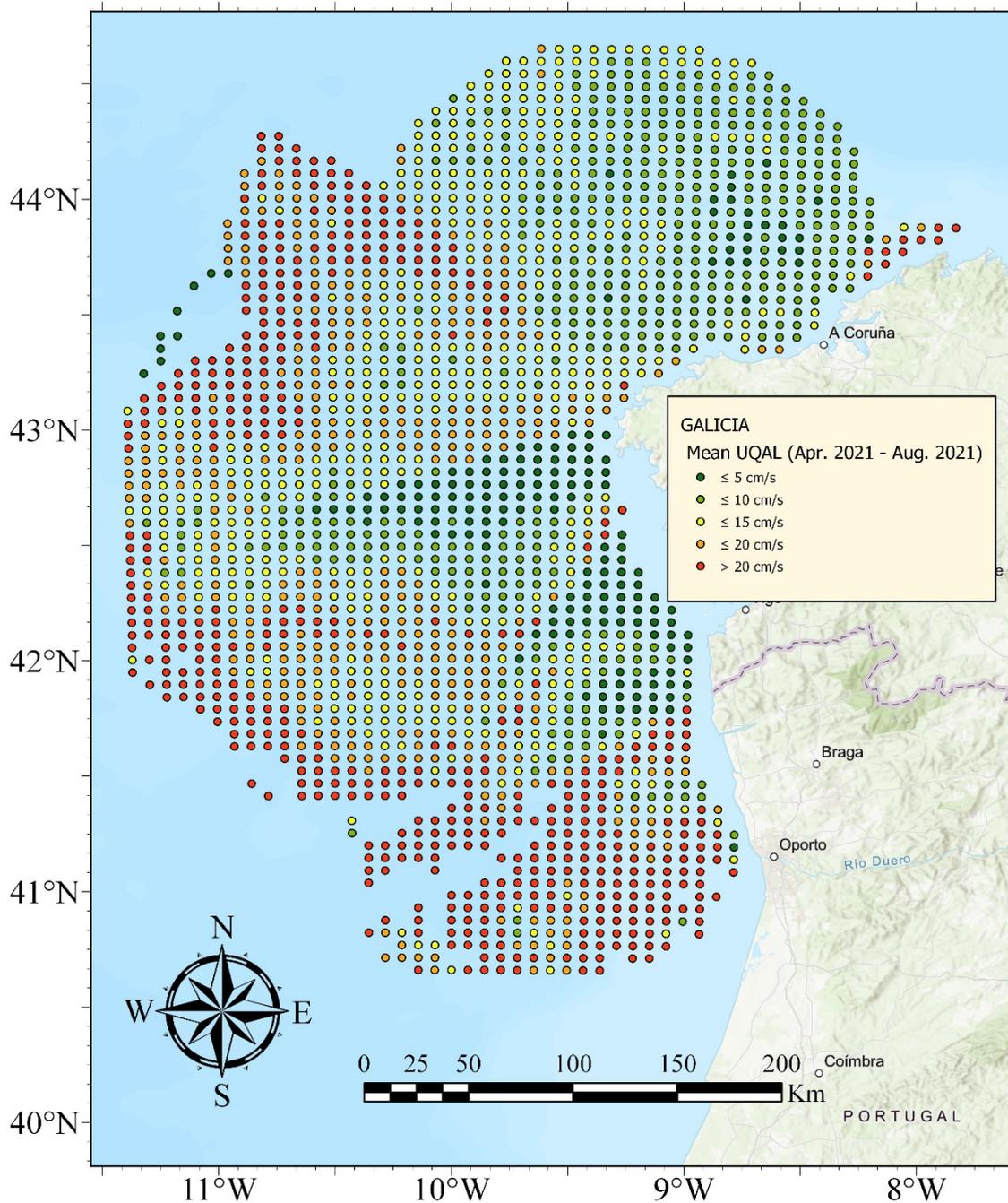
**Figura A45.** Desviación estándar temporal de U (SD U) en cada celda de medición de los vectores totales (RAIA\_NW\_Iberian) para el periodo comprendido entre abril 2021 y agosto de 2021.



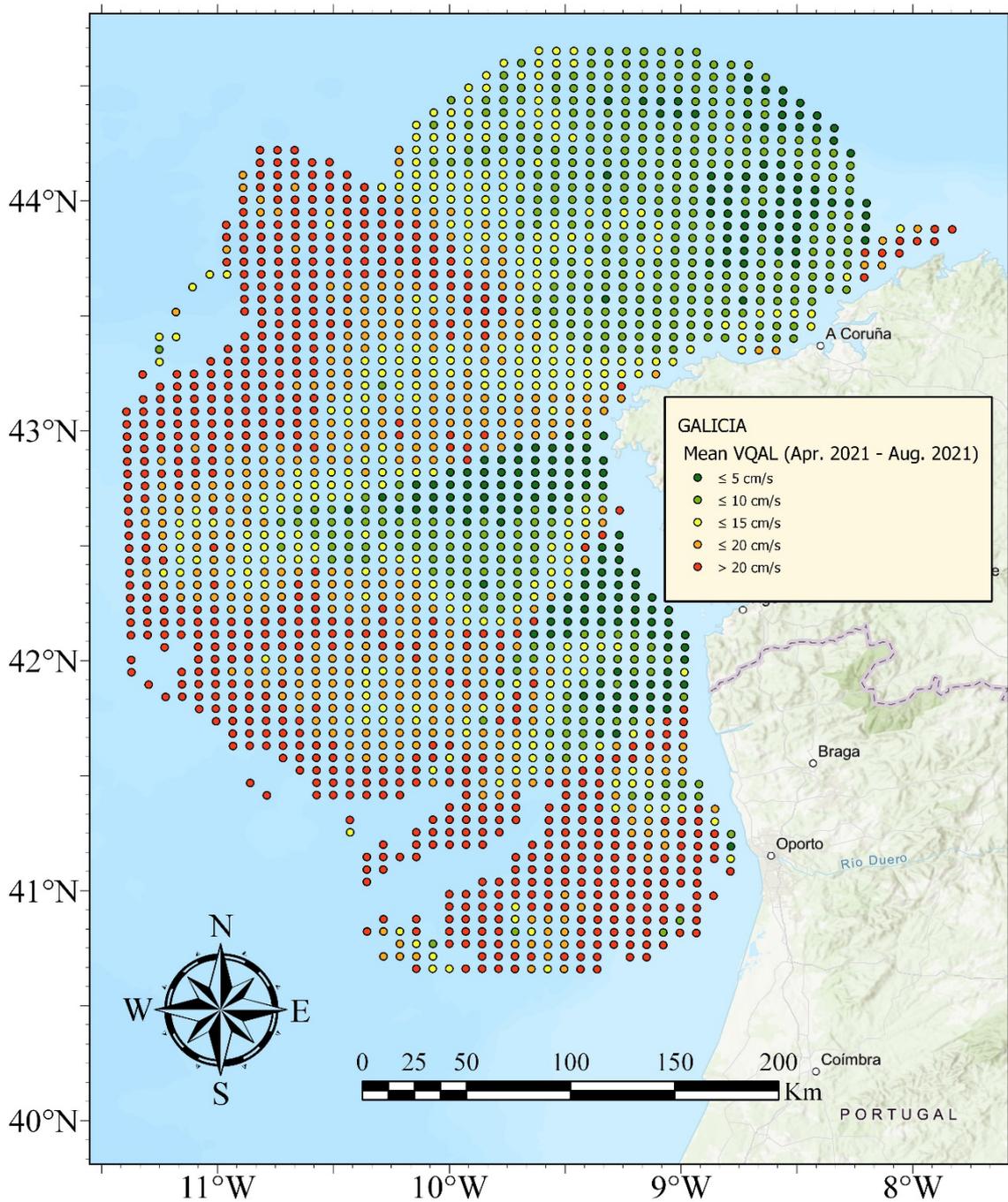
**Figura A46.** Media temporal de la componente y de la velocidad (V) en cada celda de medición de los vectores totales (RAIA\_NW\_Iberian) para el periodo comprendido entre abril 2021 y agosto de 2021.



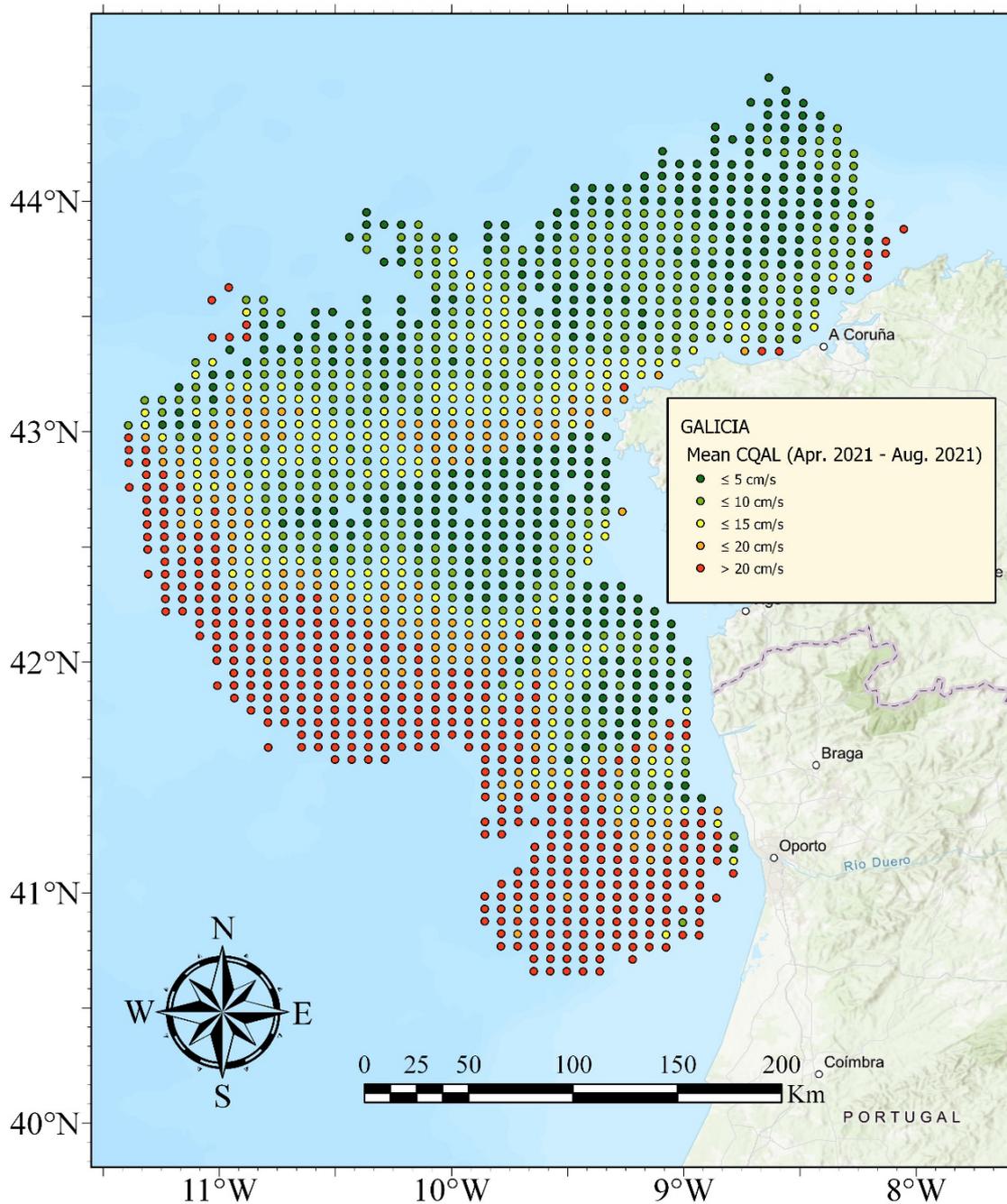
**Figura A47.** Desviación estándar temporal de V (SD V) en cada celda de medición de los vectores totales (RAIA\_NW\_Iberian) para el periodo comprendido entre abril 2021 y agosto de 2021.



**Figura A48.** Media temporal de la estima de la desviación estándar de U (UQAL) en cada celda de medición de los vectores totales (RAIA\_NW\_Iberian) para el periodo comprendido entre abril 2021 y agosto de 2021.



**Figura A49.** Media temporal de la estima de la desviación estándar de V (VQAL) en cada celda de medición de los vectores totales (RAIA\_NW\_Iberian) para el periodo comprendido entre abril 2021 y agosto de 2021.



