

Pinilla, Carlos y Fenoy, Juan M.F. (2008): Temperatura de superficie del mar (SST) del Mar de Alborán. En: Hernández, L. y Parreño, J. M. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria. Pp. 695-706. ISBN: 978-84-96971-53-0.

TEMPERATURA DE SUPERFICIE DEL MAR (SST) DEL MAR DE ALBORÁN

Pinilla, Carlos y Fenoy, Juan M. F.

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén. Campus de las Lagunillas, s/n, Edificio A-3. Correo electrónico: cpinilla@ujaen.es; jmfenoy@ujaen.es

RESUMEN

Siendo el estrecho de Gibraltar la única conexión entre el mar Mediterráneo y el océano Atlántico, provoca que la dinámica de corrientes marinas entre ambos mares a través del Estrecho sea de excepcional diversidad, afectando a las zonas contiguas del mar de Alborán. El intercambio de masas de agua en superficie se realiza hacia el Mediterráneo, dando origen a una estructura denominada pluma de agua. El presente artículo estudia en una ventana temporal amplia la dinámica de estas corrientes, caracterizadas por su temperatura de superficie del mar (SST), mediante imágenes de satélites NOAA. Se hace un estudio de idoneidad de las imágenes, contrastando con datos experimentales procedentes de una boya de localización conocida y fija en el Estrecho. Asimismo, se analiza la forma y progresión de la pluma mediante imágenes con el mínimo transcurso temporal posible a partir de la colección de imágenes NOAA obtenida.

Palabras Clave: SST, NOAA, mar de Alborán

ABSTRACT

The fact that the strait of Gibraltar is the only connection between the Mediterranean Sea and the Atlantic Ocean, causes a huge diversity at the sea current dynamics between both seas, involving also the Alboran Sea. The water exchange at sea surface goes in favour of the Mediterranean Sea, thus originating a recognizable pattern, known as water feather. This paper studies these currents' dynamics in a wide temporal window, by means of the surface sea temperature (SST) obtained from NOAA satellites imagery. The best-fitted images are calculated with regression statistics from a fixed buoy near the Strait. We also analyze the imagery collection seeking feather form and progression based in a minimum-time lapse when possible.

Key Words: SST, NOAA, Alboran Sea.

INTRODUCCIÓN

Una de las aplicaciones oceanográficas que pueden derivarse del empleo de sensores remotos a escala regional es el cálculo de la denominada temperatura de superficie del mar (SST, de sus siglas en inglés), en donde cada píxel de la imagen resultante guarda información sobre la temperatura a la que se encuentra el territorio que corresponde, lo que es de especial aplicación al medio marino. En una imagen SST quedan reflejadas las temperaturas de las masas de agua marinas de la región observada, por lo que se pueden distinguir según sus propiedades.

Una de las plataformas más empleadas para la SST son los satélites de la serie NOAA. La ventaja del sensor AVHRR estriba en, por una parte, un tamaño de píxel que se amolda bien a las pretensiones de estudios regionales, y por otra, en la existencia de dos bandas correspondientes al infrarrojo térmico, lo que permite una obtención de temperaturas radiométricas mediante el procedimiento de ventana partida o *split window*.

Estudios previos siguen un proceso de cálculo y análisis de la SST que se han tomado como modelo, en especial los descritos en Zheng *et al.* (1982), Yu *et al.* (1996) y Li *et al.* (2001); así, en este último se analizan los datos provenientes de dos plataformas de NOAA, casándolos con los valores de una boya experimental situada en el golfo de México, y comprobando qué algoritmo de cálculo arroja mejores resultados.

En el caso del presente estudio se ha planteado, en similares términos, la aplicación de la SST al estrecho de Gibraltar y el mar de Alborán, a tal efecto se disponen de datos experimentales procedentes de una boya marina. El mar de Alborán ha sido objeto también de investigaciones de sensores remotos, como en Arnone (1987), en donde se establecen mapas del mar en función del contenido en fitoplancton detectado, o Baldacci *et al.* (2001), donde se realiza un análisis de componentes principales a partir de las imágenes.

Sin embargo, existen varios algoritmos que permiten la obtención de la SST, y diversos satélites de la serie NOAA. Es preciso determinar la idoneidad de las imágenes, según factores como satélite, época de toma, o algoritmo de SST; desde el primer paso –la obtención de la imagen misma–, hasta la obtención de una imagen SST del mar del Alborán. Para contrastar los resultados de estos algoritmos se recurre a los datos de la boya marina, de localización conocida, que permitirá confrontar datos reales y valores obtenidos por los algoritmos.

ZONA DE ESTUDIO

El estrecho de Gibraltar es una región con una dinámica marina muy activa, de alto interés oceanográfico, ya que separa dos cuencas marinas de aguas con propiedades diferentes, como es su densidad. Además, el hecho de que haya una diferencia de nivel del mar de 14 cm entre el Atlántico y el Mediterráneo coadyuva al establecimiento de unos gradientes de presión, que en definitiva, son los que hacen mover las masas de agua. La presión hidrostática superficial es mayor en la parte atlántica al encontrarse a más nivel, por lo que tiende a derivarse al este, hacia el Mediterráneo. Al contrario, por la mayor densidad de las aguas mediterráneas, en profundidad la presión es mayor en éstas, y se deriva una corriente hacia el oeste, hacia el océano Atlántico.

En superficie, dada la diferencia de temperaturas de las masas de agua de ambos mares, la introducción de aguas atlánticas en el mediterráneo suele apreciarse como una estructura filiforme, denominada pluma. Una vez sobrepasado el estrecho, y abrirse el mar de Alborán, la pluma de agua sigue diversas trayectorias (hacia el nordeste, el este, o incluso el sureste), según las condiciones marinas en cada momento.

