

# Mapas SST de alta resolución mediante combinación de datos TM-AVHRR

J. A. Triñanes<sup>1</sup>, J.M. Cotos<sup>1</sup>, J. Torres<sup>2</sup>, y J. Arias<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Física Aplicada. Universidad de Santiago.

<sup>2</sup>Departamento de Física Fundamental y Experimental. Universidad de La Laguna.

<sup>3</sup>Departamento de Electrónica Ciencias de la Computación. Universidad de Santiago. 15706 Santiago de Compostela.

## RESUMEN

La capacidad multiespectral de los sensores AVHRR de los satélites NOAA más recientes permiten el cálculo muy preciso de las temperaturas superficiales del mar (SST), pero la resolución espacial de estos datos (cada píxel corresponde aproximadamente a un cuadrado de 1.1 km de arista) es insuficiente para el estudio de muchos fenómenos de interés en las zonas costeras (p.e. movimientos de las especies pelágicas, dinámica de sedimentación, mareas rojas y evolución de las plumas contaminantes). Por otro lado, la banda 6 del sensor TM instalado en el Landsat 5 tiene una resolución espacial muy buena (120 x 120 m por píxel) pero, dado que es una sola banda, no permite cálculos precisos de SSTs. En el presente estudio empleamos datos de SSTs del sensor AVHRR para calibrar la radiancia de la banda 6 del sensor TM con el objetivo de lograr un mapa de SSTs de alta resolución espacial para la zona costera de Galicia, un área con gran riqueza pesquera y marisquera.

**PALABRAS CLAVE:** Landsat TM, NOAA AVHRR, rectificación, clasificación, regresión.

## ABSTRACT

The multispectral capabilities of the AVHRR sensors on the most recent NOAA satellites allow precision calculation of sea surface temperatures (SSTs), but the spatial resolution of these data (each pixel corresponds to an area approximately 1.1 km square) is insufficient for studies of many phenomena of interest in coastal zones (e.g. movements of pelagic species, sedimentation dynamics, red tides, and the evolution of pollutant plumes). Band 6 of the Landsat 5 TM sensor, on the other hand, has good spatial resolution (120 x 120 m per pixel) but, as a single band, does not afford SSTs. In this work we used AVHRR SST data to calibrate the TM Band 6 radiance data for high-resolution SST mapping of the coastal waters of Galicia (N.W. Spain), a region rich in marine species of commercial importance.

**KEY WORDS:** Landsat TM, NOAA AVHRR, rectification, classification, regression.

## INTRODUCCIÓN

La monitorización de la temperatura superficial del mar (*Sea Surface Temperature-SST*) desde radiómetros instalados en satélites que orbitan la Tierra es la técnica de teledetección marina que ha tenido un mayor impacto en la ciencia oceanográfica. El uso de datos del infrarrojo térmico en unión de otros datos multiespectrales reflexivos, obtenidos desde altitudes de avión, se ha confirmado como un método muy efectivo para incrementar la exactitud de la clasificación de los rasgos de la superficie terrestre.

También ha sido demostrado que datos del infrarrojo térmico radiométricamente calibrados obtenidos a través de sensores montados a bordo de aviones pueden ser usados para producir mapas exactos de temperaturas de masas de agua. Éstos se han obtenido también de datos del IR térmico recogidos en 1973 por el sistema escaneador Skylab SL-2 S192. Sin embargo, durante casi 10 años los usuarios de satélites no han tenido a su disposición datos del IR térmico de alta resolución espacial,

muy apropiado para el estudio de las aguas costeras, hasta la puesta en funcionamiento del Landsat-4.

Nuestro objetivo es aprovechar de esta alta resolución espacial del sensor TM y de la exactitud de las medidas térmicas del NOAA para conseguir mapas de temperaturas de alta precisión, superior a cualquiera de los realizados hasta el momento, de la costa gallega y extrapolables a cualquier otra zona; con un coste en tiempo y dinero muchísimo menor que el que requeriría un estudio semejante llevado a cabo con los métodos tradicionales de medida de la temperatura de las capas superficiales del mar.

## RADIACIÓN INFRARROJA

La porción infrarroja del espectro electromagnético se encuentra entre las regiones del visible y de microondas (entre 0.78  $\mu\text{m}$  y 1000  $\mu\text{m}$ ). Después de un siglo de constantes progresos, el uso de la tecnología del infrarrojo se ha extendido a una multitud de otras aplicaciones. Entre ellas se en-

cuentra el empleo de sensores infrarrojos para teledetección.

El Sol emite radiación en longitudes de onda cortas (con un pico en el visible) comparadas con la emisión termal de la Tierra, la cual está a una temperatura mucho más baja. Las medidas de la temperatura superficial de mar usando radiometría infrarroja hace uso de esta diferencia, midiendo la radiación emitida en la banda 10-12  $\mu\text{m}$  como un indicador de la temperatura del mar.