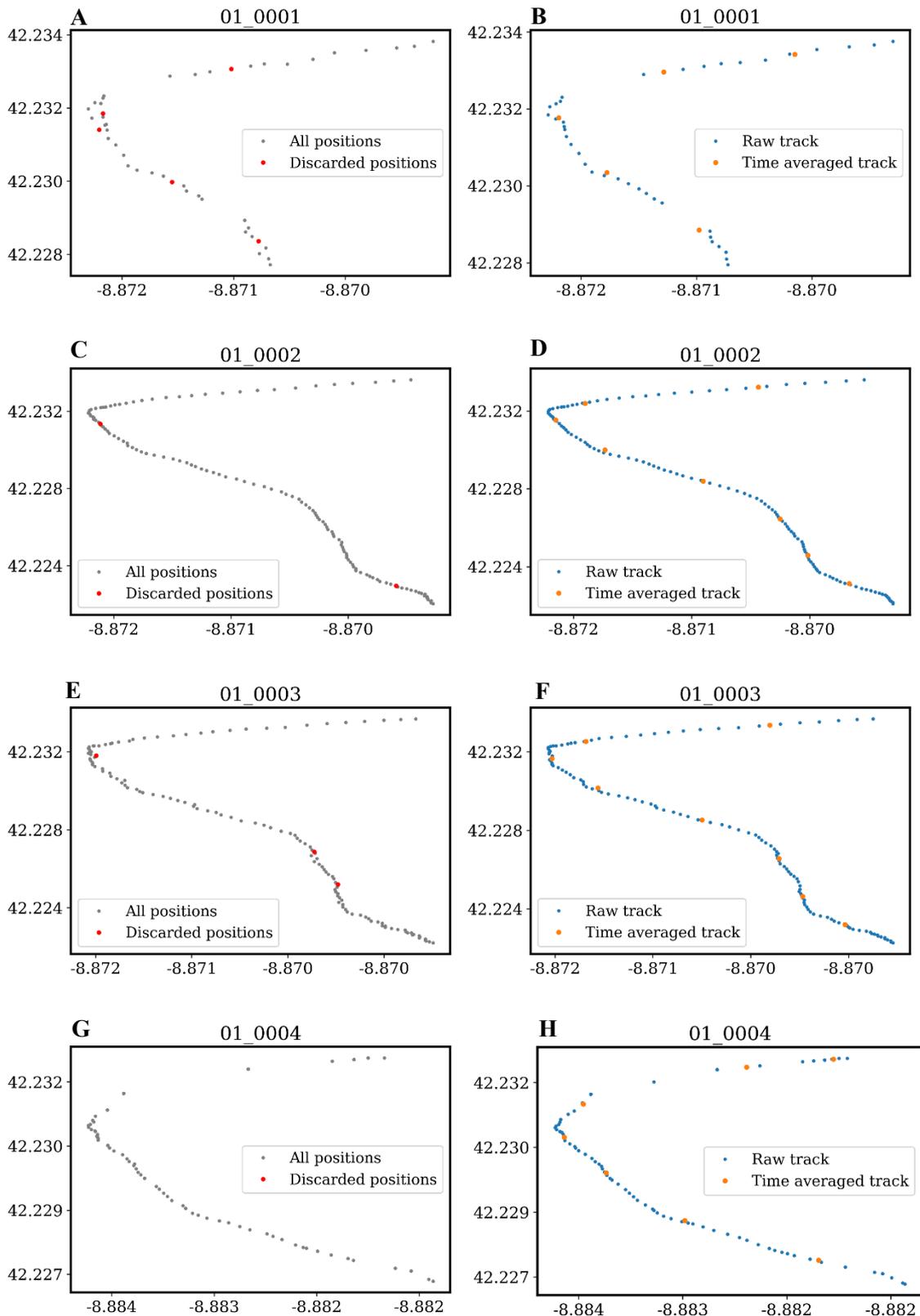
**Figura A50.** Media temporal de la estima de la covarianza U-V (CQAL) en cada celda de medición de los vectores totales (RAIA\_NW\_Iberian) para el periodo comprendido entre abril 2021 y agosto de 2021.

## 8. Anexo B. Mapas de procesado de trazas de boyas

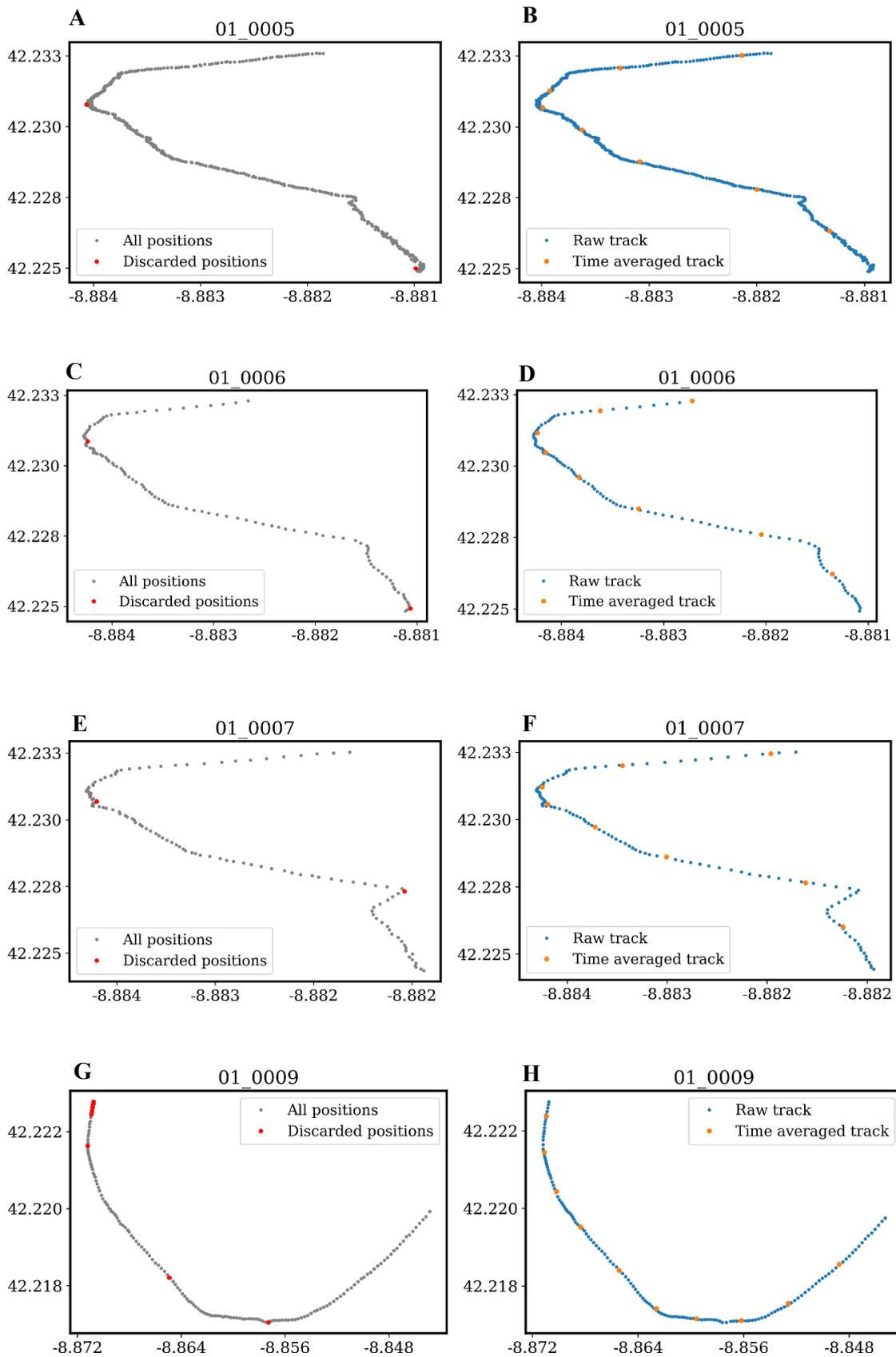
### 8.1. Procesado trazas boyas GPRS

Campaña GPRS1				Campaña GPRS2			
Cód. Boya	Inicio (UTC)	Fin (UTC)	Núm. Posiciones	Cód. Boya	Inicio (UTC)	Fin (UTC)	Núm. Posiciones
01_0001	6/9/21 7:31	6/9/21 11:37	49	02_0025	9/9/21 6:30	9/9/21 11:43	3528
01_0002	6/9/21 7:31	6/9/21 11:37	129	02_0026	9/9/21 6:30	9/9/21 11:40	151
01_0003	6/9/21 7:31	6/9/21 11:37	130	02_0027	9/9/21 6:30	9/9/21 11:40	1746
01_0004	6/9/21 7:05	6/9/21 10:23	99	02_0028	9/9/21 6:30	9/9/21 11:40	173
01_0005	6/9/21 7:05	6/9/21 11:03	475	02_0029	9/9/21 6:30	9/9/21 11:43	3490
01_0006	6/9/21 7:13	6/9/21 11:03	115	02_0030	9/9/21 6:37	9/9/21 11:27	145
01_0007	6/9/21 7:05	6/9/21 11:03	119	02_0031	9/9/21 6:37	9/9/21 11:27	146
01_0009	6/9/21 6:55	6/9/21 12:01	271	02_0032	9/9/21 6:37	9/9/21 11:27	145
01_0011	6/9/21 7:01	6/9/21 10:29	108	02_0033	9/9/21 6:37	9/9/21 11:24	144
01_0012	6/9/21 7:10	6/9/21 11:44	138	02_0034	9/9/21 6:37	9/9/21 11:27	1739
01_0013	6/9/21 6:44	6/9/21 22:51	638	02_0035	9/9/21 6:47	9/9/21 16:56	317
01_0014	6/9/21 8:46	6/9/21 11:36	73	02_0036	9/9/21 6:47	9/9/21 16:56	304
01_0015	6/9/21 7:23	6/9/21 11:49	134	02_0037	9/9/21 6:47	9/9/21 8:17	339
01_0016	6/9/21 6:39	6/9/21 11:29	146	02_0038	9/9/21 6:47	9/9/21 16:56	306
01_0017	6/9/21 6:38	6/9/21 11:28	235	02_0039	9/9/21 6:47	9/9/21 16:56	521
01_0018	6/9/21 6:40	6/9/21 11:28	147	02_0040	9/9/21 6:51	9/9/21 10:22	2537
01_0019	6/9/21 6:40	6/9/21 11:31	241	02_0041	9/9/21 6:51	9/9/21 10:22	106
01_0020	6/9/21 6:29	6/9/21 10:29	184	02_0042	9/9/21 6:51	9/9/21 10:22	105
01_0021	6/9/21 6:28	6/9/21 11:35	146	02_0043	9/9/21 6:51	9/9/21 10:22	2540
01_0022	6/9/21 8:32	6/9/21 11:59	2495	02_0044	9/9/21 6:51	9/9/21 10:22	2542

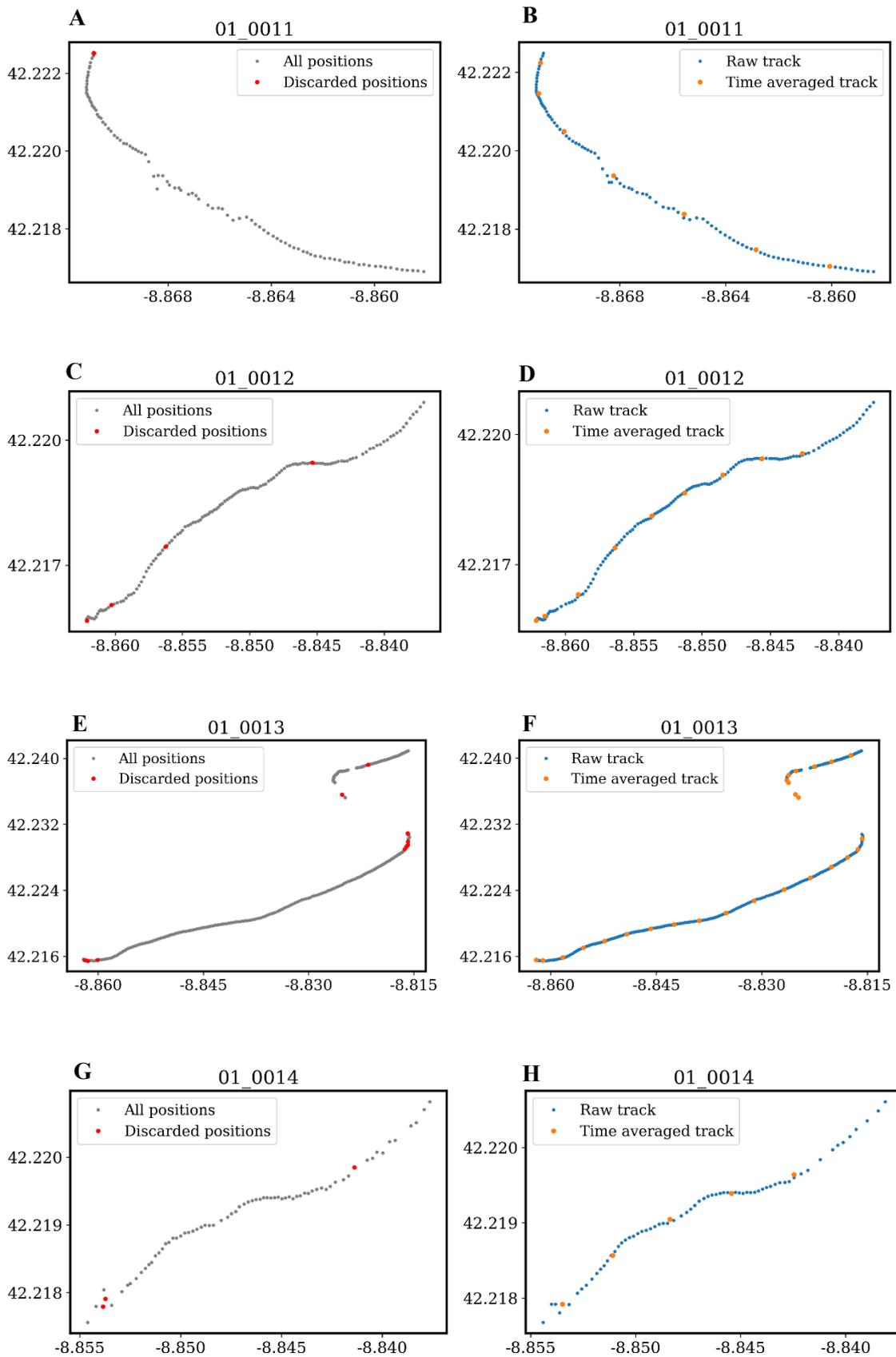
**Tabla B1.** Listado de boyas GPRS liberadas en la Ría de Vigo para validaciones en RAIA\_Vigo durante las dos campañas GPRS con las fechas de inicio y final sus registros de posiciones GPS.