La estructura de las subcorrientes marinas ha sido estudiada en trabajos previos, como Viúdez *et al.* (1998) o Tintorè *et al.* (1988). Se observa una cierta predominancia de las plumas en dirección al noreste, corriente que va girando en la región media del mar de Alborán.

En este estudio se examinan cuáles son las mejores condiciones para la observación de las corrientes marinas superficiales en el mar de Alborán, a partir de imágenes de los satélites de la serie NOAA, y a través de la temperatura de superficie del mar (SST), magnitud que puede calcularse a través de las bandas térmicas de los satélites NOAA.

La SST es válida para la observación de las plumas dado que las masas de agua se encuentran a temperaturas distintas, por lo que la obtención de una imagen de SST permitirá la visualización de la pluma atlántica.

METODOLOGÍA

NESDIS: Servidor de imágenes de NOAA

Las imágenes se han conseguido en el Servicio de Información de NOAA, denominado NESDIS, con dirección de Internet www.class.noaa.gov. El servicio NESDIS permite obtener multitud de productos, de los cuales interesa aquél que permita una buena representación de la SST a escala regional. En concreto, el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de los satélites de NOAA es de los más manejados para este fin. AVHRR presenta tres formatos de datos: GAC, LAC y HRPT; este último es el que se ha manejado, por su mejor resolución espacial, de 1,1 km.

El servicio NESDIS permite refinar la búsqueda de imágenes mediante la determinación, de entre varias opciones, del formato deseado (GAC/LAC/HRPT), fechas de inicio y término del intervalo temporal de interés, satélites; y en especial, la zona espacial comprendida en las imágenes.

En este caso, la ventana temporal corresponde al periodo julio de 2002 a septiembre de 2003. Durante este intervalo, los satélites de la serie NOAA activos fueron los números 14, 15, 16 y 17. En secciones siguientes se determinará qué sensores arrojaron los mejores resultados.

La búsqueda responde con todas las imágenes encontradas, con la posibilidad de previsualizar la imagen. De todas las imágenes de la base de datos que cumplieran con las condiciones especificadas, un importante número de ellas fueron descartadas por un diverso número de razones que más tarde serán expuestas. La previsualización permite descartar imágenes sin necesidad de pedir las al servidor, economizando recursos.

Datos experimentales

Para verificar la exactitud de los diversos algoritmos de SST sobre el mar de Alborán se ha hecho uso de los datos experimentales de una boya marina, denominada Boya Alborán, junto al estrecho de Gibraltar, enfrente del litoral malagueño, con coordenadas fijas en 36° 13,8' N, 5° 1,8' W. Boya Alborán es capaz de registrar diversas variables, como velocidad y dirección del viento, presión o temperatura del aire; y en particular, la variable que interesa, la temperatura de superficie del mar o SST.

La secuencia de datos experimentales cubre la ventana temporal desde febrero de 1997 hasta junio de 2003, a razón de una medición por hora. Sin embargo, no todas las medidas en este intervalo son útiles si se considera la variable de SST, que sólo muestra resultados físicamente posibles en varios intervalos temporales; el más tardío, a la vez el más extenso, corresponde a las siguientes fechas: del 1 de enero de 2002 a 13 de junio de 2003.

Selección de los criterios

Los diversos satélites de la serie NOAA realizan dos pasadas sobre toda la superficie de la Tierra al día: una de las imágenes suele corresponder a un periodo diurno, mientras que la segunda suele ser nocturna. Cada satélite realiza las pasadas sobre el mar de Alborán aproximadamente a la misma hora; así, el satélite NOAA-16 realiza la pasada nocturna 2 y las 3 horas GMT, mientras que la diurna se registra entre las 13 y 14 horas GMT.

No todas las imágenes registradas fueron aprovechables para obtener la SST en el mar de Alborán. Sistemáticamente se realizó un primer análisis visual de cada imagen, en el que se desecharon aquellas que presentaran un amplio desarrollo de nubes, o una presencia significativa de éstas en el área de interés. Esto se debe a que las nubes causan un gran impacto en el cálculo de la SST, lo que puede llegar a falsear resultados. Los procesos para restaurar la superficie que subyace bajo la capa de nubes para obtener la SST original, requieren un conocimiento exhaustivo de las condiciones climáticas locales (Ontar Corporation, 2004). Un criterio más práctico emplea la detección de nubes para crear una máscara en los píxeles nubosos (Chuvieco, 2002). Por todo esto, se ha evitado la inclusión imágenes con zonas nubosas en el área de interés.

También se han descartado aquellas imágenes que proporcionaban un cenit del satélite superior a 30°. Éste es un criterio recomendado en la literatura (Goward *et al.*, 1991) sobre imágenes AVHRR, y es debido a la deformación de los píxeles de la imagen con respecto a la realidad conforme el campo de visión se distancia del nadir.

Ambos criterios se emplearon de forma grosera como primer filtro para seleccionar las imágenes válidas. Con posterioridad se refinaron estos criterios, dentro del proceso de cálculo de la SST.

Cálculo de las imágenes SST

Una imagen de SST es el producto final de un conjunto de procesos de cálculo que se realizan sobre la imagen HRPT. Todos estos procesos se han automatizado mediante la creación de un módulo específico e implementado sobre IDL.

El primer proceso es la calibración de las bandas térmicas del sensor AVHRR, para la obtención de la temperatura de la superficie que corresponde con los píxeles de la imagen, ya sean terrestres o marinos. La calibración aplica los términos de ganancia y offset, según la ecuación $L = a + b * ND$, a partir de los cuales se calcu-

la la temperatura radiométrica. Estos coeficientes a y b , sesgo (*offset*) y ganancia (*gain* o *slope*) respectivamente, se incluyen en la cabecera de la imagen (NOAA 2005). Se hace notar que para las bandas térmicas del sensor AVHRR la ganancia es negativa.

