Introducción

La misión SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), que será lanzada a comienzos del 2008, fue seleccionada por la Agencia Espacial Europea (ESA) como una misión de exploración dentro del marco Earth Explorer con el objetivo de proporcionar mapas globales y frecuentes de humedad del suelo y salinidad oceánica (SSS) [1]. Estimaciones precisas y sinópticas de salinidad serán cruciales en el futuro próximo, tanto para investigar las interacciones entre el océano y la atmósfera, como para inicializar los modelos numéricos acoplados que predicen la magnitud del cambio climático.

En vista de la definición del futuro segmento terreno de la misión SMOS y en la corriente determinación del error budget de salinidad oceánica, la comunidad SMOS está cada vez más involucrada en la determinación de un esquema de inversión robusto que permita recuperar datos de salinidad a partir de las medidas de temperatura de brillo (T_B) en Banda L [2,3]

Los temas que se deberán considerar incluyen la definición de un modelo semi-empírico fidedigno a emplear en los procedimientos de inversión [4], la definición de un método iterativo para minimizar la función de coste, una formulación definitiva de dicha función, las técnicas de cancelación del sesgo derivado por la reconstrucción de imágenes, y un esquema de calibración con datos in situ. El consenso y el cumplimiento de las tareas mencionadas son obligatorios para lograr los requisitos de la misión: una exigente precisión de error de 0.1 psu (unidades practica de salinidad), en promedio temporal de un mes sobre una malla de 2ºx2º.

Además, esta lista de prioridades de temas pendientes de cumplimiento antes del lanzamiento incluye el análisis de la variabilidad horizontal de la SSS y las potenciales habilidades de los datos SMOS de resolver importantes fenómenos oceanográficos. Un estudio conjunto ha sido efectuado entre la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), Laboratorio de Remote Sensing, en Barcelona, y el centro Nacional de Oceanografía (NOCS), departamento de observación del océano y del clima, en Southampton, UK

El objetivo del proyecto es doble:

- Sondear las habilidades de los datos SMOS de resolver fenómenos oceanográfico de mesoscala
- Testear el comportamiento de la salinidad cuando datos a resolución espacial creciente se utilicen en el proceso de recuperación

En otras palabras, este estudio contesta a la siguiente pregunta "¿La variabilidad oceánica de mesoscala (sobre 50-100 km de escala espacial) se puede detectar en los datos del satélite SMOS? Y, en caso afirmativo, ¿hasta que punto se puede forzar la recuperación de SSS, utilizando datos de entrada a resolución creciente sin que el error en la precisión de la recuperación empeore sensiblemente?"
Este estudio pretende utilizar datos auxiliares adecuados de viento, temperatura (SST) y salinidad juntamente con herramientas de simulación y procesado representativas de las características de la misión. Además, este estudio proporciona el primer estudio crítico y comprensivo de las habilidades de recuperación en la zona altamente dinámica de los Grand Banks.

Plan de trabajo

Para poder alcanzar los objetivos mencionados, las herramientas a disposición han sido:

- Datos del proyecto OCCAM (Ocean Circulation and Climate Advanced Modeling), generados al NOCS; como fuente de datos de entrada y auxiliares
- SEPS (SMOS End-to-End Performance Simulator), desarrollado principalmente en la UPC; para generar mapas de temperatura de brillo
- Procesador de SSS de nivel 2 (L2p), desarrollado integralmente en la UPC; que proporciona mapas de salinidad y estimaciones cuantitativas de SSS a diferentes escalas de resolución

El estudio ha sido realizado utilizando un año de datos OCCAM con 2 días de resolución temporal en una zona de aproximadamente 2 grados de ancho en el atlántico Norte/Oeste (centrado a 45º N, 47º W), que exhibía características oceanográficas muy interesantes, especialmente por lo que respecta los campos de salinidad. Los datos utilizados han tenido 1 grado, 1/2 grado y ¼ de grado de resolución espacial, proporcionando para cada día valores de SSS, SST y viento. Datos OCCAM a escala más pequeñas también estaban disponibles, pero en una primera fase del estudio se decidió limitar la resolución máxima a ¼ de grado, para no tener en cuenta el efecto de variabilidad intra-pixel en SMOS:

Se ha utilizado el SMOS End-to-end Performance Simulator (SEPS), una herramienta desarrollada ad-hoc para generar, a la espera del lanzamiento del instrumento, mapas de temperatura de brillo, con datos de entrada OCCAM a diferente resolución espacial. Las características del SEPS comprenden, entre otras, la propagación orbital del sensor, una caracterización detallada del instrumento incluyendo calibración y el error budget radiométrico del sistema, así como el más reciente algoritmo de reconstrucción de imagen. Los resultados de SEPS consisten en mapas de T_B proyectada en la Tierra (Nivel 1c), tanto en una malla regular como en la malla oficial de SMOS; la ISEA4H9.