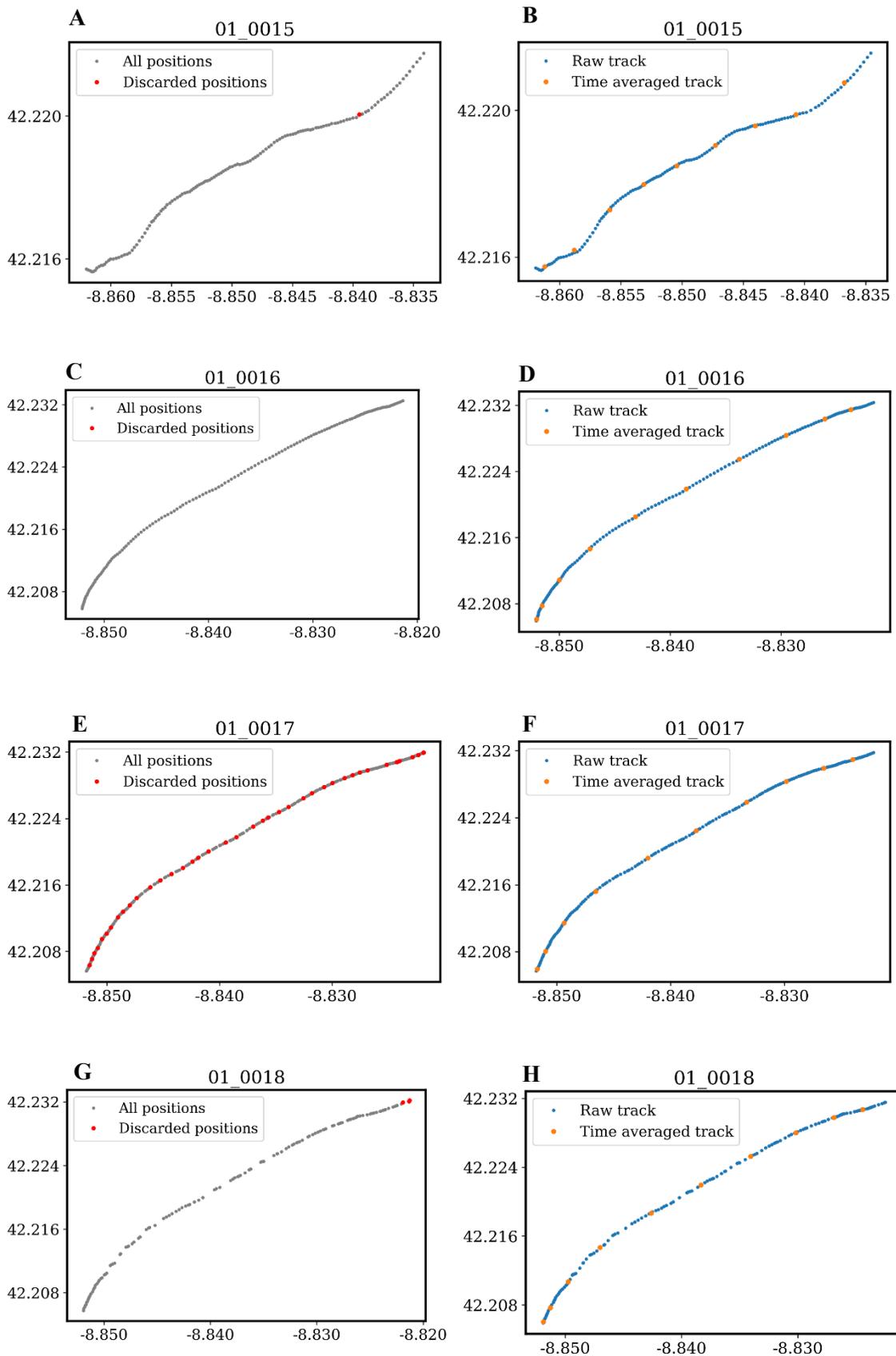
**Figura B1.** Boyas de la campaña GPRS1. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y *outliers* en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título de la gráfica).



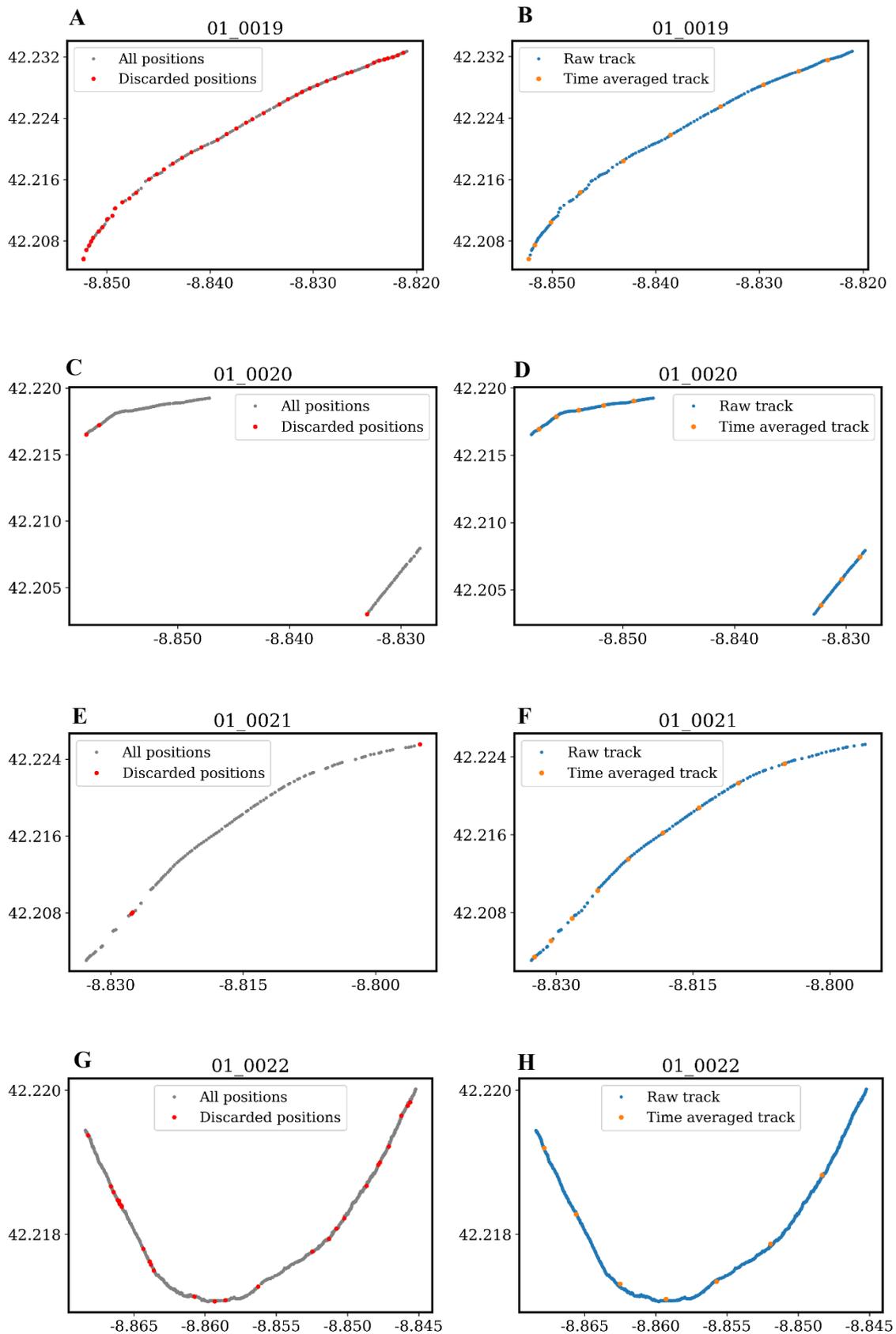
**Figura B2.** Boyas de la campaña GPRS1. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y *outliers* en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título de la gráfica).



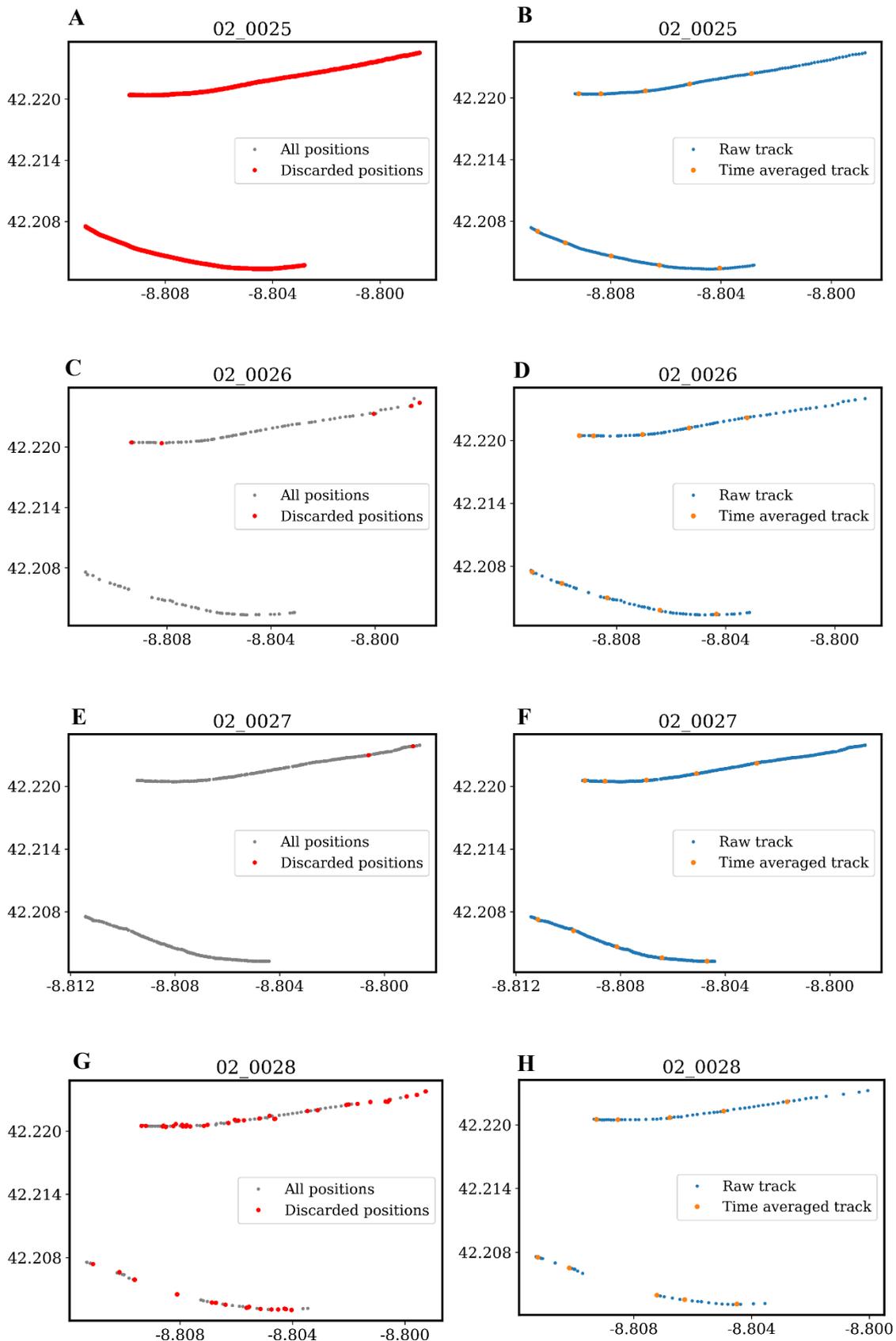
**Figura B3.** Boyas de la campaña GPRS1. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y outliers en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título de la gráfica).



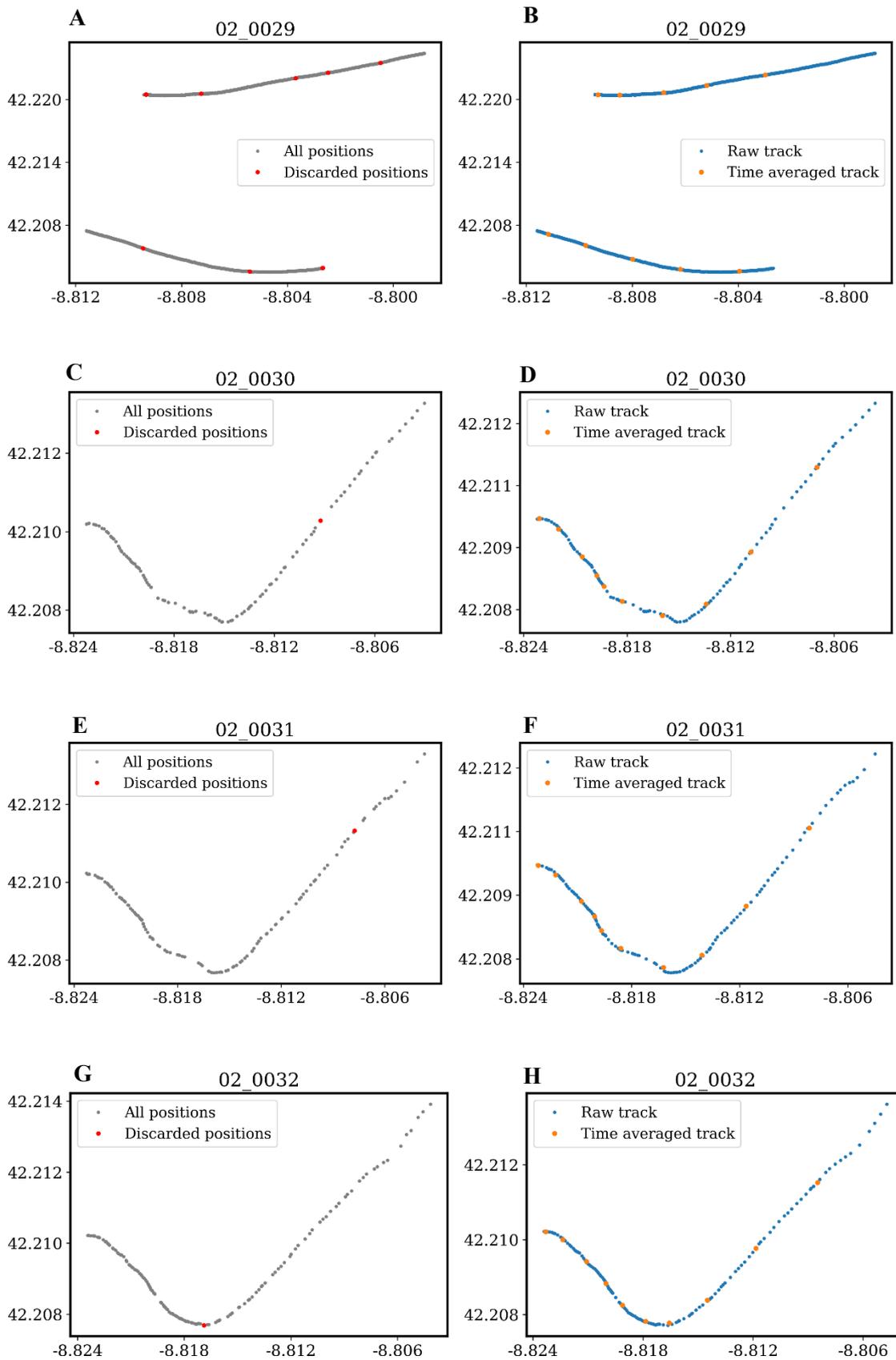
**Figura B4.** Boyas de la campaña GPRS1. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y outliers en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título de la gráfica).