La cabecera de las imágenes de este sensor aporta además información sobre la geometría de la imagen; pueden derivarse imágenes correspondientes a latitud, longitud, ángulo solar y ángulo del sensor. En este punto es donde se corroboró que el área del mar de Alborán quedara dentro del margen de cenit del sensor de menos de 30°, para evitar la deformación del píxel. A efectos prácticos, se ha considerado el área comprendida entre el extremo occidental del Estrecho (línea Trafalgar-Tánger) y el litoral mediterráneo andaluz y su correspondiente rifeño.

Un segundo proceso seguido consistió en la georreferenciación de la imagen. Para establecer los puntos de control se hizo uso de un conjunto de imágenes de pequeño tamaño georreferenciadas previamente, que muestran áreas geográficas concretas muy relevantes de la península Ibérica y del norte de África. Estas imágenes se correlaron espacialmente con la imagen para georreferenciar –es decir, son técnicas de correlación *area-based*– mediante una transformación bilineal de segundo grado. Las características de la proyección cartográfica son: proyección UTM (huso 30N) y datum Europeo 1979.

El módulo también creó una máscara de nubes siguiendo los criterios basados en el método de Sanders *et al.* (1988), consistente en realizar cuatro tests sobre la información de las bandas 1, 2 y 5 del sensor AVHRR. En una imagen nocturna, basta comprobar qué píxeles tienen una temperatura según la banda 5 $T_5 \leq 265$ K. En una imagen diurna, además ha de cumplirse que para la reflectancia pase del umbral crítico del 120% para la suma de las reflectancias de las bandas 1 y 2, por encima de la cual un píxel se considera nuboso.

Un tercer criterio más restrictivo, que ha de cumplirse simultáneamente a los anteriores para las imágenes diurnas es que la suma de las reflectancias de las bandas 1 y 2 ha de ser superior al 80%, mientras que $T_5 \leq 265$ K.

Todo píxel que resultó positivo para alguno de los tests se eliminó mediante la máscara de nubes. Consecuentemente, en este paso se desecharon las imágenes que muestran una extensa máscara de nubes en el área del mar de Alborán y que no habían sido descartadas en el análisis visual. Otros algoritmos se pueden encontrar en Derrien *et al.* (1993) y en Chuvieco (2002).

Asimismo están implementados varios algoritmos de cálculo de la SST. En la literatura se encuentran diversos métodos de cálculo, a partir de los valores de las bandas térmicas del sensor AVHRR, es decir, de la banda 4 y la banda 5. En concreto, se calcularon las SST según los algoritmos NLSST y MCSST de NOAA, Sobrino y ventana partida para las imágenes diurnas; para las nocturnas, además de las anteriores, se calculó el algoritmo de ventana partida (*split window*) sencilla, específicamente diseñada para imágenes nocturnas.

Las expresiones de los algoritmos son las siguientes (extraídas de NOAA Coefficients, vid. Bibliografía, y Sobrino *et al.* (1993)):

$$MCSST = B1 * T4 + B2(T4 - T5) + B3(T4 - T5)(\sec \theta - 1) - B4$$

$$NLSST = A1 * T4 + A2 * (T4 - T5) * MCSST + A3 * (T4 - T5) * (\sec \theta - 1) - A4$$

$$SOBRINO = T4 + (1.4 + 0.32 * (T4 - T5)) * (T4 - T5) + 0.83$$

con $B1, \dots, B4$ y $A1, \dots, A4$ coeficientes tabulados.

Finalmente, las imágenes se recortaron para mostrar el área del mar de Alborán, y se les aplicó una máscara de tierra diseñada *ad hoc*. Como resultado de este proceso, se obtiene una colección de imágenes de SST como la mostrada a continuación (Figura 1). Se hace notar cómo se superponen la pluma nueva, de desarrollo medio, con la pluma anterior, que gira desde la dirección noreste hasta la costa del Rif.