Después de realizar unas modificaciones específicas en el código del simulador para permitir la ingestión de datos de alta resolución, se ha generado con el SEPS un mes de mapas de T_B con datos OCCAM por pasadas ascendentes y descendentes del satélite cubriendo la zona seleccionada.
En concreto, cada vez que la órbita coincida con la zona seleccionada, los datos climatológicos que se utilizaban previamente como entrada geofísica en el simulador se han substituido por los valores OCCAM correspondientes. El tiempo de revisita medio es de casi 3 días, resultando en 10 pasadas por el mes considerado y en 730 snapshots (imágenes de la escena en el campo de visión del instrumento) totales.

El procesador L2 es un prototipo de software en fase final de definición, en grado de recuperar salinidad a partir de los mapas de T_B que constituyen la salida del SEPS. Este procesador está esencialmente compuesto por un módulo de cancelación de sesgo y por un módulo de algoritmo de minimización, obteniendo como resultado final mapas de SSS en una pasada (datos de nivel 2).

Para ser consistentes con los requisitos establecidos por el comité de la misión SMOS, deben producirse datos de nivel 3, es decir promediados temporales de un mes en una escala espacial congruente con la zona bajo estudio.

El procesador de nivel 2 dispone de diferentes opciones para afinar el esquema de inversión con el fin de recuperar SSS en diferentes configuraciones, como por ejemplo recuperar la SSS en el marco de la Antena, en el de la Tierra, o utilizando el primer parámetro de Stokes.
Se han hecho esfuerzos para definir y optimizar el esquema general de recuperación, tanto para adaptarlo a la ingestión de los datos auxiliares OCCAM como para seguir las recomendaciones de otros estudios del sector [3]

Resultados

Los mapas de temperaturas de brillo obtenidos con SEPS han sido generados en modo dual-polarimétrico cubriendo la zona seleccionada.

Las simulaciones se caracterizan por un fuerte sesgo (bias) en las medidas, debido a la proximidad de la costa, efecto que debe corregirse de algún modo en el procesador de nivel 2. Este tipo de sesgo, conocido como "scene-dependent bias" es un fenómeno sistemático y conocido, y aparece en cualquier proceso de simulación realista (ya que es una característica intrínseca del algoritmo de reconstrucción de imagen). Sin embargo, la magnitud de este sesgo se relaciona directamente con la temperatura de brillo media de toda la escena, siendo menor en zonas de océano abierto [5].
En la zona considerada, la influencia de la línea de costa (a escala del campo de visión de SMOS) es evidente, y resulta en una gran excursión de T_Bs, y en el consecuente efecto de sesgo en las medidas, desfavorable para la recuperación de la salinidad.

Además, en la zona y en el mes seleccionado (Marzo), las temperaturas superficiales del océano eran muy bajas, lo que ha complicado ulteriormente la recuperación de salinidad, ya que la sensitividad de la TB con la SSS disminuye rápidamente en aguas frías [1]. Estas complicaciones llevaron a un nuevo enfoque en el estudio en cuestión: las simulaciones se han llevado a cabo en verano, para tener temperaturas de mar más calidas, y sólo se han considerado los pasos descendientes del satélite, para minimizar los efectos de la costa.

La técnica estándar de cancelación del sesgo a nivel 2 consiste en calcular la diferencia entre las T_Bs generadas por el SEPS y las obtenidas utilizando un modelo directo de emisividad, y restando posteriormente este valor medio a las medidas simuladas [5].
En este caso, debido a la heterogeneidad de la escena estudiada, se adaptó una técnica específica para reducir el sesgo, ya que la técnica estándar resultaba poco eficaz. El sesgo se ha reducido calculando su valor promedio únicamente en la zona OCCAM en cuestión.

Las recomendaciones del proyecto "Synergetic Aspects and Auxiliary Data Concepts for Sea Surface Salinity Measurements from Space" [6] apuntan a que una configuración óptima de la función de coste prevé que no deberían existir restricciones en el término auxiliar de salinidad, mientras cabría considerar restricciones solamente en SST y viento. El estudio se ha enfocado de la misma manera, pero a causa de las limitaciones que se han mencionado antes, no se han podido obtenerse resultados satisfactorios en esta configuración, aunque se haya considerado un promediado ponderado de los errores de SSS en las diferentes pasadas, teniendo en cuenta la posición respectiva de los píxeles dentro del campo de visión.