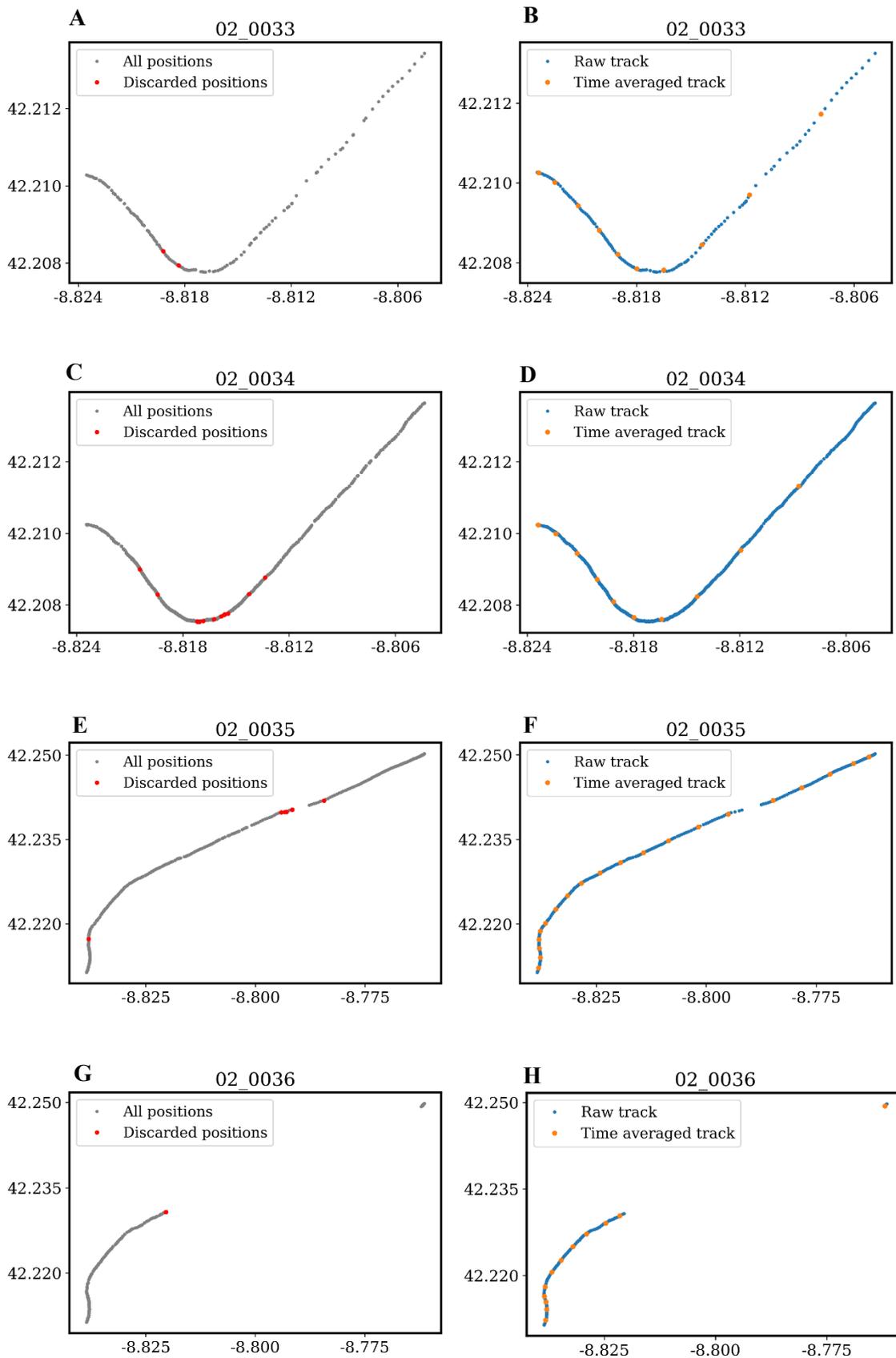
**Figura B5.** Boyas de la campaña GPRS1. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y outliers en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título de la gráfica).



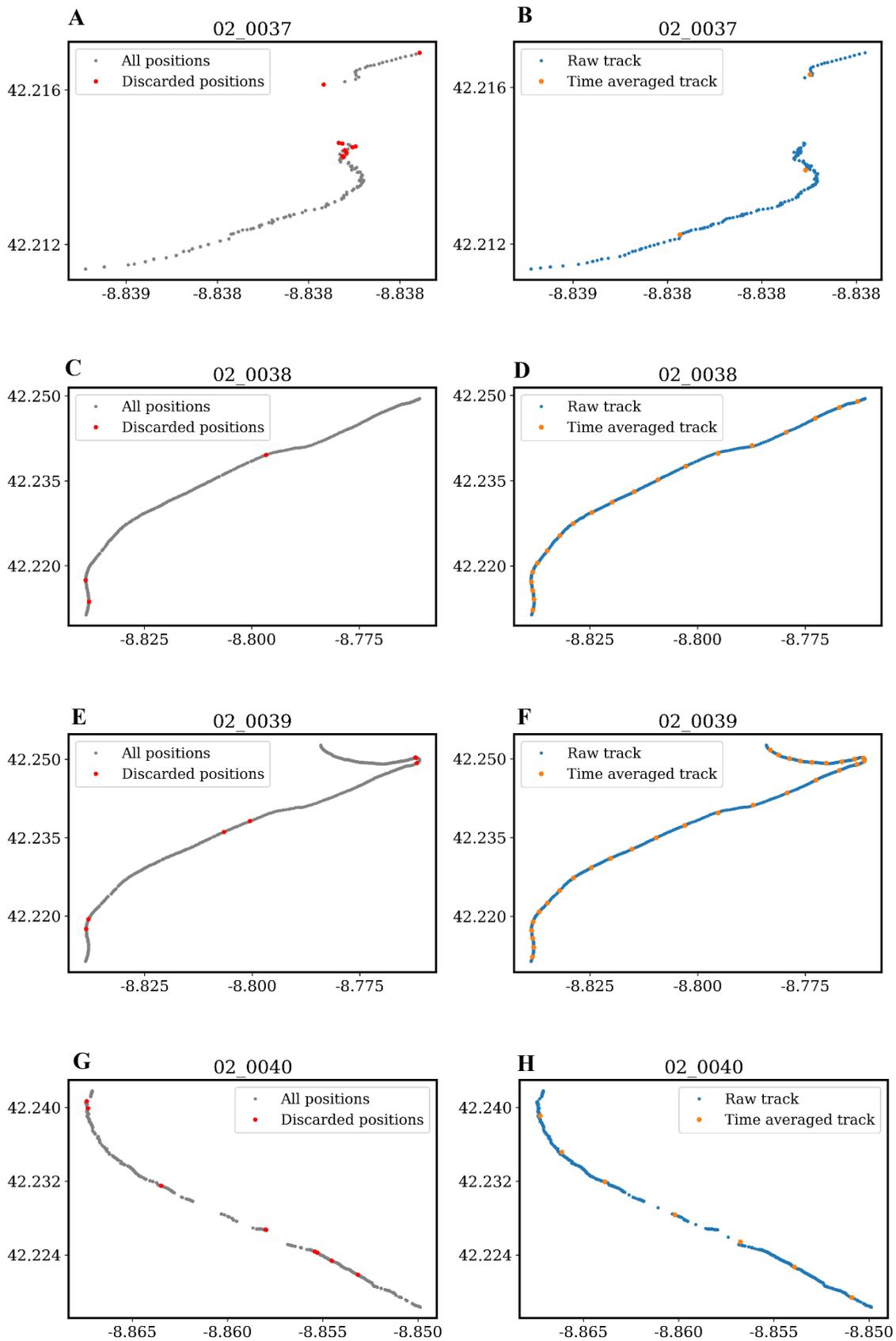
**Figura B6.** Boyas de la campaña GPRS2. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y *outliers* en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título de la gráfica).



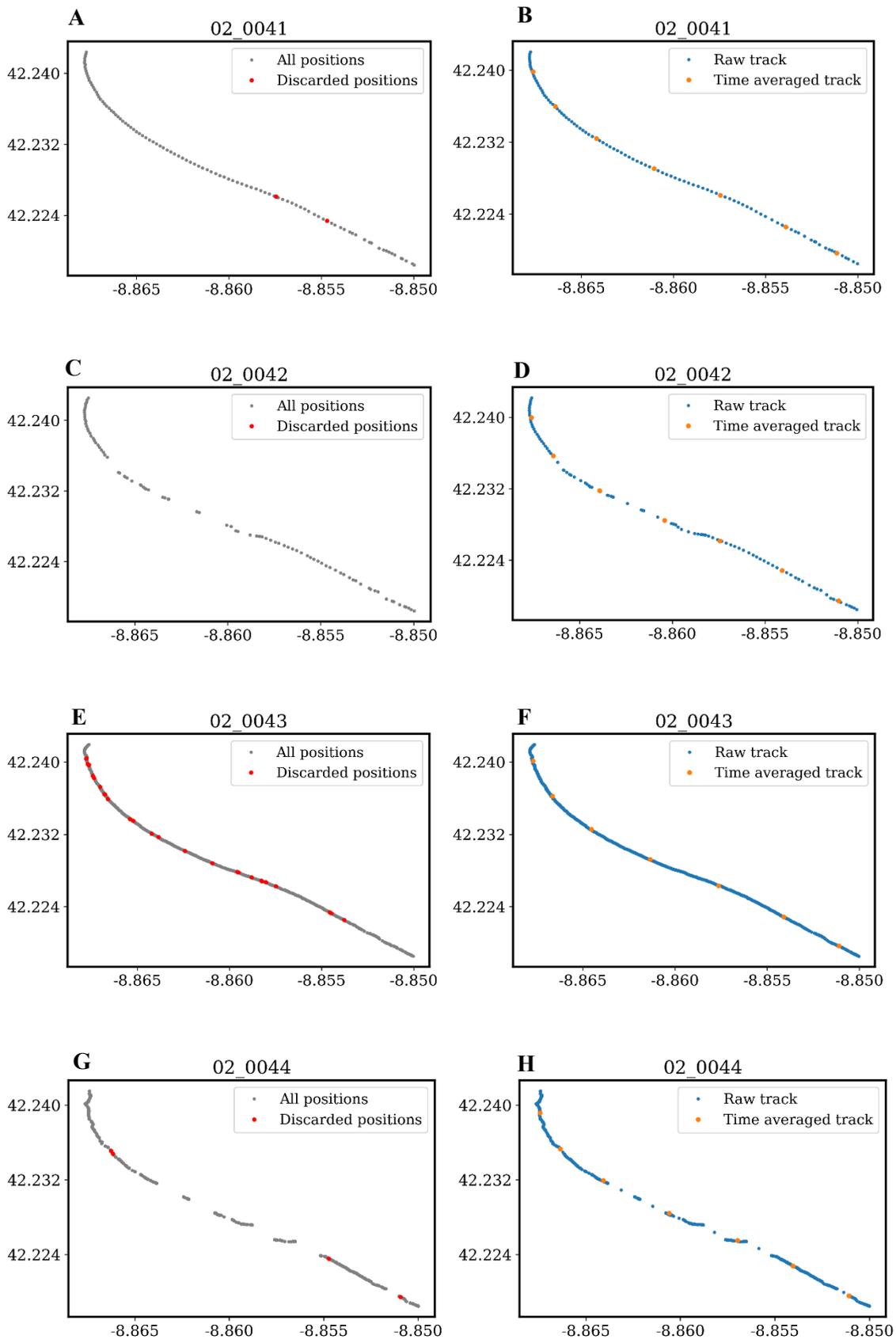
**Figura B7.** Boyas de la campaña GPRS2. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y *outliers* en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título de la gráfica).



**Figura B8.** Boyas de la campaña GPRS2. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y *outliers* en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título de la gráfica).



**Figura B9.** Boyas de la campaña GPRS2. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y *outliers* en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título de la gráfica).



**Figura B10.** Boyas de la campaña GPRS2. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y *outliers* en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título de la gráfica).

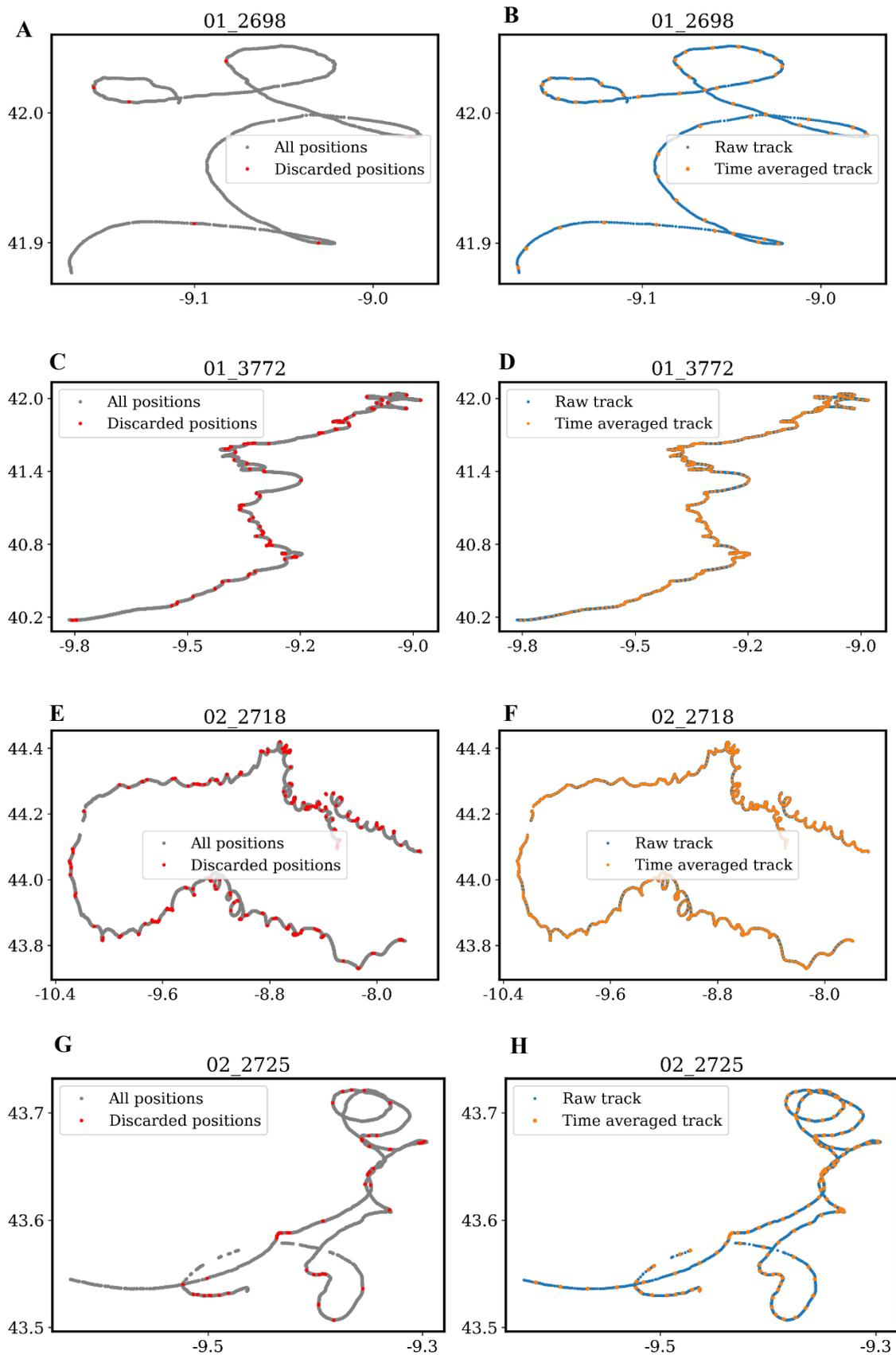
## 8.2. Procesado trazas boyas SPOT

<b>Campaña SPOT1: Oil Spill Mycoast/Meloa</b>			
<b>Boya</b>	<b>Inicio (UTC)</b>	<b>Fin (UTC)</b>	<b>Posiciones</b>
01_2698	22/09/2020 08:01:55	24/09/2020 08:35:58	1087
01_3772	22/09/2020 08:01:59	12/03/2021 20:06:13	79173