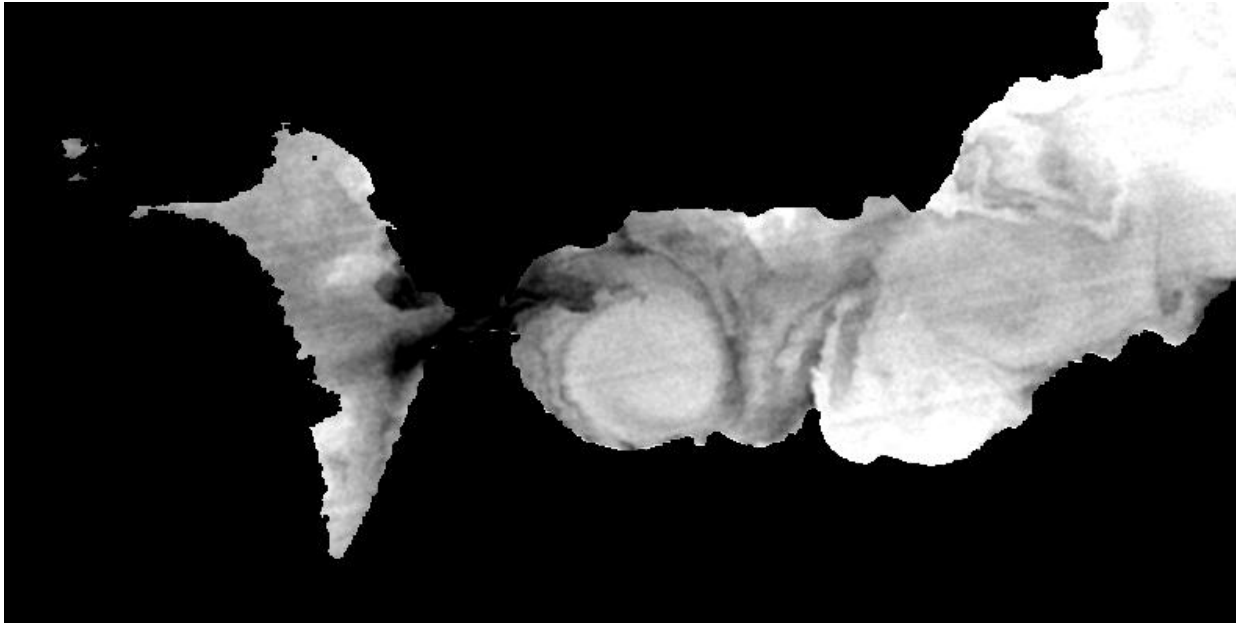


Figura 1. Imagen SST de NOAA-16 con máscaras de nubes y tierra, día 19-05-03.

Una vez establecidas las imágenes SST, georreferenciadas, y con las máscaras de nubes y de tierra aplicadas, se procedieron a realizar las medidas de la temperatura radiométrica mediante los diversos algoritmos considerados. La posición de Boya Alborán es fija y conocida, por lo que la medida de SST se realiza en el píxel con coordenadas más próximas a la boya. Este píxel, por el proceso de georreferenciación seguido, tiene en todas las imágenes las mismas coordenadas de columna y fila.

Como a partir de cada imagen se obtenido varias imágenes SST, por la aplicación de los distintos algoritmos, se va completando una tabla en el que se recojan todos estos valores. Como se ha indicado en el apartado anterior, los algoritmos calculados fueron Day-split, NLSST, MCSST y Sobrino para imágenes diurnas; para las nocturnas, se añadió el algoritmo nocturno de ventana partida, Night-split. La diferencia entre las *split window* y MCSST estriba en que aquéllas han experimentado una segunda georreferenciación mediante la identificación automática de puntos de control.

Los valores experimentales de la boya, de sensibilidad de décimas de grado, se contrastaron con los datos de SST para establecer qué tipo de imagen obtenía mejor resultado. Lo que se desea es encontrar el tipo de imagen, según la plataforma, o según el algoritmo, que mejor se ajustara mediante un ajuste lineal a los datos experimentales de Boya Alborán. Es decir, se han evaluado la plataforma, los algoritmos y la diferenciación del carácter diurno y nocturno de la imagen. También se han ajustado estos datos, en vez de al dato de la boya, a una media móvil dada por la siguiente expresión (tiempo dado en horas):

$$T'(t_0) = 0,1 * T(t_0 - 2) + 0,2 * T(t_0 - 1) + 0,4 * T(t_0) + 0,2 * T(t_0 + 1) + 0,1 * T(t_0 + 2)$$

Los satélites activos en el intervalo temporal considerado son el satélite NOAA 14, 15, 16 y 17. El satélite NOAA-14 se desconectó el 7 de octubre de 2002, al ser reemplazado por NOAA-16, satélite en activo desde el año anterior, pero bien calibrado sólo desde enero de 2002. Por lo tanto, dentro de la ventana temporal considerada –desde junio de 2002-, las imágenes de NOAA-14 disponibles se reducen a unos pocos meses. Sin embargo, en ese lapso de tiempo, el catálogo NESDIS ofrece imágenes procedentes de este satélite a razón de una diurna y una nocturna por día. Aun descartando las imágenes que no cumplieran los criterios mencionados en el apartado anterior, fue posible conseguir una colección de imágenes de NOAA-14.

Al contrario sucedió con los satélites NOAA-15 y NOAA-17. El servidor NESDIS de imágenes de NOAA no ofrecía apenas imágenes de estos satélites, ni en formato HRPT ni en LAC, que resultan compatibles al tener formatos 1b idénticos. Sí las ofreció, sin embargo, para otras localizaciones en el mundo, para la misma época.

Por lo tanto, no se pudo obtener una muestra amplia de imágenes de estos satélites, que se mantuvieron coexistiendo varios años.

En cambio, NOAA-16 presenta una amplia disponibilidad de imágenes para el ámbito espacial considerado; y será, por lo tanto, el satélite que más imágenes válidas aporte, de los cuatro satélites activos durante el tiempo para el que hay mediciones de temperatura de superficie del mar en Boya Alborán.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Haciendo el recuento de las imágenes válidas según los criterios antes expuestos, resultaron 13 imágenes para el satélite NOAA-14, de las cuales 10 son diurnas y 3 nocturnas; y 116 para el satélite NOAA-16, subdivididas en 58 diurnas, y 58 nocturnas.

Una comparación conjunta las medidas de SST de todas las imágenes frente a los datos de Boya Alborán, para aquéllas en las que haya datos –hay que recordar que estos datos de la boya están disponibles hasta junio de 2003–, muestra dos claras regiones, una por cada satélite, cada una con su tendencia. La correlación global es baja –así, se calcula un coeficiente de determinación r^2 de 0,416–; y es obligado, por lo tanto, distinguir la variable satélite a partir de este momento en todas las consideraciones sucesivas. Como ejemplo se muestra la Figura 2 (temperaturas en °C).