En el contexto de la teledetección de las superficies del mar y de la tierra, el pico del espectro de emisión para un emisor perfecto a 300 K está sobre 10  $\mu\text{m}$ , y los sensores que operan cerca de esta longitud de onda serán los más apropiados para medir la temperatura de la superficie. Pero incluso a la longitud de onda del pico de emisión de la superficie del mar, la radiación solar directa será sustancialmente más grande que la radiación terrestre. Por la noche, esto no es un problema debido a que no hay radiación solar, pero las cosas cambian drásticamente de día.

La radiación electromagnética emitida por la Tierra en el infrarrojo térmico es perturbada durante su travesía de la atmósfera antes de llegar al radiómetro. Así, la radiación electromagnética puede sufrir una dispersión (fundamentalmente por los aerosoles), una absorción (por determinadas moléculas, entre ellas el vapor de agua, y por los aerosoles) e incluso una emisión propia, a causa de la radiación térmica atmosférica. Esta última depende de los perfiles verticales de temperatura y de la concentración de los constituyentes emisores (los mismos que los que absorben) de la atmósfera. Por lo tanto, para hacer las correcciones atmosféricas, si no se puede evitar, se tiene que hacer un sondeo atmosférico en el instante del paso del satélite con objeto de determinar los perfiles verticales de temperatura, de vapor de agua y de aerosoles. Sin embargo, es difícil conocer el perfil y la composición de los aerosoles, por lo que la medida de la temperatura en presencia de atmósfera difusa (cargada de aerosoles) sigue siendo complicada. Incluso es imposible a través de las nubes que, salvo raras excepciones, son opacas a las radiaciones infrarrojas. En este caso, hay que contentarse de momento con detectar su presencia y eliminar los datos correspondientes a los elementos de superficie *nubosos*. Se trata en este caso de una limitación importante de la medida de la temperatura de la superficie a partir del espacio, limitación que se intenta superar con los sistemas hiperfrecuencias. En el intervalo espectral de las hiperfrecuencias las nubes son transparentes, pero en contrapartida, la radiación emitida por la superficie no está tan directamente relacionada con su temperatura como en el infrarrojo térmico: depende mucho, entre otras cosas, de su humedad y su rugosidad. Por tanto se tendrán que resolver numerosos problemas antes de que este enfoque sea operativo.

## PREPROCESAMIENTO DE IMAGENES

Antes de comparar ambas imágenes debemos delimitar el área de estudio. Decididos a aprovechar al máximo la superficie útil, aislamos de la imagen del Landsat aquella superficie que contenga un mayor número de pixels asociados a masas de agua. De esta manera, logramos una tira de 1837 columnas y 1921 filas dentro de la cual podemos apreciar claramente las rías de Noya, Arosa y la porción superior de la ría de Pontevedra, así como una superficie correspondiente a mar abierto que se extiende hasta unos 18 km al oeste del Cabo de Corrubedo.

La única banda del sensor TM que nos interesa en la investigación presente es la térmica (banda 6) y, por lo tanto, debemos separarla de las otras bandas que constituyen la imagen. Dado que la estructura de los ficheros Landsat nos es conocida, podemos identificar los bytes dentro del fichero que están asociados con dicha banda, despreciando todos los demás. De esta manera hemos evitado que información calificada de innecesaria ocupe una gran cantidad de memoria (del orden de 21 Megabytes) y, además, limite la velocidad de proceso al acceder a los datos de interés.

Cuando resaltamos dentro de la imagen aquellos pixels asignados al mar observamos un efecto característico de las imágenes del Landsat, el *stripping* (bandeado de la imagen). Este efecto, fácilmente detectable en la Figura 1, se debe al mal calibrado entre los detectores que forman el sensor; esto es, a que alguno de ellos codifique la radiancia que recibe en ND superiores o inferiores al resto. Además la *memoria* del sensor al pasar de zonas de alta a baja reflectancia ayuda a resaltar aún más este efecto.

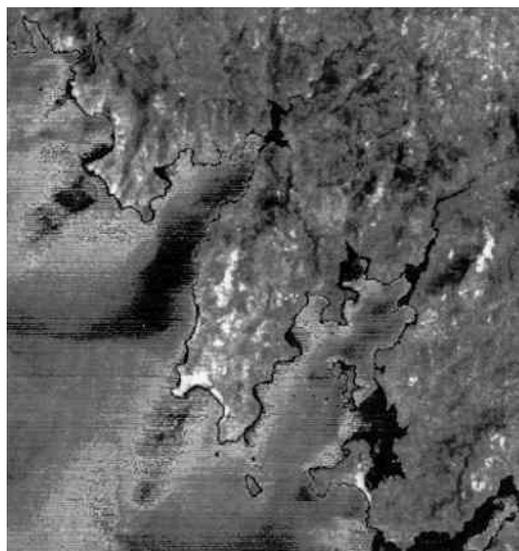


Figura 1. Imagen en pseudocolor de la banda térmica TM (canal 6) representando área de estudio.