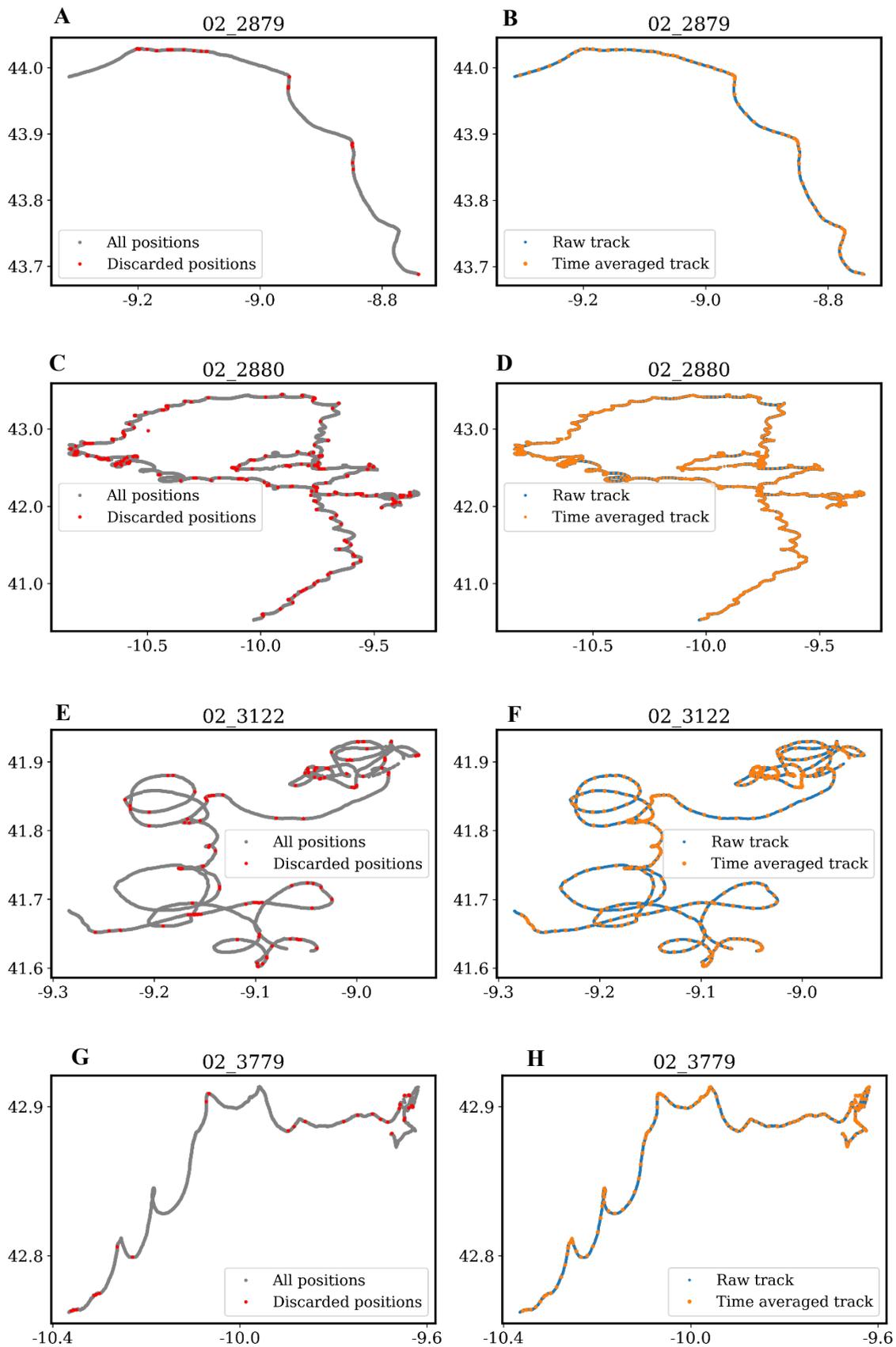
<b>Campaña SPOT2: IEO-Pelacus</b>			
<b>Boya</b>	<b>Inicio (UTC)</b>	<b>Fin (UTC)</b>	<b>Posiciones</b>
02_2718	17/04/2021 16:58:03	18/05/2021 10:30:10	15683
02_2725	01/04/2021 19:01:20	06/04/2021 22:32:00	2516
02_2879	03/04/2021 11:06:31	06/04/2021 05:42:19	1405
02_2880	29/3/2021 11:09:05	10/08/2021 10:33:58	67866
02_3122	28/03/2021 21:27:07	12/04/2021 05:19:52	7226
02_3779	01/04/2021 08:34:13	07/04/2021 00:44:03	2774

<b>Campaña SPOT3: Gardacostas de Galicia</b>			
<b>Boya</b>	<b>Inicio (UTC)</b>	<b>Fin (UTC)</b>	<b>Posiciones</b>
03_2753	03/06/2021 15:00:00	10/08/2021 10:33:00	35247
03_2698	05/08/2021 09:03:00	16/08/2021 14:52:00	6006

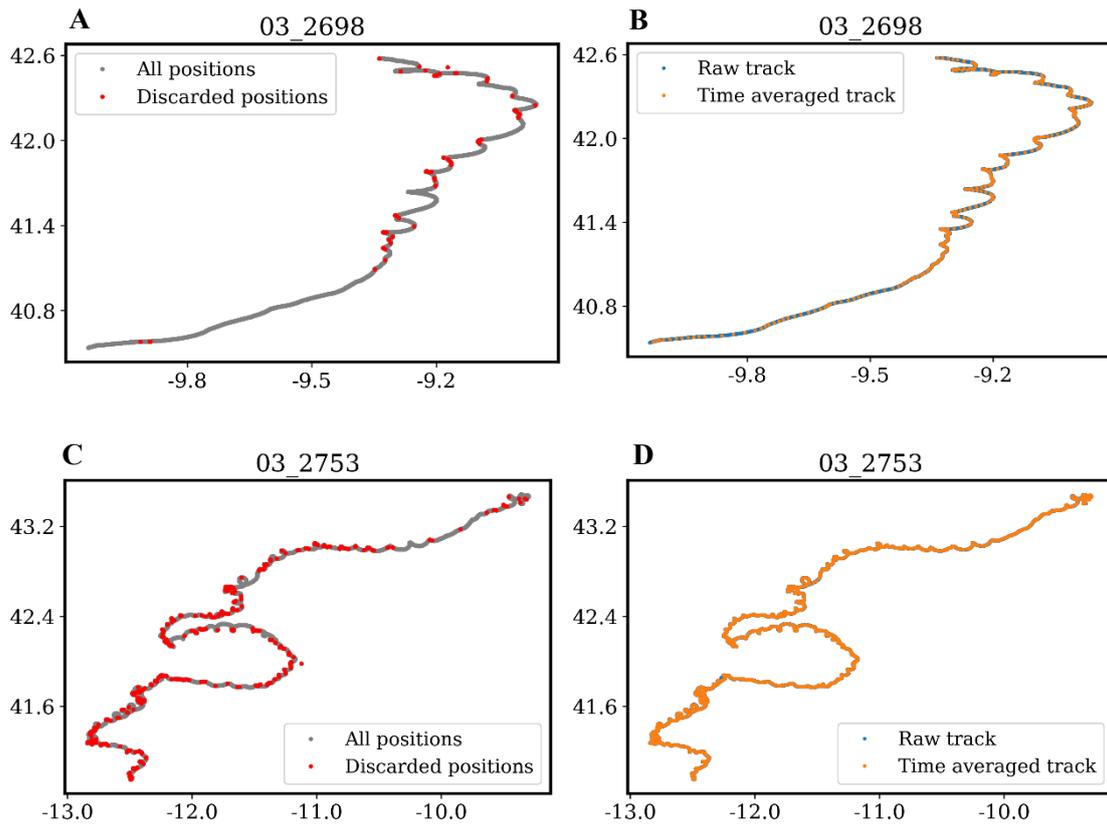
**Tabla B2.** Listado de boyas SPOT liberadas en la plataforma oceánica para validaciones en RAIA\_NW\_Iberian durante las tres campañas SPOT con las fechas de inicio y final de sus registros de posiciones GPS.



**Figura B11.** Boyas de las campañas SPOT1 (A-D) y 2 (E-H). Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y outliers en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesamiento de una boya (código de boya en el título).

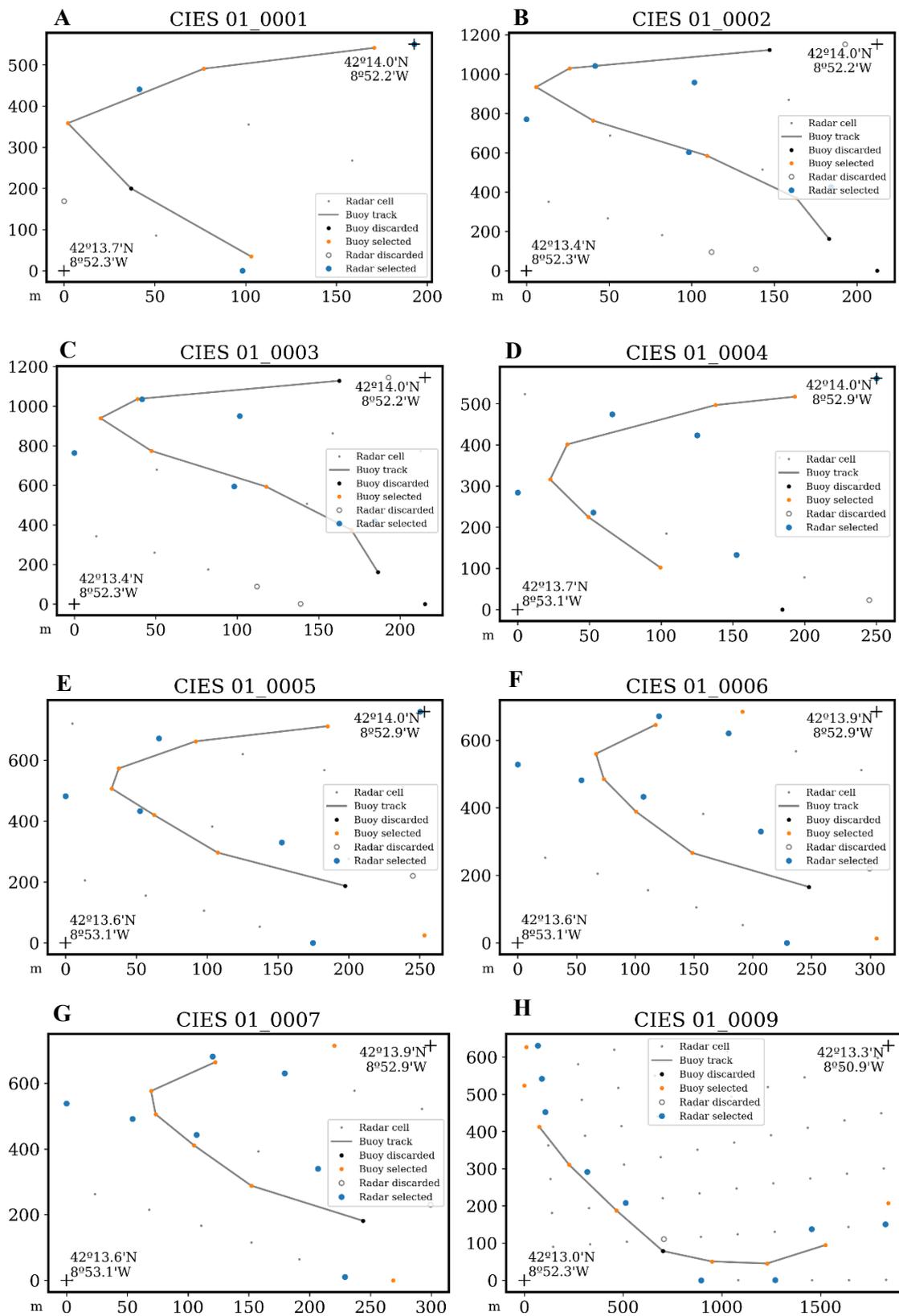


**Figura B12.** Boyas de la campaña SPOT 2. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y *outliers* en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título).