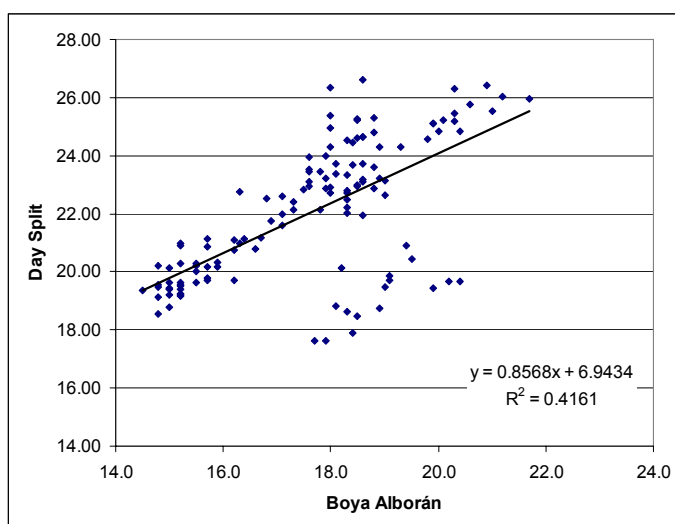


Figura 2. Conjunto completo de datos.

En cuanto al satélite NOAA-14, la escasa cantidad de imágenes hace que resulten poco extrapolables los resultados en el caso nocturno. Sin embargo, se observa una concordancia bastante baja en los resultados de las imágenes, independientemente de su carácter diurno o nocturno, con los datos experimentales de la boya. Si se repiten los cálculos para los casos anteriores eliminando las tres imágenes nocturnas de NOAA-14, antes de su desconexión el 7 de octubre de 2002, se obtienen unos resultados semejantes a cuando se consideraban todas en conjunto. Dado el escaso número de imágenes nocturnas de este satélite, no se ha considerado el caso de imágenes nocturnas por separado.

Las imágenes de NOAA-16 se han separado en diurnas y nocturnas, y se ha procedido a ajustar los diversos algoritmos de obtención de la SST, en relación al dato de Boya Alborán, ya sea el dato bruto, o una media temporal ponderada mediante una media móvil. Para cada caso, de ambos satélites, se ha obtenido un coeficiente de determinación r^2 . Los resultados evaluando todas las imágenes se muestran a continuación, en la Tabla 1:

Tabla 1. Coeficientes r^2 para los distintos algoritmos de SST.

| Satélite | | Day Split | MCSST | NLSST | Sobrino | Night Split |
|----------|----------------|-----------|-------|-------|---------|-------------|
| NOAA-14 | | | | | | |
| | Todas: | | | | | |
| | Boya Alborán | 0.483 | 0.357 | 0.354 | 0.385 | |
| | Boya ponderada | 0.478 | 0.339 | 0.366 | 0.394 | |
| | Diurnas: | | | | | |
| | Boya Alborán | 0.483 | 0.362 | 0.370 | 0.398 | |
| | Boya ponderada | 0.483 | 0.352 | 0.391 | 0.416 | |
| NOAA-16 | | | | | | |
| | Todas: | | | | | |
| | Boya Alborán | 0.751 | 0.782 | 0.790 | 0.770 | |
| | Boya ponderada | 0.768 | 0.803 | 0.810 | 0.790 | |
| | Diurnas: | | | | | |
| | Boya Alborán | 0.741 | 0.801 | 0.819 | 0.788 | |
| | Boya ponderada | 0.731 | 0.802 | 0.812 | 0.781 | |
| | Nocturnas: | | | | | |
| | Boya Alborán | 0.802 | 0.799 | 0.811 | 0.780 | 0.799 |
| | Boya ponderada | 0.851 | 0.849 | 0.860 | 0.823 | 0.849 |

A continuación se muestran varias de estas gráficas cuyo r^2 queda reflejado más arriba; no se contemplan todos los casos puesto que la distribución de las nubes de puntos no varía sustancialmente según el algoritmo, para un mismo satélite y mismo carácter (diurno, nocturno o ambos). En todas las figuras, las unidades en abscisas y ordenadas son °C.

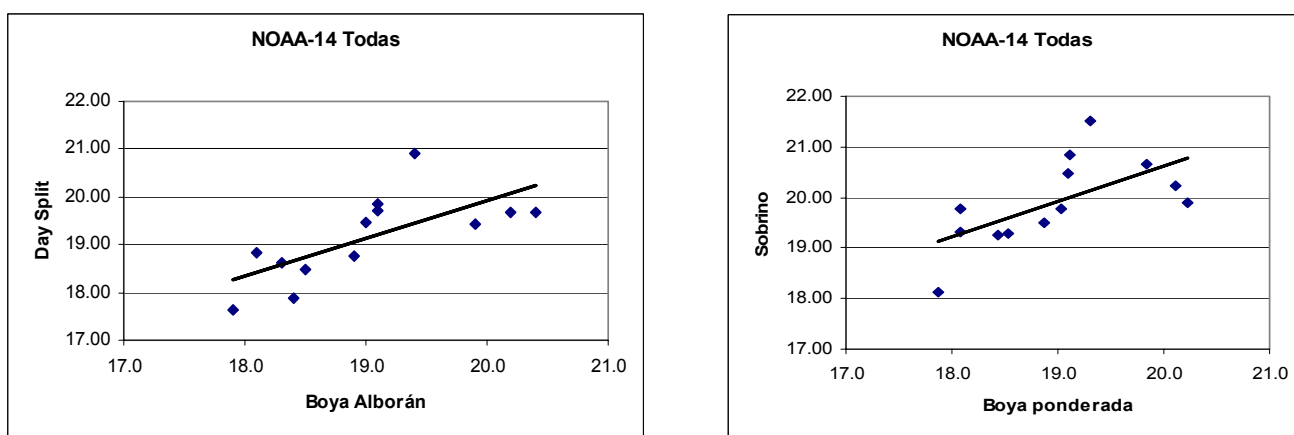


Figura 3. Distribución de puntos con todas las imágenes de NOAA-14.

