

Cartografía temática de embalses Aplicaciones limnológicas de las imágenes Landsat.

R. Peña Martínez y J.L. Ortíz Casas

Centro de Estudios Hidrográficos. (CEDEX/MOPU).
Pº Bajo de la Virgen del Puerto, 3, 28005 Madrid.

La presente comunicación es un ejemplo de aplicación de las imágenes de satélite a la teledetección de parámetros limnológicos en masas de agua continentales y se refiere al Proyecto Piloto de la Agencia Espacial Europea (ESA) dentro de su programa EARTHNET, concertado en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (MOPU) y el NPOC español integrado en el INTA. Ha cubierto el período de un año durante el que se han tomado datos directos en embalses y se han adquirido a un precio simbólico imágenes digitales del Thematic Mapper, del satélite Landsat 5.

El proyecto está soportado parcialmente por otro de investigación cooperativa, establecido dentro del marco de los acuerdos de cooperación científica y técnica entre España y los Estados Unidos. Por parte americana interviene el Bureau of Reclamation del Departamento del Interior y por parte española el Centro de Estudios Hidrográficos, que colabora con la Dirección General de Obras Hidráulicas.

El citado proyecto cooperativo tiene una duración prevista de cinco años y su área de aplicación comprende diversos embalses españoles, seleccionados por sus características limnológicas y/o su posición geográfica.

Los objetivos marcados en principio se pueden resumir en la obtención de ecuaciones de relación entre datos limnológicos de

los embalses y la información del Landsat 5, para poder extrapolar, o en su caso predecir, los valores de cada variable; en esta primera etapa para todas las masas de agua presentes en el cuarto de escena de cada fecha; en segundo lugar se trata de ampliar la validez de dichas relaciones a un alcance multitemporal. Por último, como objetivo más ambicioso a cubrir, establecer unas ecuaciones adaptadas a la tipología de los embalses y a las condiciones atmosféricas para poder generalizar las estimaciones a todas las masas de agua continentales del país estudiadas mediante imágenes de satélite.

En la tabla 1 se recogen los principales datos generales relativos a los embalses incluidos en este programa. En ella figuran masas de agua de muy diversas características, desde las más oligotróficas como pueden ser El Atazar, El Vado, Tranco de Beas o Negratín, hasta los embalses más eutróficos como Azután y Navalcán; morfometrías diferentes, desde Cazalegas (11 hm³ y 150 ha) hasta Negratín 546 hm³ de capacidad máxima y 2170 ha de superficie a embalse lleno.

Se estableció un plan de trabajos de campo para la obtención de muestras en el mayor número de embalses y en el menor período de dispersión temporal, en coincidencia con las pasadas operativas del satélite sobre las escenas o imágenes correspondientes.

El criterio de selección de parámetros a determinar ha sido apriorístico, en el sentido de recoger las consideraciones teóricas sobre aplicaciones de la teledetección y las experiencias anteriores de numerosos investigadores que han trabajado en esta línea de aplicación de las imágenes Landsat TM a estudios de calidad del agua.

Las variables que presentan mayor probabilidad de permitir mejores ajustes con valores de radiación teledados por los sensores del Landsat son las relacionadas con las características ópticas del agua, como la transparencia, la concentración de pigmentos fotosintéticos,

Tabla I Embalses incluidos en el estudio y fechas de muestreo/toma de imágenes

EMBALSE	TRIBUTARIO PRINCIPAL	CAPACIDAD hm ³	SUPERFICIE ha	IMAGEN		FECHAS DE IMAGENES DE LANDSAT-5
				Orbita	Fila Cuadrante	
El Atazar	Lozoya	468	1200	201	032	II
El Vado	Jarama	57	264	201	032	II
Alcorlo	Bornoba	180	595	201	032	II
Belcña	Sorbe	56	287	201	032	II
San Juan	Alberche	162	650	202	032	II
El Burguillo	Alberche	208	680	202	032	II
Navalcán	Guaderybas	34	746	202	032	IV
Cazalegas	Alberche	11	150	202	032	IV
Azután	Tajo	113	1250	202	032	IV
El Tranco de Beas	Guadalquivir	500	1800	200	032	II
Negratín	Guadiana Menor	546	2170	200	032	II
Navalcán	Guaderybas	34	746	202	032	IV
Cazalegas	Alberche	11	150	202	032	IV
Rosarito	Tiétar	85	1475	202	032	IV
Azután	Tajo	113	1250	202	032	IV

así como la temperatura, que debe relacionarse bien con las radiaciones infrarrojas.

De igual modo, teniendo en cuenta la penetración de las radiaciones medidas en las diferentes bandas, variable, pero que en algunos casos es muy somera (bandas 5 y 7) o incluso superficial (banda 6), se ha previsto que las determinaciones y muestreos sean de superficie únicamente.