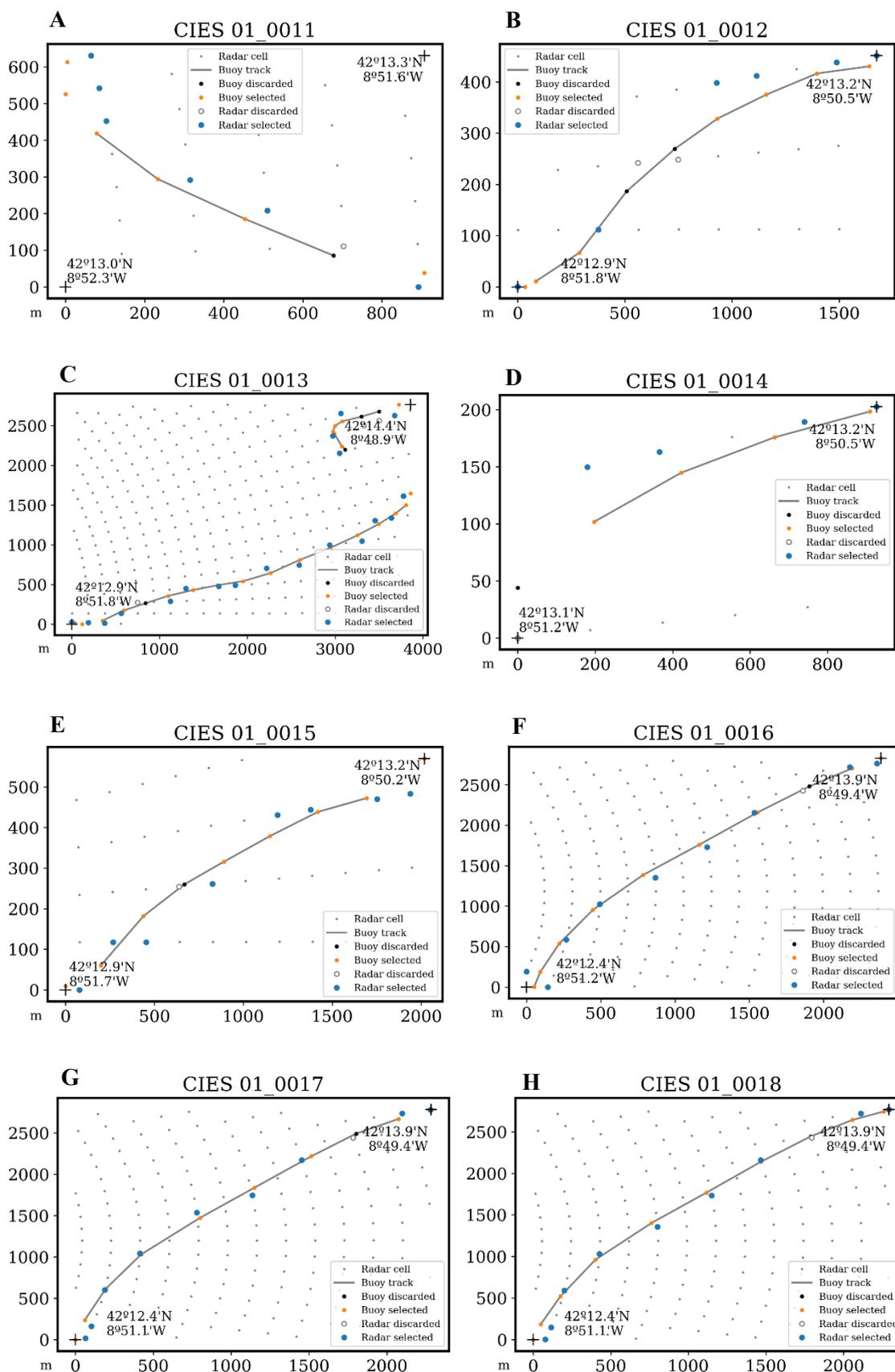


**Figura B13.** Boyas de la campaña SPOT3. Columna izquierda: posiciones de GPS registradas (gris) por las boyas y las posiciones eliminadas (rojo) por los criterios de criba (duplicados, velocidad máxima y outliers en posición). Columna derecha: traza bruta a partir de los datos cribados (azul) y traza promediada en el tiempo (naranja). Cada fila representa el procesado de una boya (código de boya en el título).

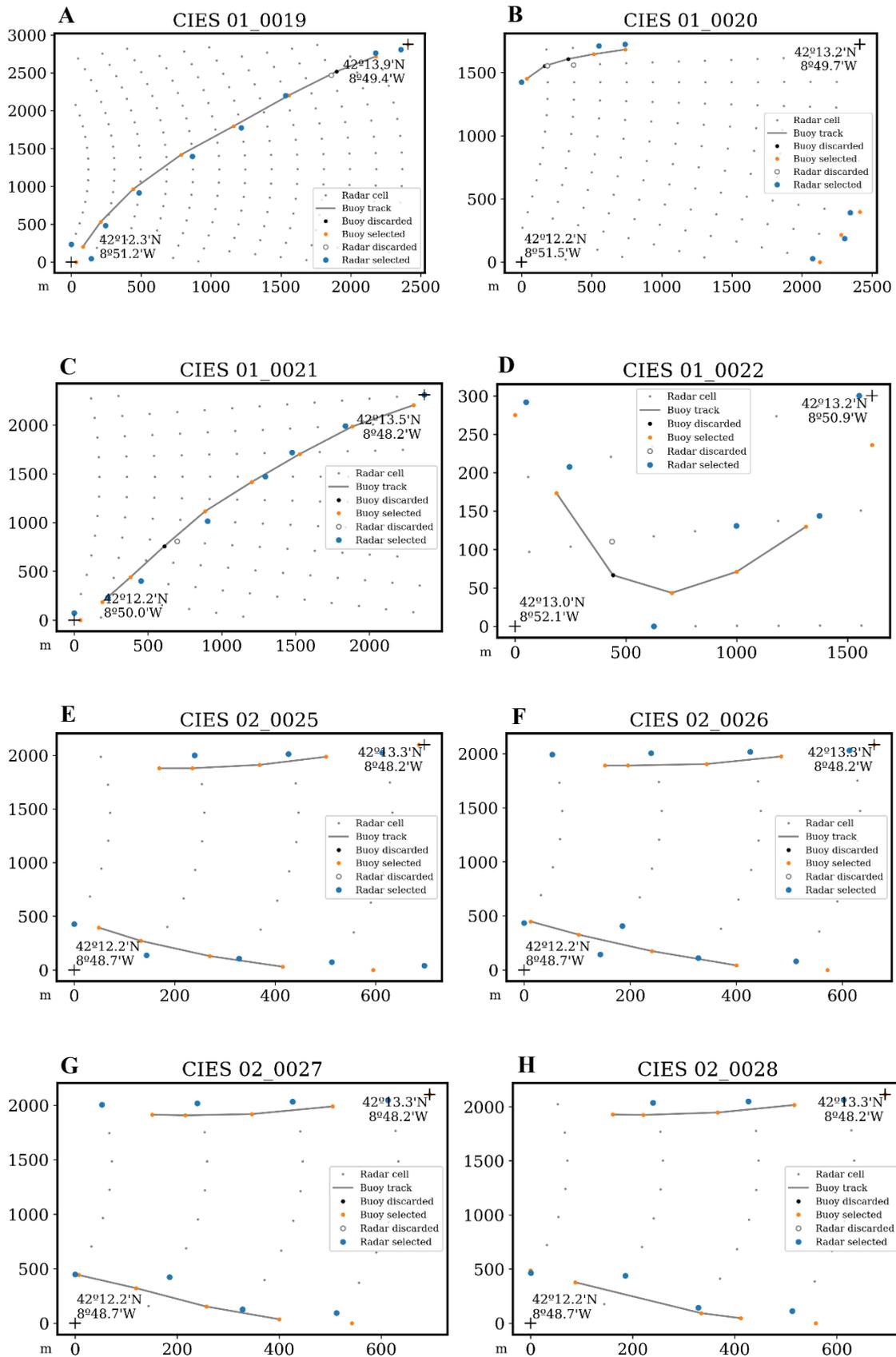
### 8.3. Emparejamiento trazas con antena Cíes



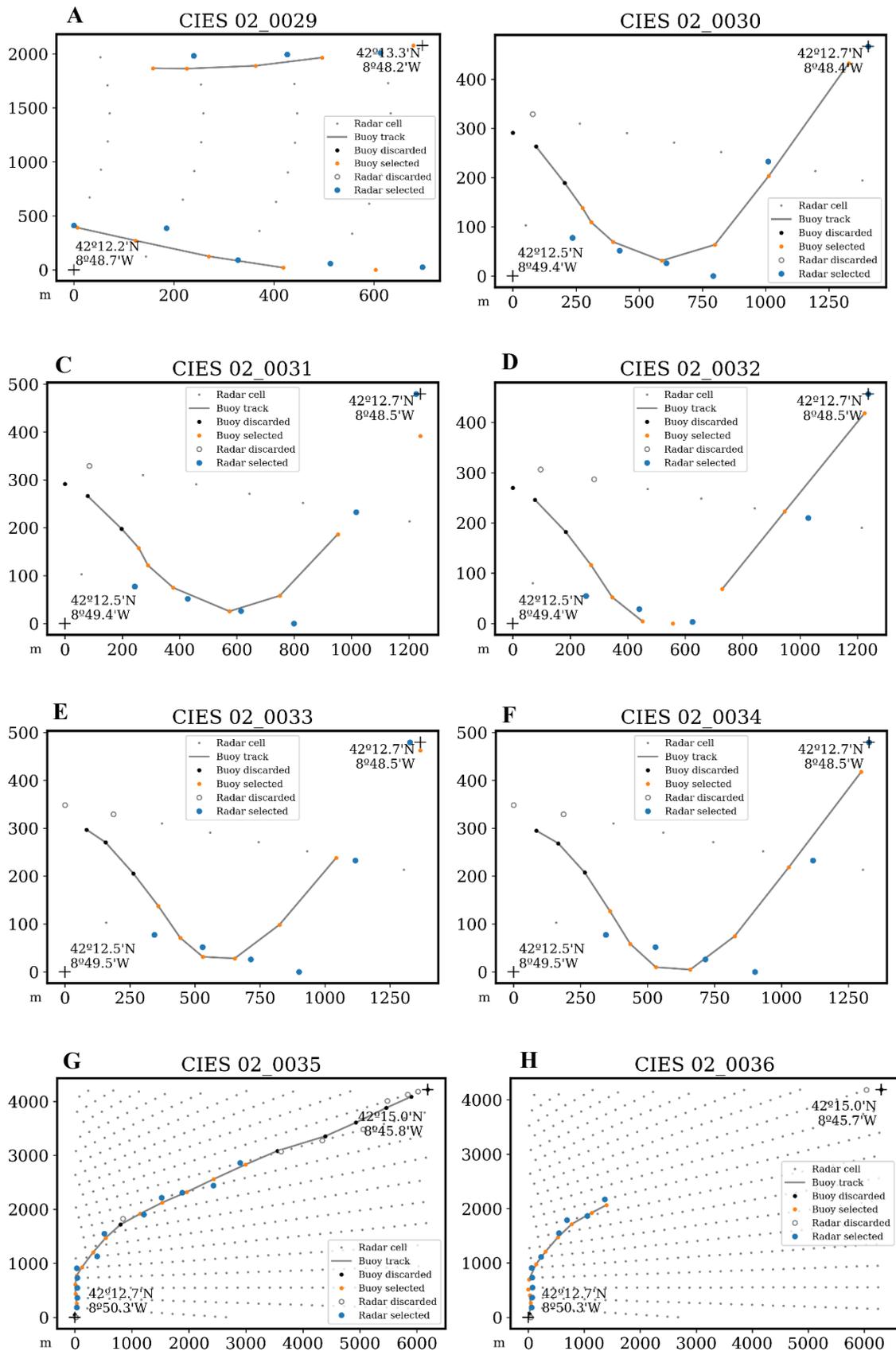
**Figura B14.** Emparejamiento en tiempo y espacio de velocidades de trazas promediadas temporalmente (línea gris) con datos horarios de las celdas (puntos grises) de la antena de Cíes. Los datos de radar con VFLG>0 son descartados (cír. blancos), los datos de la traza que encuentran pareja en el radar (cír. azules) son seleccionados (cír. naranjas) o descartados (cír. negros) en caso contrario.



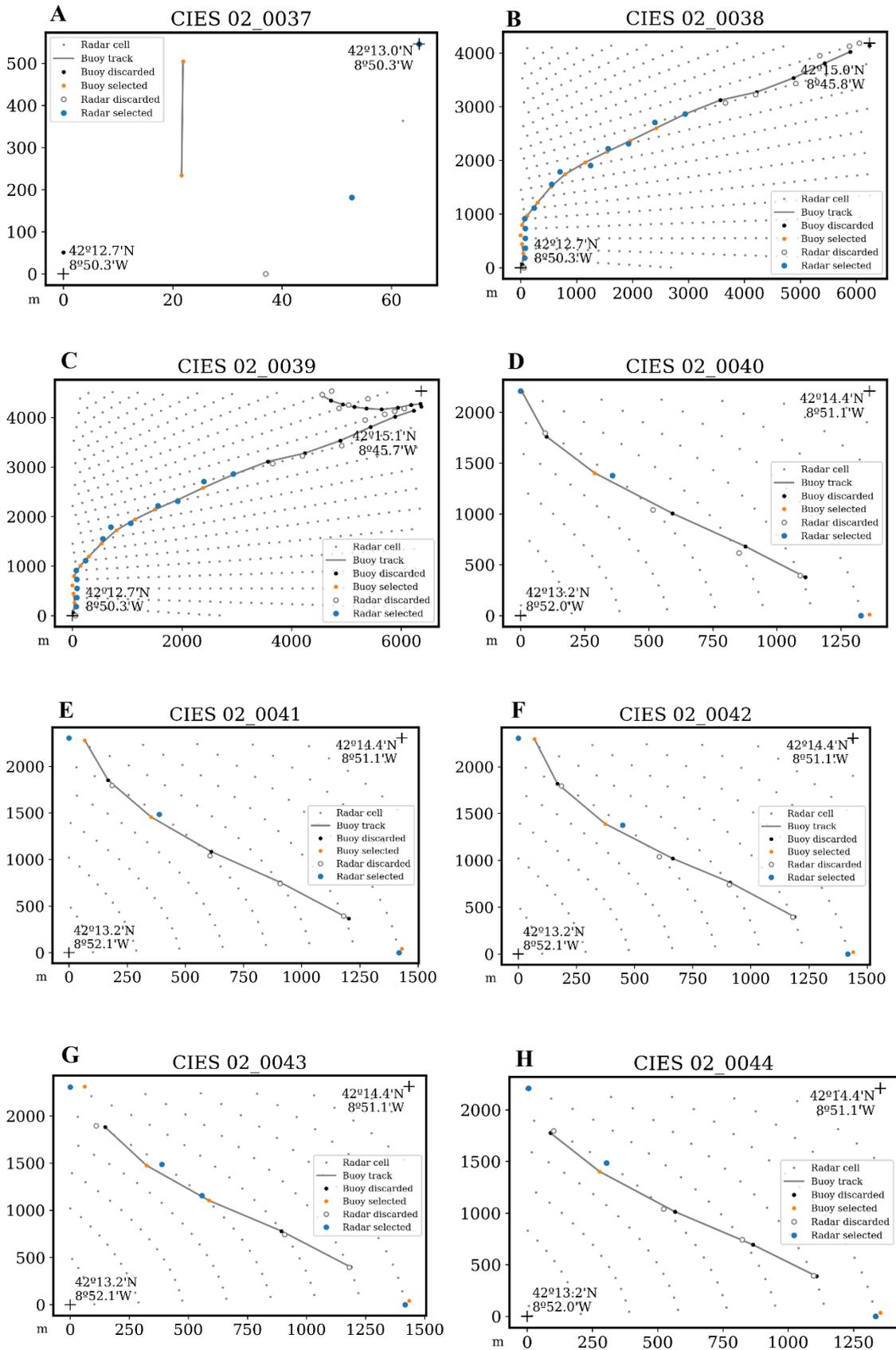
**Figura B15.** Emparejamiento en tiempo y espacio de velocidades de trazas promediadas temporalmente (línea gris) con datos horarios de las celdas (puntos grises) de la antena de Cíes. Los datos de radar con VFLG>0 son descartados (cír. blancos), los datos de la traza que encuentran pareja en el radar (cír. azules) son seleccionados (cír. naranjas) o descartados (cír. negros) en caso contrario.