Por lo tanto, se ha decidido utilizar restricciones en SSS siendo al parecer la única solución para obtener una recuperación de SSS satisfactoria, debido, entre otras limitaciones, a los enormes sesgos presentes en las medidas. Se han considerado entonces restricciones en SSS con un error de 0.5 psu y valores constantes de referencia.

La figura 1 muestra un resultado del procesador de nivel 2, que se refiere a un sobrevuelo del satélite cubriendo la zona OCCAM. En la columna del lado izquierdo se representa, en la parte superior, el campo de SSS original y al fondo su error correspondiente (diferencia entre el campo original y el campo recuperado), por una resolución de datos OCCAM de ¼ de grado. La zona seleccionada es una pequeña porción del campo completo y es claramente visible, debido tanto a las diferentes T_Bs procedentes de datos de input OCCAM, como a la técnica específica de corrección de bias. En la columna del lado derecho se muestra un zoom que ayuda a evaluar la magnitud del error. La recuperación de SSS se ha realizado, en este caso, sobre el marco de referencia de la antena.

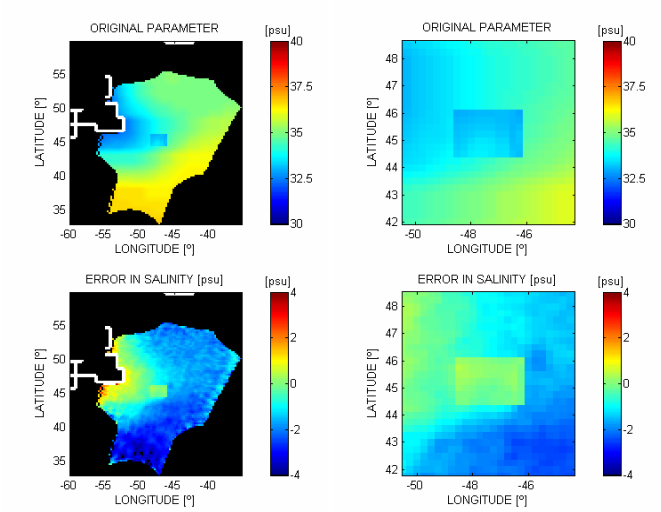

Fig. 1

Como se ha mencionado anteriormente, el L2p genera un output de SSS en un sobrevuelo, mientras que para poder comparar los resultados con los requisitos de SMOS; se requiere un promedio espacio-temporal; por lo tanto, los diferentes errores se han coleccionado en los diferentes sobrevuelo sobre la zona a lo largo del mes (10 sobrevuelo). Posteriormente, se ha graficado el valor medio por cada píxel, y se ha proporcionado una estadística dentro de la caja de 2ºx2º, correspondiente a la zona de estudio, proporcionando finalmente el bias resultante y la precisión del error a nivel 3.
La figura 2 muestra los resultados con las indicaciones y la configuración mencionada, para el caso de 1 grado (línea superior), ½ grado (línea central) y ¼ de grado (línea inferior). En las columnas de izquierda y derecha, respectivamente, se representan los campos de SSS original y recuperados.