Debido a que la resolución espacial de la banda térmica es cuatro veces menor que la de las demás bandas, en ella cada muestra viene representada por un grupo de 4x4 pixels (o bytes en el fichero de datos). Un análisis detallado de la imagen revela que entre cada diez líneas de muestreo se encuentra una que se desvía del comportamiento anterior y, dentro de ella, cada muestra está formada por grupos de 4 x 5 pixels. La razón de esta desviación del comportamiento ideal puede ser debida a un funcionamiento erróneo del multiplexo encargado de codificar y formatear los datos recibidos de los detectores del sensor TM o bien a un error en alguno de los algoritmos aplicados en la estación receptora de las imágenes para corregir los efectos de la distorsión panorámica, la rotación terrestre, la velocidad variable del espejo de barrido, etc.

Para la separación de los componentes espaciales de una imagen dada existen 2 métodos complementarios. El primero es aplicado directamente a la imagen en el dominio espacial. El segundo está basado en la transformación de la imagen en sus componentes espaciales de frecuencia a través de la transformada de Fourier. Hay generalmente una correspondencia uno-a-uno entre los filtros de los dominios frecuenciales y espaciales; sin embargo, filtros específicos pueden ser más fáciles de diseñar en el dominio de la frecuencia pero pueden ser aplicados más eficientemente en el dominio espacial. Nosotros nos hemos decidido por la aplicación de procedimientos en el dominio espacial.

Después de aplicar varios tipos de filtros, entre los que cabe señalar el filtro del máximo (mínimo), que ofrece el valor del ND más alto (más bajo) de entre los pixels que forman la ventana; el filtro de la mayoría (minoría), cuya salida es el valor del ND que representa la mayoría (minoría) de los pixels del array; y distintos tipos de filtros diseñados específicamente para la satisfacer el requerimiento de la eliminación del ruido debido al desequilibrio (*imbalance*) del sensor, llegamos a la conclusión de que los dos filtros que mejor se adaptan a nuestros deseos son el filtro de la mediana y el filtro de la media. Este último presenta una serie de ventajas que lo hacen especialmente idóneo: la mediana de un conjunto de  $n$  números (donde  $n$  es un número impar) es siempre igual a uno de los valores presentes en el conjunto; la mediana es mucho menos sensitiva a los errores o a valores extremos de los datos. De aquí se deriva que el filtro de la mediana preserva los contornos mejor que un filtro de la media, el cual empaña o suaviza los niveles de gris en la vecindad del píxel central de la ventana de filtrado. El por qué de que el filtro de la media responda tan bien como el de la mediana al ser aplicado sobre nuestra imagen TM puede deberse a la pequeña variabilidad en

ND existente entre los pixels catalogados como correspondientes a masas de agua, dado que en toda la imagen un rango de 7 niveles de gris abarcan más del 95% de aquéllas, sólo excluyendo algunas de las más cercanas a las costas y las de la Reserva Natural de la Ensenada de O Grove.

En cuanto al tamaño de la ventana, tras las diversas pruebas realizadas nos decantamos por la elección de aquellos que se encuentren entre [5,5] y [13,13]. Nos hemos decantado finalmente por el filtro de la mediana de tamaño [7,7] que hemos tenido que aplicar dos veces para obtener resultados satisfactorios. La imagen resultante se ha librado del efecto de bandeado.

En lo que respecta a la imagen del sensor AVHRR, obtenida después de recortar de la original un área de unos 80.000 km<sup>2</sup>, cabe decir que consta de una matriz de 256x256 elementos de dos bytes cada uno. De esos 2 bytes, los 4 más significativos son siempre cero, dado que basta con 10 bits para representar los 1024 niveles de cuantización del NOAA.

Lo primero que hacemos con los datos recibidos del NOAA-11 es la reparación de las líneas que se han visto perturbadas en el proceso de la transmisión, bien perdiéndose, bien cambiando los valores de los pixels que las componen. Para ello duplicamos dichas líneas con las más líneas correctas más cercanas. Si sólo hay una línea se elige como línea sustitutoria la situada inmediatamente encima.

## EXTRACCIÓN DE TEMPERATURAS

Dichas imágenes las procesamos con objeto de obtener mapas de temperaturas mediante la aplicación del algoritmo denominado *split-window* sobre aquellas áreas suficientemente libres de una cubierta nubosa que nos permitirá alcanzar exactitudes de hasta 0.1 °C. Los coeficientes empleados en el cálculo de las temperaturas están basados en medidas de campo realizadas por la Xunta de Galicia en su campaña para la prevención de las mareas rojas y en datos proporcionados por los propios pescadores acerca de la temperatura superficial existente en el área de pesca. De esta manera, la exactitud de los mapas así obtenidos se puede calificar de excelente para nuestros propósitos. El procedimiento general de extracción de temperaturas está basado en la información contenida en Lauritson&Nelson (1979). Sucintamente, se basa en transformar los niveles digitales de las bandas del infrarrojo térmico que componen la imagen a las llamadas temperaturas de brillo, mientras que los de las otras dos bandas del visible son pasados a % de albedo. Posteriormente, un conjunto de test es aplicado sobre el conjunto resultante de manera que nos permite discriminar sobre el área de trabajo las zonas nubosas de las que no lo son. Finalmente, estimamos la temperatura superficial del mar a partir de la ecuación siguiente:

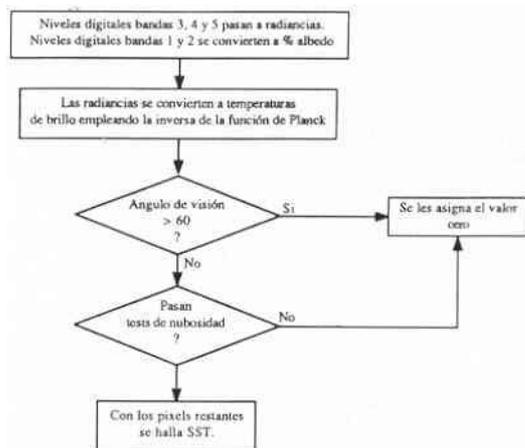


Figura 2. Representación esquemática general del algoritmo de extracción de temperaturas superficiales del mar

$$SST = a'T_4 + b'(T_4 - T_5) + c' \quad (1)$$

donde  $T_4$  y  $T_5$  son las temperaturas de brillo para los canales 4 y 5, mientras que los coeficientes  $a'$ ,  $b'$  y  $c'$  son los denominados coeficientes de peso.

El conjunto de pasos que se aplican sobre el fichero recibido en nuestra estación a la hora de extraer el mapa SST se puede sumarizar en el diagrama de la figura 2.

Los valores de temperaturas así obtenidos los grabamos en un fichero, de manera que exista una correspondencia uno-a-uno entre la posición dentro del fichero de un píxel y la de su temperatura asociada. Pero las temperaturas no van a ser, generalmente, números enteros. Para evitar este problema multiplicamos la temperatura por 10 antes de introducirla en el fichero, así una temperatura hipotética de 20,1 °C tendría asociado un ND de 201. (Fig. 3).

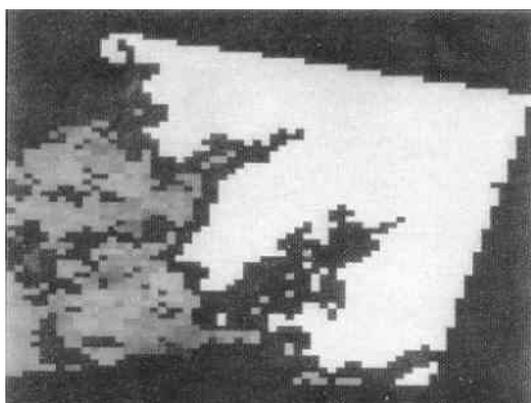


Figura 3. Mapa SST AVHRR en pseudocolor. Los pixels negros correspondientes a mar del mapa de temperaturas se asocian a áreas cubiertas de nubes.

El anterior procedimiento está estudiado para ser aplicado sobre imágenes obtenidas de día. En el caso de tomas nocturnas la secuencia de tests anterior no se podría aplicar en su totalidad, en parte

porque el canal 2 no es útil en estas condiciones, pero el procedimiento no varía sustancialmente respecto al que hemos aplicado anteriormente. De día, la banda 3 no puede ser empleada por 10 que el único algoritmo válido es el que hemos descrito antes, denominado algoritmo *split-window*. Para imágenes nocturnas los tres canales (3, 4 y 5) pueden usarse en diferentes combinaciones. Omitimos aquí el análisis que requieren estas tomas nocturnas dado que trabajaremos sobre imágenes diurnas.

## REFERENCIAR LAS IMÁGENES: PUNTOS DE CONTROL

Ya tenemos, pues, un mapa de temperaturas de la superficie oceánica que abarca un área muchísimo mayor que nuestra subimagen extraída del Landsat. Claramente, muchos de los datos de temperatura que hemos hallado no nos servirán de nada, pues no tenemos una referencia Landsat en dicho punto. Además, todavía no disponemos de una función que nos responda a la siguiente interrogante: ¿Qué píxel NOAA se asocia con un determinado píxel Landsat, y viceversa?.