**Figura B16.** Emparejamiento en tiempo y espacio de velocidades de trazas promediadas temporalmente (línea gris) con datos horarios de las celdas (puntos grises) de la antena de Cies. Los datos de radar con VFLG>0 son descartados (cír. blancos), los datos de la traza que encuentran pareja en el radar (cír. azules) son seleccionados (cír. naranjas) o descartados (cír. negros) en caso contrario.

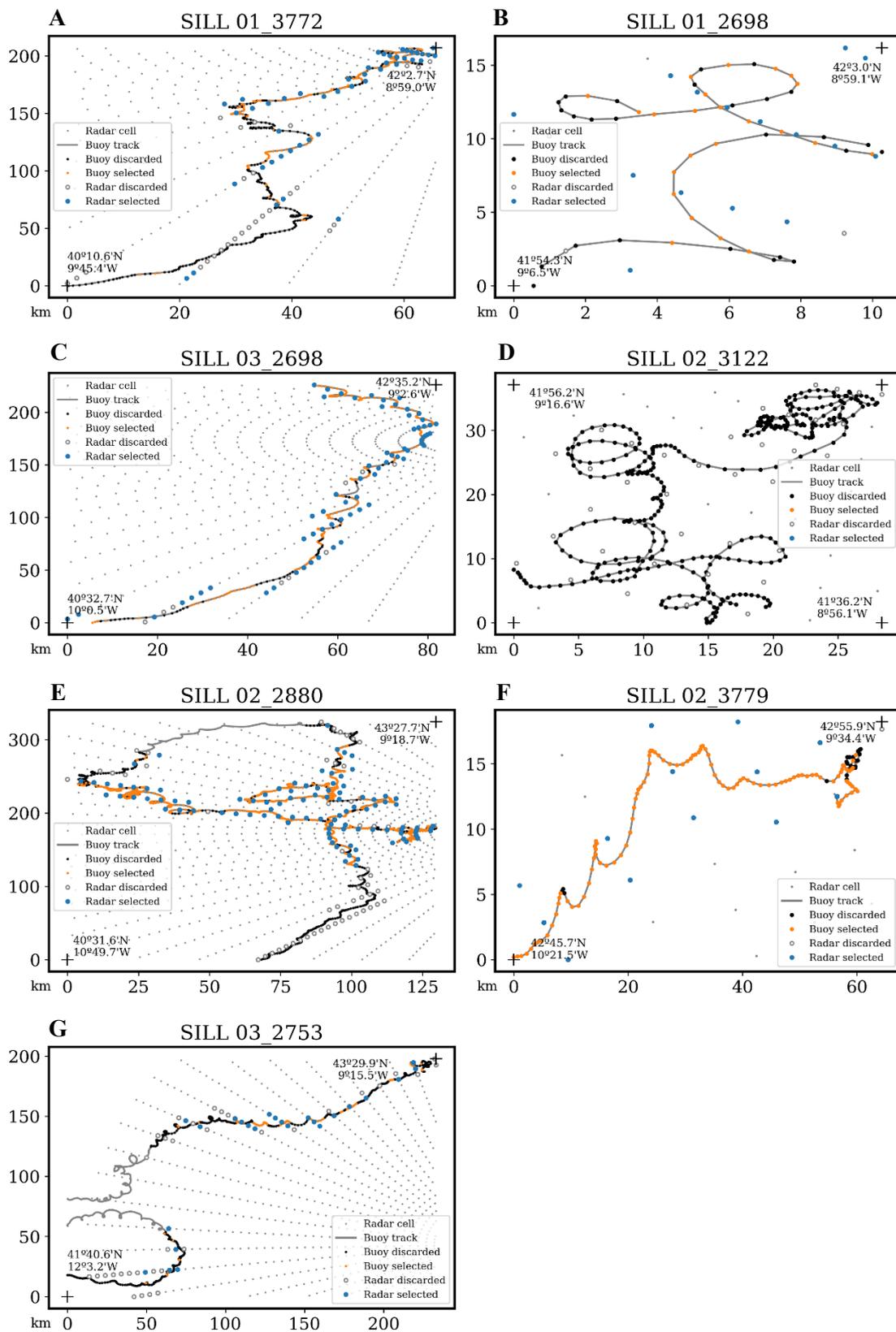


**Figura B17.** Emparejamiento en tiempo y espacio de velocidades de trazas promediadas temporalmente (línea gris) con datos horarios de las celdas (puntos grises) de la antena de Cies. Los datos de radar con VFLG>0 son descartados (cír. blancos), los datos de la traza que encuentran pareja en el radar (cír. azules) son seleccionados (cír. naranjas) o descartados (cír. negros) en caso contrario.



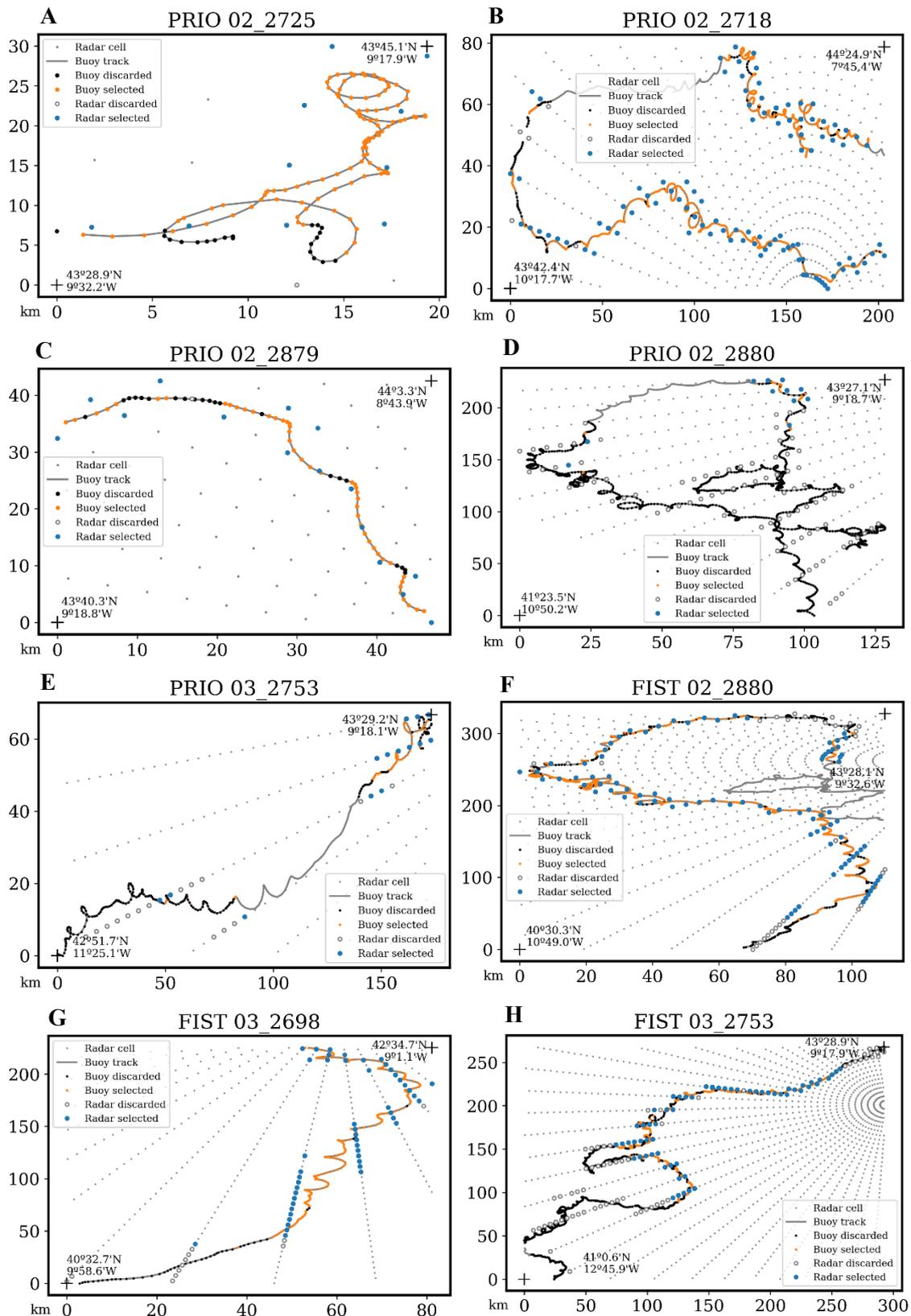
**Figura B18.** Emparejamiento en tiempo y espacio de velocidades de trazas promediadas temporalmente (línea gris) con datos horarios de las celdas (puntos grises) de la antena de Cies. Los datos de radar con VFLG>0 son descartados (cír. blancos), los datos de la traza que encuentran pareja en el radar (cír. azules) son seleccionados (cír. naranjas) o descartados (cír. negros) en caso contrario.

## 8.4. Emparejamiento trazas con antena Silleiro



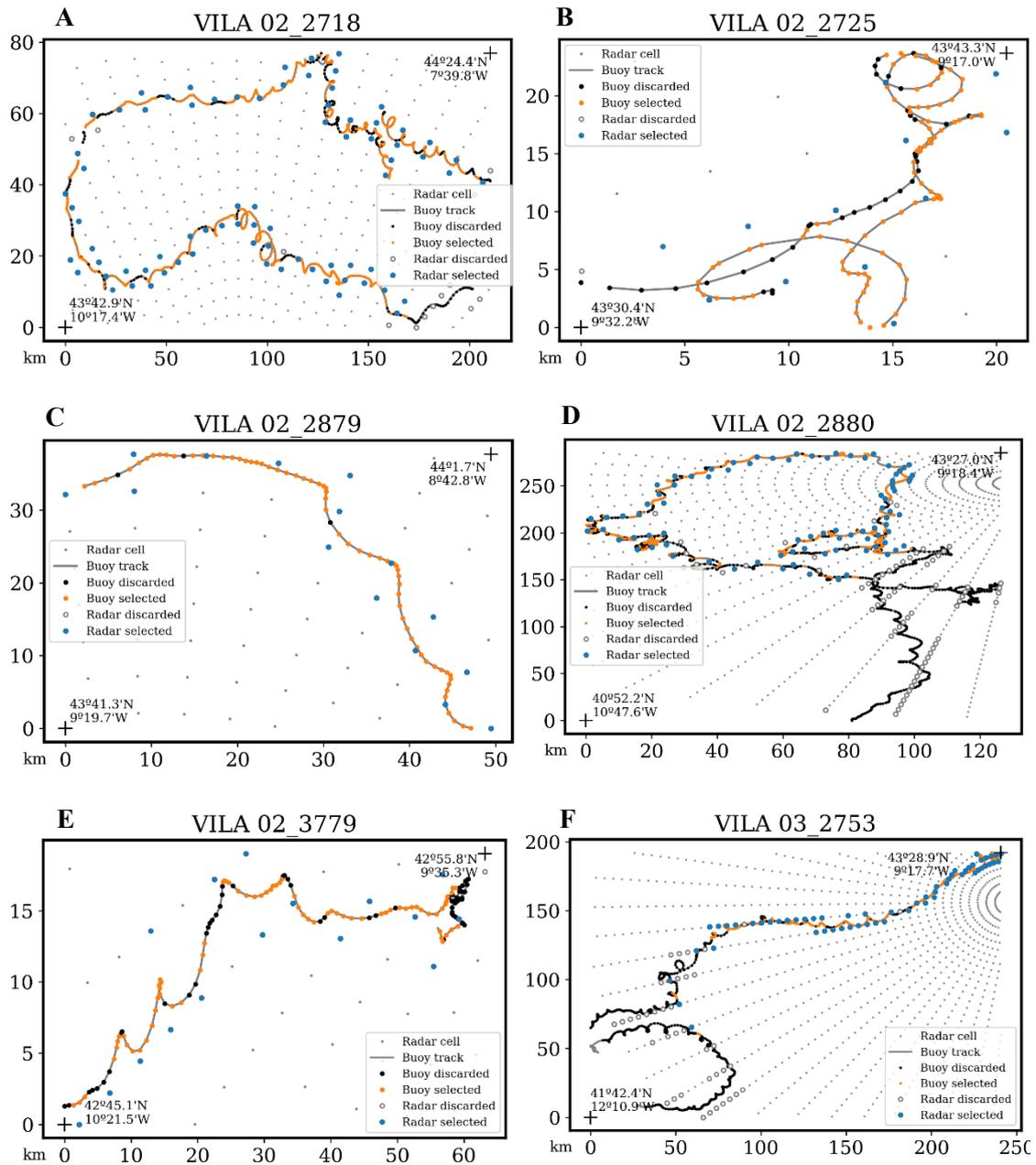
**Figura B19.** Emparejamiento en tiempo y espacio de velocidades de trazas promediadas temporalmente (línea gris) con datos horarios de las celdas (puntos grises) de la antena de Silleiro. Los datos de radar con  $V_{FLG} > 0$  son descartados (cír. blancos), los datos de la traza que encuentran pareja en el radar (cír. azules) son seleccionados (cír. naranjas) o descartados (cír. negros) en caso contrario.