Características del satélite.

Se ha seleccionado el satélite Landsat 5 para este tipo de aplicación por ser el vehículo que lleva a bordo un equipo radiométrico más adaptado a las necesidades de un estudio de estas características, especialmente el conjunto de sensores denominado "Thematic Mapper" (cartografiador temático) (TM).

Se desplaza sobre una órbita polar heliosíncrona, a una altitud de unos 705 km, tomando información útil cada 16 días en un mismo punto de la Tierra, en España alrededor de las 10:25 GMT (12:30 hora oficial de verano y 11:30 en invierno), en una franja de barrido de unos 185 Km, que se divide en fragmentos de similar longitud en sentido del meridiano para su mejor manejo y Distribución. La resolución espacial de las distintas bandas es de 30 m (1, 2, 3, 4, 5 y 7) y de 120 m (banda 6).

Para la comercialización de la información, debido al alto nivel de resolución del sensor, y por ello al campo, más de detalle, de sus aplicaciones, y dado el elevado precio de la misma, se dividen las escenas en "cuartos de escena" que constituyen los conjuntos de información que inicialmente se reciben y se manejan para cada fecha.

Las características de las bandas y sus principales aplicaciones teóricas, en cada caso se han de adaptar a la realidad, llegándose

a combinaciones de bandas. No obstante, en términos muy generales, se ven grandes posibilidades en las ventanas espectrales del TM, debido a su amplitud no muy grandes y por ello más concordantes con los intervalos de máxima absorción de algún parámetro, como la clorofila a (663-665 nm) en la banda 3 (630-690 nm). Sin embargo, siendo esto cierto, puede haber, en magnitud considerable, otros factores de respuesta parecida que enmascaran estos valores. Ello ocasiona a veces que en una ecuación final no aparezca la banda que teóricamente es la más idónea.

Situación de puntos de muestreo.

Se ha intentado obtener para cada fecha una cantidad del orden de 30 datos puntuales directos del agua. En algunos casos esto no ha sido posible por diversas razones, de tipo logístico o material, o bien a causa de la discordancia de grupos de ellos por la problemática especial de algún embalse como Azután, con características ópticas atípicas en sus aguas.

Los puntos de muestreo se han situado, en general, a más de 90 m (3 pixels) de la línea de orilla, lo que garantiza una probabilidad mínima de interferencia del terreno circundante con el dato del agua en ese punto.

Para su ubicación se han utilizado mapas (de escalas 1:50000, 1:10000 o 1:2000), o bien fotografías aéreas (escala 1:18000), con auxilio de ecosonda (sonar) para la localización de la profundidad máxima, punto que garantiza al mismo tiempo la necesaria separación de la orilla y la menor probabilidad de quedar fuera del agua en condiciones de nivel bajo, y con ello, su máxima utilidad a lo largo del programa.

Determinaciones de la concentración de clorofila a.

Este parámetro se ha adoptado como variable fundamental en este proyecto debido a que constituye en sí una característica de gran valor explicativo, asimismo es una medida indirecta de la biomasa algal presente en el agua, indicador de la producción primaria y básico para la definición del estado trófico del embalse, por medio de índice como el de Carlson por ejemplo.

Por ello se han efectuado las determinaciones siguiendo la metodología que se ha considerado más adecuada para proveer la mejor conservación, procediéndose, inmediatamente a la toma, al filtrado de las muestras y a su congelación con hielo seco (nieve carbónica).

Para un mejor conocimiento de la realidad y disponer de más cantidad de datos, y con ello de más elementos de juicio al interpretar los datos a procesar, se han llevado a cabo medidas de absorbancia en seis longitudes de onda, repitiéndose tres de ellas, una vez aciduladas las soluciones problema, para la transformación de clorofila en feofitina en una de las fórmulas aplicadas (Lorenzen). (Tabla 2).

Las densidades ópticas a 630, 645 y 663 nm son parámetros de las ecuaciones tricromáticas (Parsons & Strickland, SCOR/UNESCO), así como en la de Lorenzen. La densidad óptica a 665 nm interviene en la fórmula de Talling & Driver y también en el índice de pigmentos de Margalef (D430/D665). Todos los valores son corregidos por sustracción de la densidad óptica a 750 nm que representa el factor de turbidez de las muestras. El disolvente orgánico utilizado para la extracción de los pigmentos es una solución de acetona al 90%.