Para esto último necesitamos georreferenciar las dos imágenes respecto al mismo sistema de coordenadas. Más concretamente, rectificaremos la imagen Landsat para superponerla con el mapa de temperaturas del NOAA de manera que podamos identificar conjuntos de entrenamiento, extraer sus estadísticas y lograr una recta de regresión que relacione las temperaturas de una banda con los niveles digitales de la otra. La rectificación la vamos a llevar a cabo a través de los llamados puntos de control. Éstos son píxels específicos de la imagen TM para los cuales son conocidas las coordenadas en el fichero de imágenes NOAA. Constan de dos pares de coordenadas: las coordenadas de origen, que son coordenadas del fichero de datos de la imagen que va a ser rectificada; y las coordenadas de referencia, que en este caso son las coordenadas dentro del fichero de la imagen NOAA de partida pertenecientes a la banda 3, a las cuales se asocian las de origen. La calidad del ajuste dependerá de la posición con la que se localicen estos puntos. Teniendo en cuenta la gran diferencia en las resoluciones de una y otra imagen (120 m-1.1 km) la elección más obvia para estos puntos son las líneas de costa, de ahí que hayamos escogido como banda de referencia la 3, que permite una mejor diferenciación de la costa que las demás bandas de la imagen del sensor AVHRR; y como banda de origen la 7 de la imagen TM, dado que comparte las mismas características que la anterior. No importa el efecto de las mareas en este caso, ya que la imagen del NOAA es insensible a ellas. Por lo tanto, todos aquellos accidentes geográficos que destaquen en la imagen de menor resolución serán escogidos como puntos de control. El número de éstos es 22, un número muy elevado para el orden de la transformación, que

hemos hecho 1, para la que bastan sólo 3 puntos de control. Hemos superado este listón mínimo para garantizar una buena conformidad entre imagen y mapa. Además, los puntos se distribuyen uniformemente sobre la línea de la costa, lo que evita errores debidos a una ponderación excesiva de algún sector del área de estudio.

Un alto ECM (Error Cuadrático Medio) indica que ese punto no se ajusta convenientemente a la transformación imagen TM/imagen A VHRR. El promedio de los ECM para todos los puntos de control facilita una evaluación de la calidad general del ajuste. Si ese valor no es satisfactorio, optamos por eliminar aquellos puntos con un alto ECM, ya que se asume que no se localizaron correctamente. Al eliminarse algún punto de control, se calcula de nuevo la función de ajuste y los ECM para cada punto. El proceso se interrumpe cuando todos los puntos seleccionados presentan un ECM por debajo de un cierto umbral, que hemos fijado en 10. El error medio debe estar, en ese momento, dentro de unos márgenes tolerables, de acuerdo con la escala y precisión con que se quiera obtener los resultados. Para conseguir este ECM necesitamos eliminar 7 puntos de control, lo que implica que finalmente nos hemos quedado con 15, cantidad muy por encima de un mínimo. Una transformación de primer orden es una transformación lineal. Mediante ella podemos: escalar, inclinar, rotar y desplazar. Estas características nos valen para nuestros propósitos debido a que el área de estudio no es demasiado extensa y, por lo tanto, la distorsión panorámica que implicaría un orden de transformación mayor no tiene cabida.

El paso siguiente es encontrar en la imagen de referencia la localización de las esquinas de la imagen que es rectificadas. Debido a que la red de pixels de ambas imágenes es muy distinta en tamaño y en orientación, debemos de encontrar un método que nos permita realizar el trasvase de los ND de la imagen original a los de la imagen corregida. Esto se ha llevado a cabo de tres maneras:

- Vecino más próximo
- Interpolación bilineal
- Convolución cúbica

La elección entre estas tres formas de transformación de la imagen de partida la realizamos llevando a la práctica los tres métodos y comprobando cuál es el que mejor se adapta a nuestros propósitos. El resultado es algo que ya preveíamos después de ver la baja variabilidad espacial de la imagen; los tres ofrecen resultados similares (lo deducimos del estudio visual de la imagen y del análisis del histograma). Por tanto, nos quedamos con el primer método (vecino más próximo), mucho más barato computacionalmente hablando que los dos

restantes. La gráfica de la figura 4 muestra el resultado obtenido:

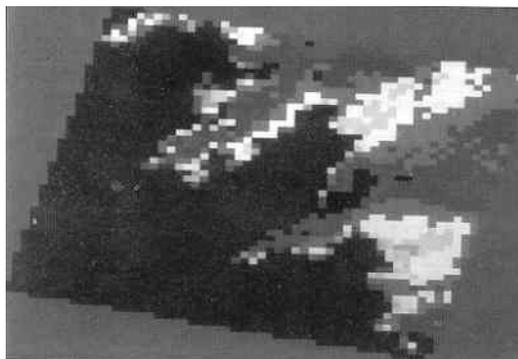


Figura 4. Imagen TM después del proceso de rectificación.

## CLASIFICACIÓN

Construimos un nuevo fichero que contiene la banda térmica del Landsat retransformada más la banda correspondiente al mapa de temperaturas. Tomando muestras en las zonas de alta correlación podemos llegar a resultados satisfactorios, pero no nos limitaremos a este estudio parcial. Una observación atenta nos permite descubrir que zonas cálidas, templadas y frías aparecen desplazadas en la imagen térmica respecto a las mismas zonas del mapa de temperaturas, algo absolutamente normal teniendo en cuenta la deriva de las corrientes durante el tiempo que separa la toma de ambas imágenes. Centramos entonces nuestros esfuerzos en aislar dichas zonas en ambas representaciones, calcular sus estadísticas y hallar la recta de regresión que mejor se ajusta a los datos de ambas bandas. Más aún, los datos de la banda térmica podemos extraerlos de la imagen no rectificadas, debido a que no estamos correlacionando zonas comunes a las dos bandas, sino niveles de gris en la banda 6 TM con grados centígrados en el mapa de temperaturas extraído de las medidas hechas por el NOAA-11.