## 8.5. Emparejamiento trazas con antenas Prior y Fisterra



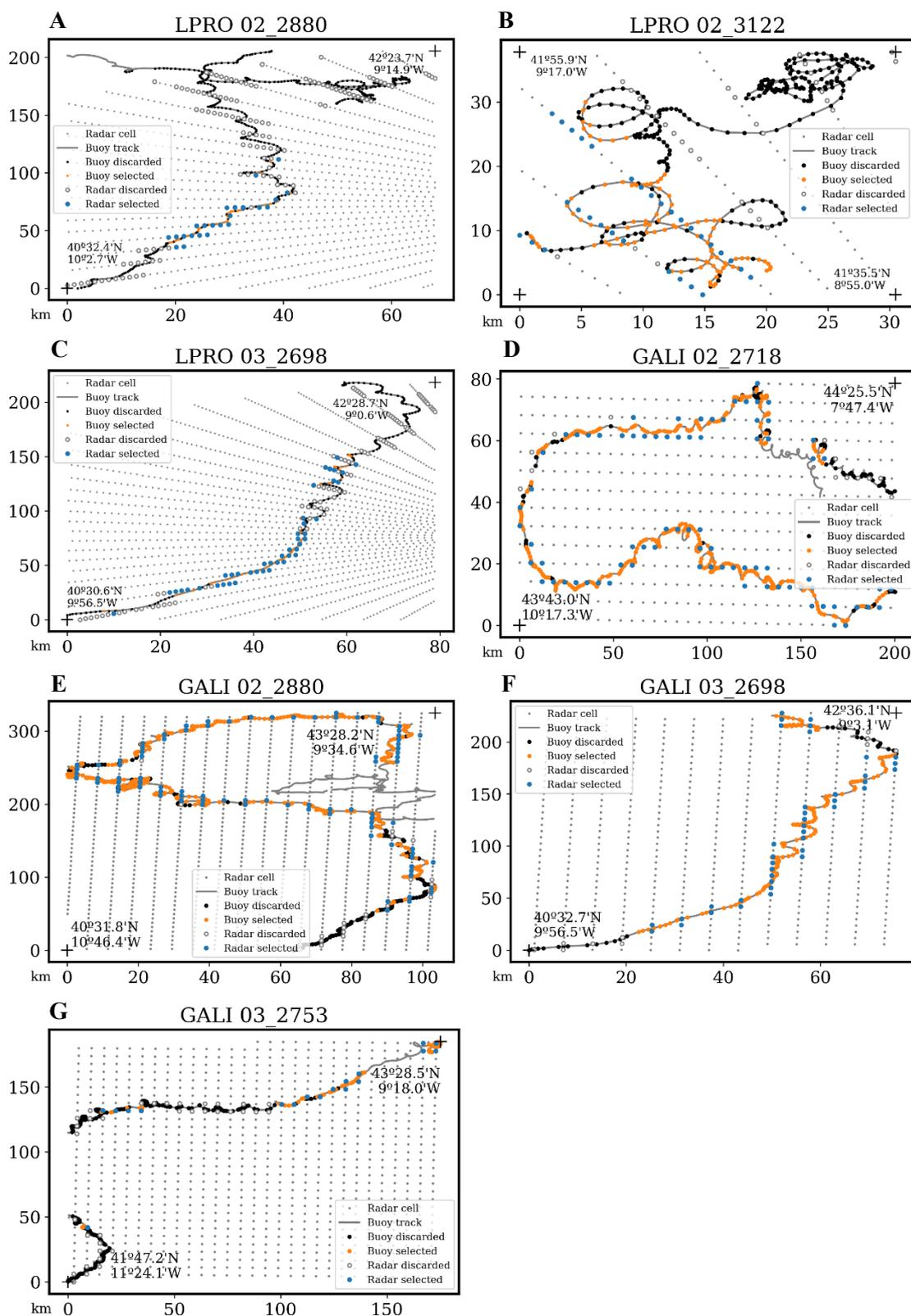
**Figura B20.** Emparejamiento en tiempo y espacio de velocidades de trazas promediadas temporalmente (línea gris) con datos horarios de las celdas (puntos grises) de las antenas de Prior y Fisterra. Los datos de radar con  $V_{FLG} > 0$  son descartados (cír. blancos), los datos de la traza que encuentran pareja en el radar (cír. azules) son seleccionados (cír. naranjas) o descartados (cír. negros) en caso contrario.

## 8.6. Emparejamiento trazas con antena Vilán



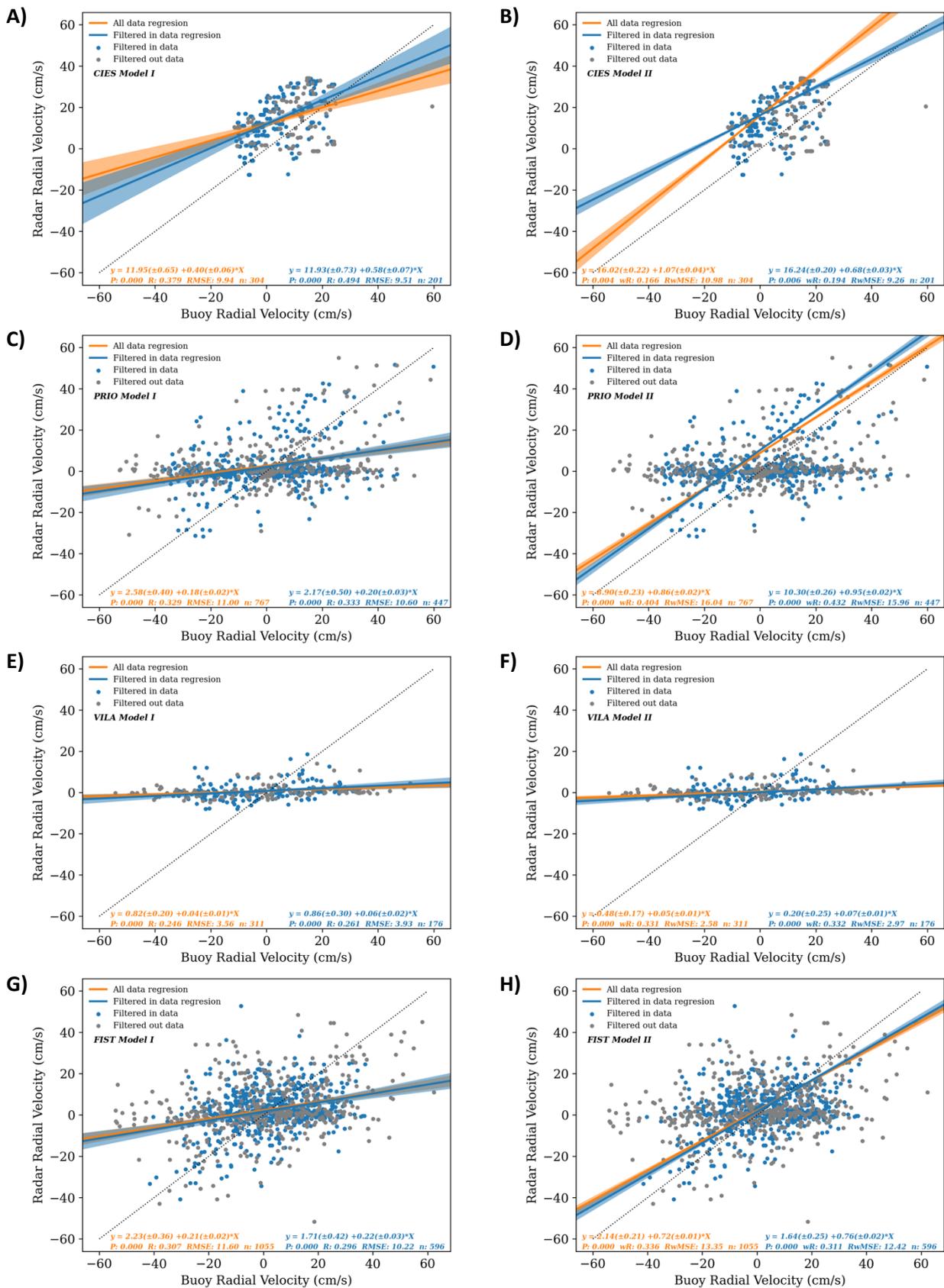
**Figura B21.** Emparejamiento en tiempo y espacio de velocidades de trazas promediadas temporalmente (línea gris) con datos horarios de las celdas (puntos grises) de la antena de Vilán. Los datos de radar con  $VFLG > 0$  son descartados (cír. blancos), los datos de la traza que encuentran pareja en el radar (cír. azules) son seleccionados (cír. naranjas) o descartados (cír. negros) en caso contrario.

## 8.7. Emparejamiento trazas con antena Leça de Palmeira y con RAIA\_NW\_Iberian

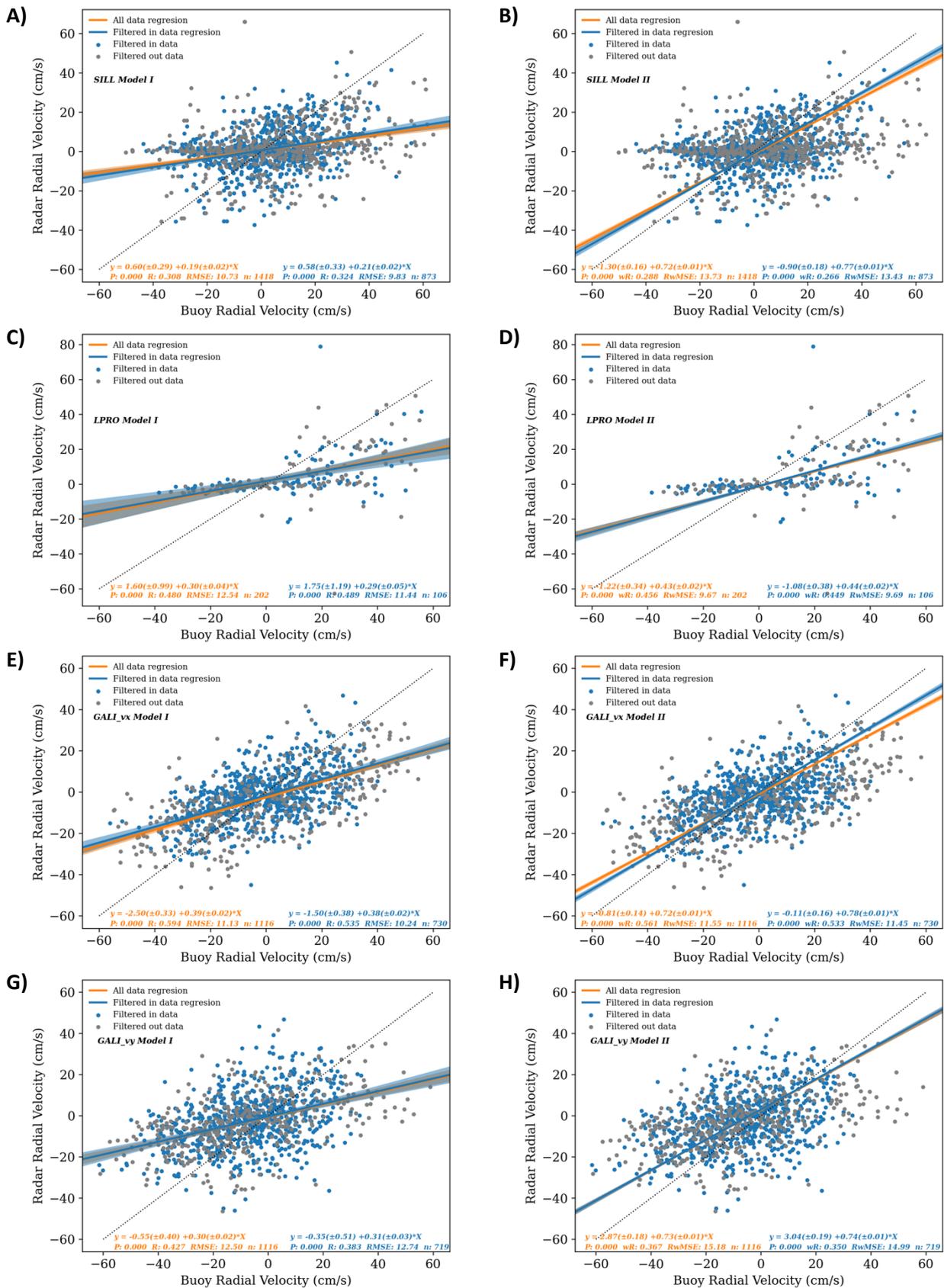


**Figura B22.** Emparejamiento en tiempo y espacio de velocidades de trazas promediadas temporalmente (línea gris) con datos horarios de las celdas (puntos grises) de la antena de Leça y de la malla de RAIA\_NW\_Iberian. Los datos de radar con VFLG>0 son descartados (cír. blancos), los datos de la traza que encuentran pareja en el radar (cír. azules) son seleccionados (cír. naranjas) o descartados (cír. negros) en caso contrario.

## 9. Anexo C. Gráficos de dispersión con líneas de regresión



**Figura C1.** Gráficos de dispersión de los datos emparejados radar-boya (puntos grises datos rechazados por el filtrado, puntos azules datos aceptados) y regresiones modelo I (columna izquierda) y modelo II (columna derecha) con intervalos de confianza al 95% (áreas sombreadas) para todos los datos emparejados (línea naranja) y sólo para los aceptados por el filtrado (línea azul). A) y B) antena de Cíes, C) y D) antena de Prior, E) y F) antena de Vilán y G) y H) antena de Fisterra.



**Figura C2.** Gráficos de dispersión de los datos emparejados radar-boya (puntos grises datos rechazados por el filtrado, puntos azules datos aceptados) y regresiones modelo I (columna izquierda) y modelo II (columna derecha) con intervalos de confianza al 95% (áreas sombreadas) para todos los datos emparejados (línea naranja) y sólo para los aceptados por el filtrado (línea azul). A) y B) antena de Silleiro, C) y D) antena de Leça de Palmeira, E) a H) componentes X e Y de la velocidad total en la malla de RAIA\_NW\_Iberian.