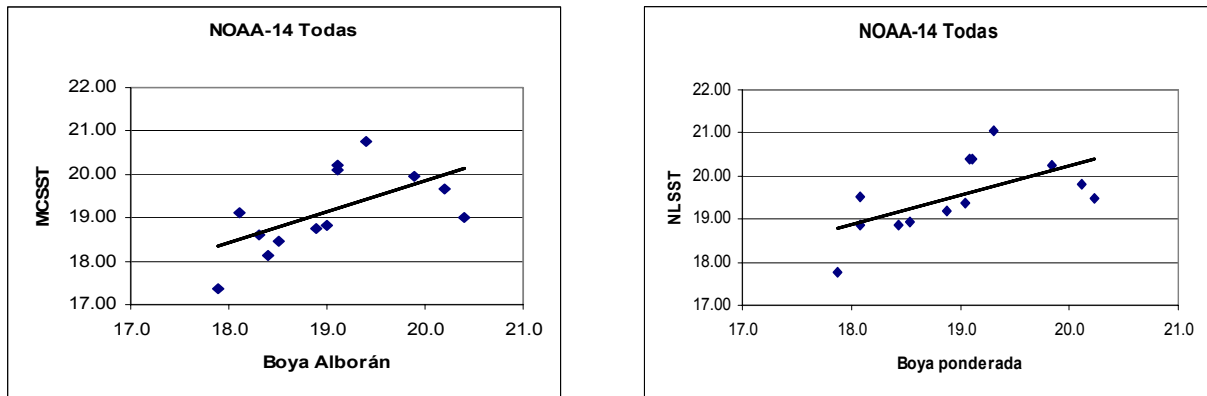


Figura 4. Distribución de puntos con todas las imágenes de NOAA-14.

El ajuste de la nube de puntos a una recta obtiene un r^2 bajo, en toda circunstancia inferior a 0,5, lo que desaconseja el empleo de esta plataforma (NOAA-14) para SST, al menos en el intervalo temporal considerado, que coincide con sus últimas órbitas en servicio. El mejor resultado se da con el algoritmo de Day Split, y el peor, con MCSST.

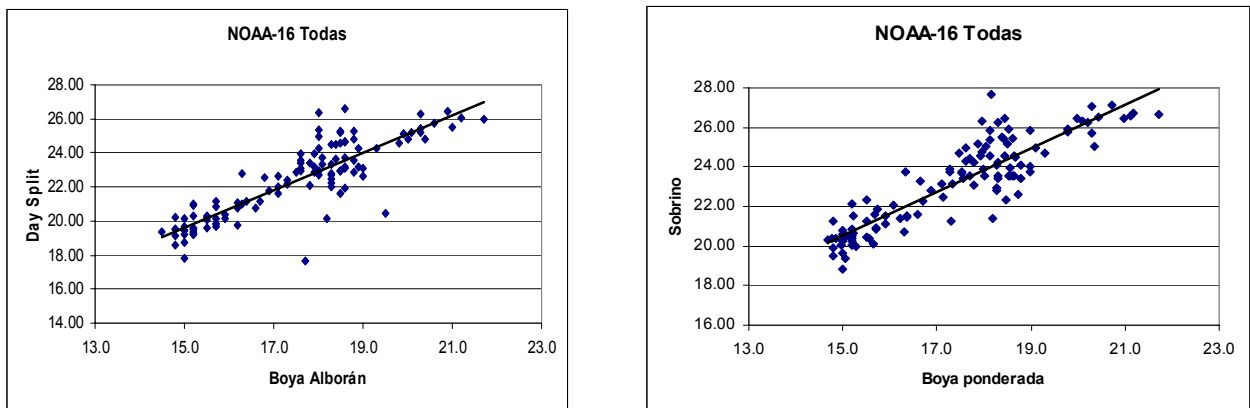


Figura 5. Distribución de puntos con todas las imágenes, diurnas y nocturnas, de NOAA-16.

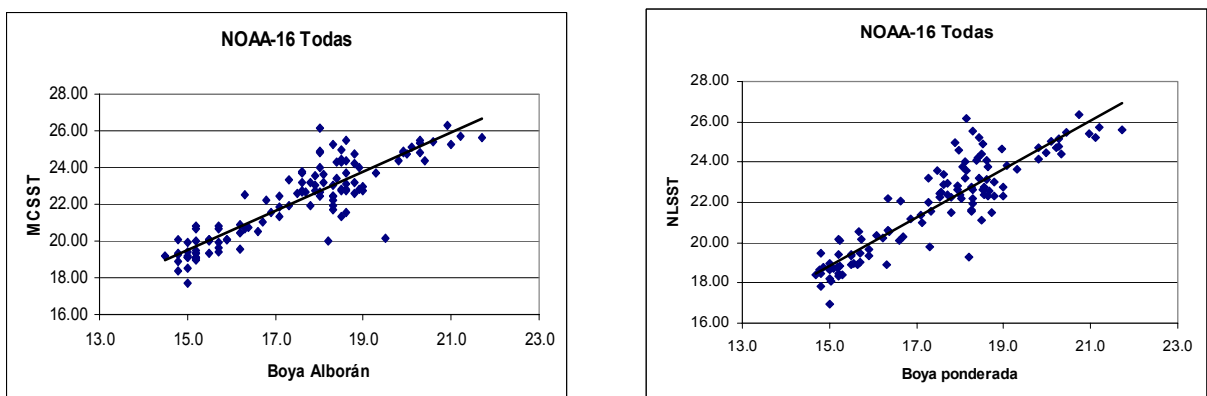


Figura 6. Distribución de puntos con todas las imágenes de NOAA-16.