### Métodos supervisado y no supervisado

Tradicionalmente se han dividido los métodos de clasificación en dos grupos: supervisado y no supervisado, de acuerdo a la forma en que son obtenidas las estadísticas de entrenamiento. El método supervisado parte de un conocimiento previo del terreno, a partir del cual se seleccionan las muestras para cada una de las categorías.

Por su parte, el método no supervisado procede a una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen. El criterio que empleamos aquí para el análisis no supervisado se basa en la distancia euclídea entre pixels. En cuanto al algoritmo de agrupamiento emplearemos uno de los que tradicionalmente ha dado mejores resul-

tados, denominado ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*), que lleva a cabo una clasificación completa de la imagen repetidamente.

El empleo del método no supervisado sólo tiene sentido dentro de la imagen multibanda, dado que en una imagen que consta de una sola banda, una simple expansión del contraste nos permite identificar las distintas clases temáticas de la imagen.

Al aplicar ambos métodos a la imagen deducimos que tanto el supervisado como el no supervisado ofrecen resultados similares. El análisis supervisado puede resultar subjetivo, pues el usuario establece a priori unas categorías sin valorar las características espectrales de la imagen. Además, el método supervisado nos permite una mayor libertad a la hora de elegir, discernir y discriminar entre las distintas clases de nuestro estudio y, además, consume menos tiempo de CPU que el método no supervisado. En otras palabras, el análisis no supervisado se orienta no tanto a la clasificación de la imagen, como a definir precisamente los grupos o categorías que intervendrán en la clasificación propiamente dicha.

### Método mixto

Con objeto de paliar los inconvenientes de ambos métodos se puede intentar aplicar el análisis supervisado para guiar el no supervisado. En este caso delimitamos dentro de la imagen unas zonas donde detectaremos estos grupos espectrales homogéneos y aplicamos el método no supervisado. Los resultados coinciden casi por completo con los del método supervisado. Las categorías temáticas a las que hemos llegado han sido tres, a las cuales, en virtud del estudio de sus estadísticas, hemos asignado los siguientes nombres: *aguas frías*, *aguas templadas* y *aguas calientes*. Hay muchas formas de definir y medir la distancia entre estas categorías temáticas. Conceptualmente, el modo más simple de caracterizar esta separación es computar la distancia media entre todos los pares de puntos formados por elementos pertenecientes a clases distintas. Pero hay otras distancias intergrupo más apropiadas que tienen en cuenta la variabilidad de los puntos pertenecientes a cada clase, es decir, son medidas estadísticas. Entre estas últimas se han mostrado muy efectivas la Divergencia Transformada y la distancia de Jeffries-Matusita.

La fórmula para computar la Divergencia Transformada es la siguiente (Swain y Davis, 1978):

$$D_{ij} = 1/2 \text{tr}((C_i - C_j)(C_j^{-1} - C_i^{-1})) + 1/2 \text{tr}((C_i^{-1} - C_j^{-1})(u_i - u_j)(u_i - u_j)^T) \tag{2}$$

$$D_{ij} = 2 \left( 1 - e^{-\frac{D_{ij}}{8}} \right)$$

donde:

$i$  y  $j$  son las dos firmas que están siendo comparadas;

$C_i$  es la matriz de covarianza de la firma  $i$ ;

$u_i$  es el vector medio de la clase  $i$ ;

$t_r$  es la función traza;

$T$  es la función transposición;

$D_{ij}$  es la divergencia ordinaria; y

$DT_{ij}$  es la Divergencia Transformada para las firmas  $i$  y  $j$ .

Con la misma notación, la fórmula para computar la distancia de Jeffries-Matusita (JM) es la siguiente (Swain y Davis, 1978):

$$\alpha = \frac{1}{8} (u_i - u_j)^T \left( \frac{C_i + C_j}{2} \right)^{-1} (u_i - u_j) + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{(C_i + C_j)/2}{\sqrt{|C_i| |C_j|}} \right) \tag{3}$$

$$JM_{ij} = \sqrt{2(1 - e^{-\alpha})}$$

Ambas distancias están limitadas superior e inferiormente. Si la divergencia calculada es igual al límite superior, entonces podemos decir que las distintas firmas espectrales son totalmente separables en las bandas de estudio. Una divergencia igual a cero significa que las firmas son inseparables. La Divergencia Transformada se encuentra entre 0 y 2000, mientras que la distancia de Jeffries-Matusita está entre 0 y 1414. Nuestros resultados ofrecen una mínima distancia entre clases de 1971 para la DT y 1401 para JM, existiendo varios valores iguales a los máximos para ambas medidas de separabilidad. Estos valores confirman la validez de la clasificación llevada a cabo; hemos encontrado que las firmas espectrales son completamente discernibles.