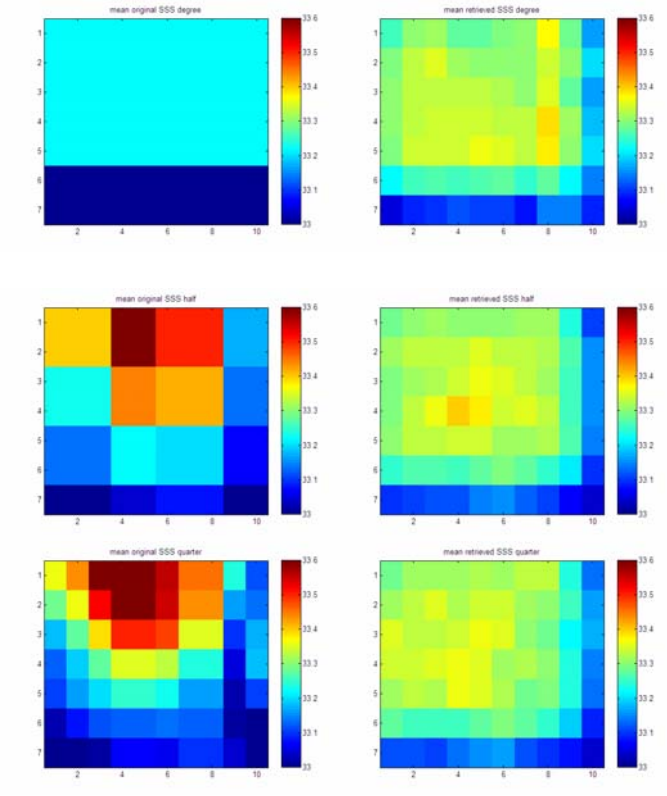

Fig. 2

Cabe destacar los patrones de SSS recuperadas, cuya reproducción de las características de los campos originales era uno de los objetivos a investigar en este estudio. Como puede observarse en las cascadas 1º - ½º - ¼º, la firma de la SSS recuperada pierde progresivamente la estructura especial de los campos originales, y probablemente alcanza el máximo de conformidad a ½º de resolución espacial. Lo anterior sugiere que a escala de ¼º, SMOS ya no es capaz de reproducir patrones significativos de mesoscala observados. Sin embargo, se debe hacer hincapié en cómo ¼º es ya comparable con la mejor resolución espacial proporcionada por el radiómetro (30-40 Km), y no era claro si proporcionar datos de input/auxiliares a esta resolución podría haber sido benéfico respecto a la precisión del error.

En la figura 3 se muestran los histogramas del error de SSS por las diferentes resoluciones, conjuntamente a los valores de bias y precisión a nivel 3. La precisión empeora ligeramente al aumentar la resolución. Los valores correspondientes están dentro o realmente próximos a los requisitos de SMOS; aunque esto se encuentre relacionado de alguna forma con la configuración de la función de coste, que incluye restricciones en salinidad, una necesidad provocada por los problemas mencionados.

Por lo tanto, en esta situación particular, estos resultados parecen limitar el rango de aplicabilidad de los datos SMOS, identificando quizás ½º como umbral de la resolución para la detección de fenómenos oceanográficos. No obstante, es importante delimitar el umbral inferior de resolución espacial del sensor, ya que esto será de ayuda a la hora de establecer los puntos de interpolación óptima en la malla ISEA4H9, donde los datos SMOS son proyectados.

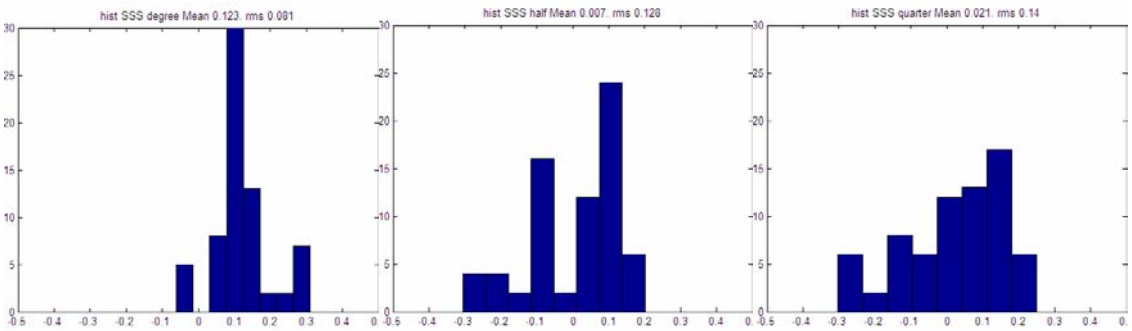

Fig. 3

Para asegurar o limitar la extrapolación de estas conclusiones a otro escenario o configuración, se ha repetido este estudio en una zona diferente al norte del Atlántico con condiciones menos desfavorables, sin influencia de costa, y por lo tanto con menos sesgo en las medidas.

La nueva zona en cuestión tiene una extensión de 10ºx10º, y solamente se han estudiado las pasadas ascendentes del satélite, mientras la técnica de cancelación del sesgo, esta vez, ha sido la tradicional.

Nuevamente, el estudio consta de 730 snapshots a lo largo de un mes entero y con la misma configuración del algoritmo de minimización.

Los resultados correspondientes se muestran en la fig. 4, para el caso de 1 grado columna izquierda), ½ grado (columna central) y ¼ de grado (columna derecha). En las líneas superior e inferior, respectivamente, se representan los campos de SSS original y recuperados.