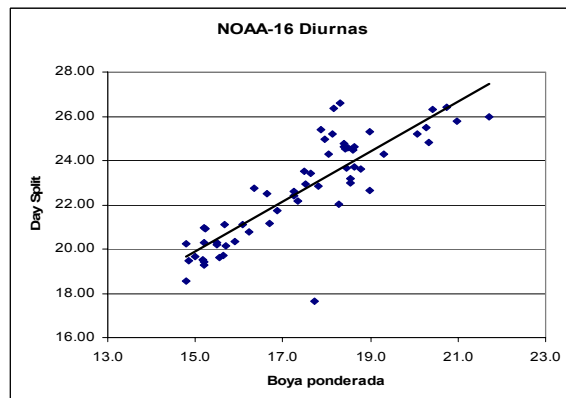
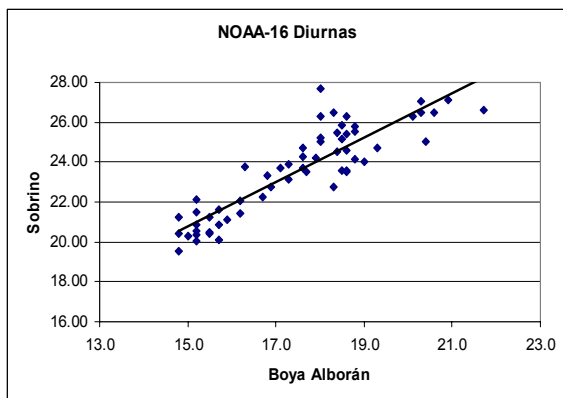


Figura 7. Distribución de puntos considerando sólo las imágenes diurnas de NOAA-16.

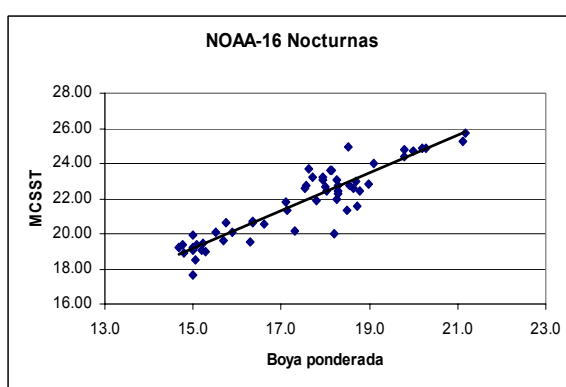
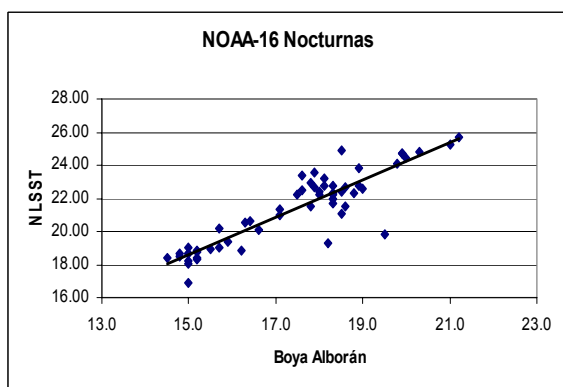


Figura 8. Distribución de puntos considerando sólo las imágenes nocturnas de NOAA-16.

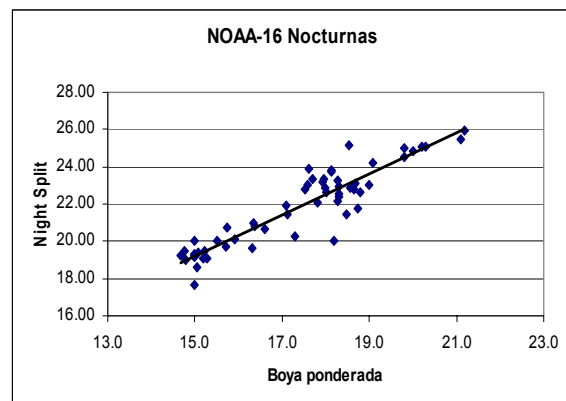
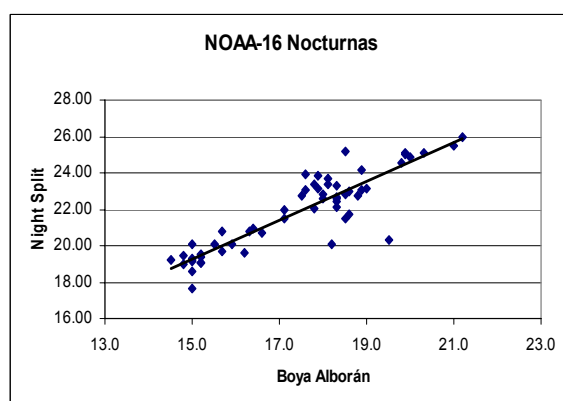


Figura 9. Distribución de puntos de sólo imágenes nocturnas de NOAA-16 con Night-split.

En cuanto a NOAA-16, la correlación con los datos de la boya de todas las imágenes en conjunto, muestra que el mejor algoritmo, aquél con mayor coeficiente de determinación es el NLSST, con un valor de de 0,819 para imágenes diurnas, que mejora sustancialmente al obtenido por el satélite NOAA-14. Si se considera una ponderación de los datos de Boya Alborán, mediante la media móvil explicada con anterioridad, el r^2 aumenta hasta 0,810 para este mismo algoritmo. Por otra parte, el ajuste con NLSST es significativo, ya que se le realizó una prueba F , al 95% de nivel de confianza, y el resultado fue positivo.

Este algoritmo NLSST es también el que marca mejor ajuste separando las imágenes entre diurnas y nocturnas; en el caso nocturno, mejora el resultado una ponderación; en el caso diurno, no, aunque el descenso no es excesivo. De hecho, NLSST supera a los algoritmos específicos de ventana partida, Day-split y Night-split; que por otra parte, arrojan ajustes muy similares para las imágenes nocturnas.