### Clasificación banda a banda

Como hemos descrito antes, los conjuntos de alta homogeneidad espectral dentro de la imagen constituida por la banda térmica rectificadora del Landsat y el mapa de temperaturas extraído del NOAA, representan un porcentaje no demasiado elevado de la superficie común entre ambas bandas. Por lo tanto, vamos a proceder a otro estudio basado en la elección en cada banda de un conjunto de pixels de unas características definidas. Estos conjuntos nos servirán para elaborar unas estadísticas a partir de las cuales podamos extraer otras rectas de regresión. Para ello no emplearemos la banda térmica rectificadora, sino la original, después de eliminar el fenómeno de *striping*, que conserva una mayor fidelidad que aquella con la distribución real de las temperaturas en el momento del paso del satélite. En ella distinguimos 2 masas de agua caliente, una enfrente de Corrubedo y otra al

norte de la ría de Noya (ver figura 1); dos masas de agua fría, en el interior de la ría de Noya y en el límite inferior de la imagen, enfrente de la ría de Pontevedra; y tres masas templadas distribuidas entre las anteriores. Asociamos los valores de los pixels que forman estas áreas con unas zonas similares que se pueden observar en el mapa de temperaturas.

## Método de correlación

Mediante métodos de correlación hemos procesado ambas imágenes con el objetivo de encontrar zonas que podamos relacionar mediante relaciones lineales (Hord, 1986). Es el método más fácil de automatizar dado que todos los métodos anteriores requieren, por muy pequeña que sea, una pequeña interacción con el usuario. Un sistema experto de toma de decisiones podría suplir a áquel a la hora de proporcionar cierta información al algoritmo de clasificación. Esta cantidad de información podría reducirse considerablemente siempre y cuando la distancia temporal entre la toma de ambas imágenes sea lo suficientemente pequeña como para considerar como áreas de entrenamiento todo el área de la imagen. Como esto no siempre será así, el método de la correlación cruzada entre las dos imágenes nos permitirá tener en cuenta la deriva de las masas de agua a la que hemos hecho referencia anteriormente.

El procedimiento general consistirá en calcular la correlación cruzada existente entre todos los pixels situados dentro de una ventana que nosotros hemos hecho de 10x10 y otra ventana de 4x4 perteneciente a la otra banda de interés la cual se mueve dentro de la primera ventana. Los puntos con un mayor coeficiente de correlación se emplearán para obtener la tan buscada recta de calibración entre temperaturas y niveles digitales. Este método nos permitirá acceder también a importantes informaciones acerca de la dinámica de las corrientes en las franjas costeras de interés dado que al trazar vectores entre los puntos de los que hablábamos antes, obtendremos la distancia en pixels que ese determinado punto se ha desplazado respecto a su posición anterior.

## RESULTADOS

Para cada tipo de análisis hemos calculado las rectas de regresión con las medias de los conjuntos de todos los pixels clasificados. Estas rectas nos permitirán, como ya hemos especificado, relacionar los niveles digitales de la imagen TM con las temperaturas del mapa derivado de la imagen AVHRR y, entonces, tenemos la posibilidad de construir mapas SST de alta resolución sin más que aplicar la función lineal a los niveles digitales

(o niveles de gris) de la imagen correspondiente a la banda 6 del Landsat. La tabla siguiente nos muestra los resultados obtenidos:

|                       | $a_0$      | $a_1(\text{pendiente})$ | $r(\text{coef,corr})$ |
|-----------------------|------------|-------------------------|-----------------------|
| Método supervisado    | -8.7342392 | 0.2248968               | 0.99965               |
| Método no supervisado | -8.8349213 | 0.2257660               | 0.99549               |
| Método mixto          | -8.1477783 | 0.2198829               | 0.99589               |
| Banda a banda         | -9.7828743 | 0.2339363               | 0.99912               |
| Correlación           | -9.9780234 | 0.2372801               | 0.99849               |

Como podemos apreciar, el coeficiente de correlación para cada una de estas rectas es casi la unidad.

El rango de interés de la imagen del Landsat se sitúa entre los niveles digitales 114 y 120. Observamos que hay una relación muy estrecha entre la variación de la pendiente y la de la constante que la acompaña. Si comparamos la pendiente de estas rectas con la obtenida por Anuta *et al.* (1984) para el Landsat-4 observamos una excelente aproximación. Es una suposición bastante razonable suponer que los sensores TM del Landsat-4 y el del Landsat-5 presentan comportamientos similares en la región infrarroja y el segundo sigue funcionando hasta el día de hoy sin haber sufrido ninguna descalibración severa, por lo que podemos deducir que la pendiente de la recta que relaciona niveles digitales con temperaturas dentro del rango de interés, sean aquéllas de brillo o superficiales, sigue siendo la misma, esto es:  $a_1 = 0.2374109$ , un valor similar al de las pendientes halladas por nosotros.