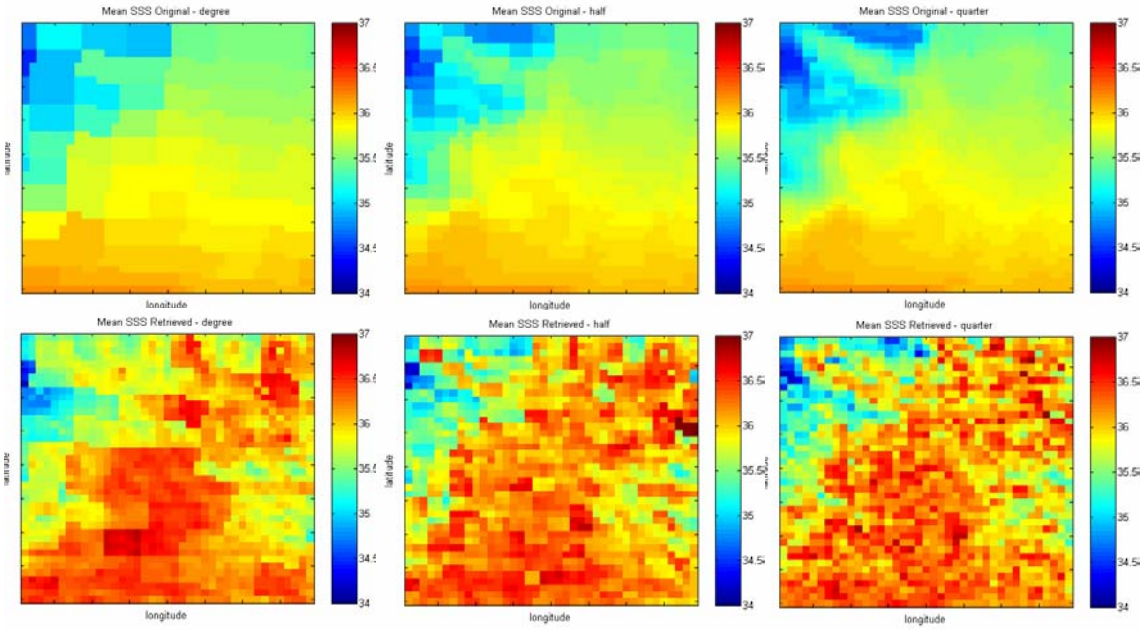

Fig. 4

A diferencia de la obtenida en la zona anterior, la SSS recuperada esta vez es capaz de reproducir los patrones de los campos originales hasta ¼º, incluso definiendo mejor algunos detalles de escalas más finas [7].

Conclusiones

El objetivo general de este estudio fue evaluar la capacidad de los datos SMOS para recuperar las características de salinidad a diferentes (alta resolución) escalas espaciales. A la vista de los resultados, la capacidad de SMOS parece limitada a la identificación de elementos cuyo tamaño supere ½º. No obstante, cabe notar que estos resultados corresponden solamente al caso particularmente problemático de un océano altamente dinámico en la zona de influencia de la tierra.
Por lo tanto, cabe destacar que en una zona de océano abierto, utilizar datos a más alta resolución, y hasta ¼º, puede ser beneficioso para monitorizar algunas características oceanográficas interesantes, sin sufrir especiales empeoramientos en la precisión del error.

Referencias

[1] Font, J., G. Lagerloef, D. LeVine, A. Camps, and O.Z. Zanife, "The Determination of Surface Salinity with the European SMOS Space Mission," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42 (10), pp. 2196-2205, October 2004
[2] Boutin J., P. Waldteufel, N. Martin, G. Caudal, and E. Dinnat, "Surface Salinity Retrieved from SMOS Measurements over the Global Ocean: Imprecisions Due to Sea Surface Roughness and Temperature Uncertainties," Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 21 (9), 2004.
[3] Sabia R., A. Camps, M. Vall-llossera, N. Reul, "Impact on Sea Surface Salinity Retrieval of Different Auxiliary Data within the SMOS Mission," IEEE Trans. Geosc. Remote Sens., 44 (10), 2769–2778, October 2006.
[4] Gabarró C., J. Font, A. Camps, M. Vall-llossera, and A. Julià, "A new empirical model of sea surface microwave emissivity for salinity remote sensing;" Geophysical Research Letters, Vol. 31, L01309, January 2004
[5] Camps A., M. Vall-llossera, L. Batres, F. Torres, N. Duffo, I. Corbella, "Retrieving Sea Surface Salinity with Multi-Angular L-band Brightness Temperatures: Improvement by Spatio-Temporal Averaging," Radio Science, Vol. 40, 2005.
[6] "Synergetic Aspects and Auxiliary Data Concepts for Sea Surface Salinity Measurements from Space," ESA ESTEC 18176/04/NL/CB, Final Report, January 2006.
[7] Sabia R., C. Gommenginger, A. Camps and M. Srokosz, "Retrieved Sea Surface Salinity Spatial Variability using High Resolution Data within the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission", Proceedings of IGARSS 2007, Barcelona, Spain, 23-27 July, 2007.