Este hecho del mejor ajuste del algoritmo NLSST contrasta con los resultados obtenidos en otros trabajos anteriores, como el de Yu *et al.* (1996) –aunque trabaja con el formato GAC- y Li *et al.* (2001), en donde se constata un mejor comportamiento del algoritmo MCSST.

En la mayoría de los casos, el algoritmo Day-split es el que peores resultados obtiene para NOAA-16, exceptuando el caso de las imágenes nocturnas, en donde es el algoritmo de Sobrino. Éste, en los restantes casos, arroja un resultado intermedio entre NLSST y Day-split.

Por último, se comentará brevemente varias características sobre la interpretación visual de las imágenes. Se han analizado para el periodo considerado dirección y desarrollo de la pluma. Sobre direcciones, son predominantes las plumas hacia el este (50% del total de imágenes) y hacia el noreste (un 21%), teniendo presente que ha habido un 15% de imágenes que no se han podido asignar. Estas situaciones corroboran lo descrito en Viúdez, A, *et al.* (1998).

Un segundo aspecto es el desarrollo: se ha observado que las plumas alcanzan gran envergadura tras varios días dentro del mar de Alborán –las mayores se detectan pasados siete días-, así como la frecuencia de creación de plumas, que se ha estimado en pocos días, entre tres y cinco. Esto no impide que haya épocas de circulación tranquila en la que no se aprecia ninguna estructura de pluma, lo que sucede en un 25% de las imágenes de la colección.

Futuros trabajos pueden ir encaminados a determinar otras características de la pluma a partir de la colección de imágenes de SST, como puede ser hallar la diferencia de temperatura entre las masas de agua, o estudiar si la estación del año marca algún patrón (de intensidad, de frecuencia o dirección) en la pluma.

CONCLUSIONES

1. El algoritmo que mejor correla los datos de Boya Alborán y las imágenes SST es el algoritmo NLSST en el caso de la plataforma NOAA-16, con un valor r^2 de 0,860. Este ajuste es estadísticamente significativo al 95% de nivel de confianza.

2. Frente a ajustes buenos del satélite NOAA-16 con valores de r^2 no inferiores a 0,740 y en varios casos superior a 0,800, los ajustes de la plataforma NOAA-14 resultan muy poco significativos por su bajo coeficiente de determinación. La coincidencia del periodo considerado con la época de desactivación de este satélite parece haber provocado que por una parte, no se dispongan de tantos casos como en NOAA-16; y por otra, que se contradigan los resultados observados en Li *et al.* (2001) respecto a NOAA-14.

3. Pese a estar diseñado específicamente para imágenes nocturnas, el algoritmo de ventana partida Night-split muestra unos r^2 similares a los de Day-split, aplicados sobre la misma imagen nocturna.

4. En general se observa una mejoría en los ajustes si se considera no los datos registrados por Boya Alborán para la época de la toma, sino en vez de un único valor, el correspondiente a una media ponderada (media móvil) que involucre los datos registrados hasta con dos horas de antelación y dos de retraso. El hecho de incluir una ponderación parece actuar positivamente sobre las mediciones experimentales, pues puede entenderse que atenúe alguna fluctuación en el equipo que pudiera darse.

5. El ajuste entre los datos de Boya Alborán y los valores obtenidos de las imágenes SST para las coordenadas geográficas donde se localiza la boya nunca es la recta identidad, lo que enseña que existen divergencias entre ambos valores, medido y calculado, respectivamente.

6. En un análisis cualitativo, a lo largo de las imágenes SST calculadas, se ha constatado que el desarrollo de las plumas en el mar de Alborán es un hecho recurrente, con tendencia a seguir, en sus fases incipientes, la dirección este y en menor medida, hacia el noreste. Se detecta también cierta habitualidad respecto a las fases avanzadas de la pluma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al profesor José Juan Alonso del Rosario (Universidad de Cádiz), por proporcionarles los datos empíricos de la Boya Alborán, así como al ingeniero técnico en Topografía Rafael Baena Calatrava por la implementación del módulo de cálculo de SST en IDL.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnone, R. (1987): Satellite-derived color-temperature relationship in the Alboran Sea. *Remote Sensing of Environment*, 23.
- Baldacci, A. et al. (2001): A study of the Alboran Sea mesoscale system by means of empirical orthogonal function decomposition of satellite data. *Journal of Marine Systems*, 29.
- Chuvieco, E. (2002): *Teledetección ambiental*. Ed. Ariel. Barcelona.
- Derrien, M. et al. (1993): Automatic cloud detection applied to NOAA-11 AVHRR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 46.
- Goward, SN. et al. (1991): Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sensing of Environment*, 35.
- Li, X. et al. (2001): Validation of coastal sea and lake surface temperature measurements derived from NOAA/AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 22.
- NOAA (2005): *NOAA KLM user's guide with NOAA-N,-N' supplement*: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/index.htm>
- NOAA Coefficients: <http://manati.orbit.nesdis.noaa.gov/sst/coefficient.html>
- Ontar Corporation (2004): *PcModWin manual*: <http://www.ontar.com>
- Sanders, RW. et al. (1988): An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances for AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9.
- Sobrino, JA. et al. (1993): Impact of the atmospheric transmittance and total water vapor content in the algorithms for estimating satellite sea surface temperature. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31.
- Tintorè, J. et al. (1988): A study of an intense density front in the Eastern Alboran Sea: the Almeria-Oran front. *Journal of Physical Oceanography*, 18.
- Viúdez, A. et al. (1998): On the upper layer circulation in the Alboran Sea. *Journal of Geophysical Research*, 103.
- Yu, Y. et al. (1996): Satellite derived sea surface temperature variability in the Western tropical Pacific Ocean. *Remote Sensing of Environment*, 58.

Zheng, QA. et al. (1982): Determination of winter temperature patterns, fronts, and surface currents in the Yellow Sea and East China Sea from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 12.