Considerando que el sensor TM presenta una pendiente similar a la señalada anteriormente, extrapolando los resultados llegamos a una recta que será la que apliquemos sobre la imagen:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 0.2374109 \text{ ND} - 10.0770373 \quad (4)$$

Nuestro objetivo se ha visto cumplido. Dado un nivel de gris en la imagen de la banda térmica del Landsat, podemos establecer con un error estimado muy semejante al del sensor AVHRR el valor de la temperatura asociado con cada pixel de la imagen, sin más que aplicar una sencilla ecuación. Hemos de resaltar el hecho de que tanto la recta anterior como las halladas a través de los distintos clasificadores, presentan en el rango de interés una concordancia casi total, por lo que cualquiera de ellas aplicada sobre la imagen ofrecería los mismos resultados que esta última. De ahí que aunque la suposición que hicimos referente a la conservación de las características del sensor no fuese del todo acertada (y hasta el momento no tenemos por qué dudar de ella) los resultados finales serían los mismos. La figura 5 demuestra este hecho:

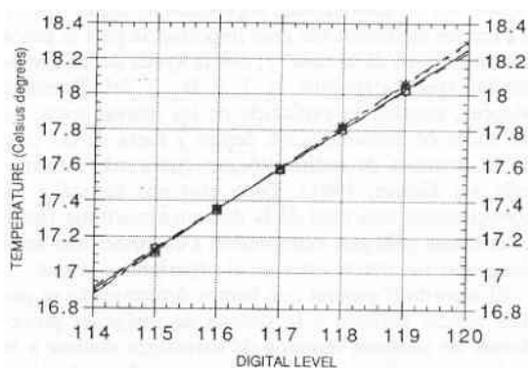


Figura 5. Comparación entre las rectas obtenidas

El resultado final del proceso se muestra en la figura 6, en la que las temperaturas están en grados centígrados:



Figura 6. Mapa SST de alta resolución correspondiente al 18 de Agosto de 1991

## SUMARIO

El estudio anterior representa el procedimiento general de extracción de mapas SST de alta resolución a partir del canal térmico de una imagen TM y de un mapa de temperaturas obtenido mediante el análisis multispectral de otra imagen AVHRR que abarque el área de la anterior y con una separación temporal mínima respecto a ella. Esto puede resultar de una ayuda inestimable a la hora de realizar una cartografía térmica de la costa, observando la evolución temporal de las masas de agua, detectando el fenómeno del "upwelling" o afloramiento superficial de aguas frías, y los frentes oceánicos (de gran importancia para la pesca y el marisqueo de la zona) y, con la ayuda de las demás bandas (particularmente la 1 y la 2) del Thematic

Mapper, estudiar la evolución de las mareas rojas, de los focos de contaminación dentro y fuera de las rias, de la dinámica de sedimentos, etc. (para más información ver Gower, 1981). Todo esto nos llevará a un conocimiento casi total de la dinámica marítima frente a las costas gallegas, extrapolable a cualquier otra zona del globo sin alteraciones en el algoritmo a seguir.

El algoritmo general que hemos determinado se podría aplicar también a la síntesis de imágenes procedentes de sensores remotos de naturaleza distinta a la de los que aquí empleamos. Supone combinar las ventajas de varios de estos sistemas y así superar las limitaciones de todos ellos por separado, proporcionando la impresión de trabajar con un "supersensor" que, en nuestro caso, se caracteriza por su alta resolución tanto espectral como espacial. Las limitaciones de un estudio de este tipo son claras, necesitamos dos imágenes en lugar de una sola. Pero hoy en día ésta no es una desventaja insalvable; por un coste relativamente módico (en función de los resultados) disponemos de imágenes de distintas fuentes a las que podemos aplicar el proceso anterior. La solución ideal sería el establecimiento de un plan de inversión de recursos que facilite el desarrollo de un sensor térmico multibanda de alta resolución espacial, de manera que permita, a semejanza del NOAA, la aplicación de algoritmos de relación entre medidas de varios canales centrados en el rango espectral del infrarrojo. Esto nos permitirá llevar a cabo precisos estudios multitemporales de una determinada zona, que puede redundar en la obtención de gran cantidad de información sobre eventos de alto interés. Pero a corto plazo esta solución parece no ser del todo viable. Mientras esto no sea posible, el método que aquí presentamos pretende servir de ayuda para la consecución de algo de lo que carecíamos hasta el momento, esto es, mapas precisos de temperaturas superficiales oceánicas de alta resolución espacial.

## BIBLIOGRAFIA

- ANUTA, P.E. et al. (1984). «Landsat-4 MSS and Thematic Mapper Data Quality and Information Content Analysis», IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-22, 3.
- GOWER, J.F.R. (1981). Oceanography from Space, Plenum Press.
- HORD, R.M. (1986). Remote Sensing: Methods and Applications, Wiley-Interscience.
- LAURITSON, LEVIN y NELSON, (1979). «Techniques for Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Series Satellite Radiometers for Direct Readout Users», NOAA-NESS Publication #107
- SWAIN, PHILIP H. & DA VIS, S.M., (1978) Remote Sensing: The Quantitative Approach, New York, McGraw Hill Book Company.