El hecho de obtener todos estos valores de la concentración de clorofila a (Tabla 3) permite tomar conciencia del orden de magnitud de los márgenes de error en que nos movemos, pues a los errores que las fórmulas encierran en sí hay que añadir los que inevitablemente se generan en la toma y manipulación de las muestras (filtrado, tritura-

Tabla 2
APLICACIONES LIMNOLÓGICAS DEL SATELITE LANDSAT-5 / TM
 Determinaciones CLOROFILA a
 Listado de datos basicos.

Emb.- P.Mues.	Fecha dd/ma/a	V. fil l	V. sol al	l P. luz cm	D430	D630	D645	D663	D665	D750	D663a	D665a	D750a
AZU-2	130985	0.5	15	4	1.355	0.154	0.225	0.658	0.667	0.01	0.457	0.481	0.013
AZU-3	130985	0.5	15	4	1.229	0.133	0.21	0.596	0.615	0.013	0.418	0.438	0.012
AZU-4	130985	0.5	15	4	1.377	0.16	0.235	0.681	0.677	0.014	0.473	0.498	0.014
AZU-5	130985	0.5	15	4	1.359	0.152	0.226	0.656	0.677	0.021	0.469	0.487	0.016
AZU-6	130985	0.5	15	4	1.294	0.14	0.207	0.642	0.655	0.012	0.434	0.464	.8E-02
AZU-7	130985	0.5	15	4	1.049	0.117	0.175	0.53	0.547	.4E-02	0.374	0.398	.3E-02
AZU-8	130985	0.5	15	4	0.681	0.079	0.111	0.328	0.336	.7E-02	0.222	0.239	.4E-02
AZU-9	130985	0.5	15	4	0.83	0.101	0.142	0.413	0.418	.6E-02	0.28	0.301	.5E-02
AZU-10	130985	0.5	15	4	0.845	0.096	0.147	0.402	0.41	.6E-02	0.294	0.305	0.013
NAV-1	130985	0.38	15	4	1.25	0.162	0.238	0.753	0.759	.5E-02	0.461	0.486	0.012
NAV-2	130985	0.5	15	4	1.252	0.161	0.233	0.742	0.758	.7E-02	0.458	0.48	0.016
NAV-3	130985	0.5	15	4	1.441	0.179	0.251	0.82	0.84	.7E-02	0.501	0.528	0.014
NAV-4	130985	0.5	15	4	1.443	0.178	0.26	0.85	0.858	0.013	0.519	0.541	0.015
NAV-5	130985	0.5	15	4	1.341	0.177	0.25	0.807	0.818	0.015	0.5	0.519	0.015
NAV-6	130985	0.5	15	4	1.049	0.139	0.201	0.644	0.665	0.016	0.403	0.416	0.026
NAV-7	130985	0.5	15	4	1.161	0.159	0.218	0.694	0.709	0.019	0.44	0.453	0.022
NAV-8	130985	0.5	15	4	1.108	0.155	0.216	0.669	0.679	0.025	0.433	0.451	0.023
NAV-9	130985	0.5	15	4	1.054	0.144	0.21	0.636	0.645	0.018	0.408	0.425	0.018
NAV-10	130985	0.5	15	4	0.973	0.123	0.181	0.586	0.589	0.011	0.38	0.394	0.016
CAZ-1	130985	0.62	15	4	0.629	0.08	0.123	0.293	0.293	0.019	0.193	0.2	0.019
CAZ-2	130985	0.75	15	4	0.786	0.093	0.147	0.353	0.354	0.02	0.25	0.251	0.013
CAZ-3	130985	0.575	15	4	0.758	0.077	0.126	0.326	0.332	.4E-02	0.235	0.234	.4E-02
CAZ-4	130985	0.59	15	4	0.731	0.08	0.135	0.338	0.335	0.01	0.234	0.233	.9E-02
CAZ-5	130985	0.625	15	4	0.829	0.095	0.16	0.379	0.382	0.015	0.263	0.26	0.018
CAZ-6	130985	0.63	15	4	0.786	0.1	0.158	0.373	0.371	0.014	0.249	0.254	0.011
CAZ-7	130985	0.42	15	4	0.582	0.073	0.118	0.273	0.27	0.017	0.182	0.182	0.015
CAZ-8	130985	0.69	15	4	0.718	0.088	0.143	0.35	0.34	0.012	0.225	0.227	0.01
CAZ-9	130985	0.69	15	4	0.518	0.056	0.101	0.237	0.244	.7E-02	0.158	0.159	0.011
CAZ-10	130985	0.7	15	4	0.712	0.088	0.143	0.335	0.336	0.011	0.231	0.229	0.017

Tabla 3

APLICACIONES LIMNOLÓGICAS DEL SATELITE LANDSAT-5 / TM
 Determinaciones CLOROFILA a
 Listado de resultados.

Emb.- P. Naves.	Fecha día/mes	Hora hh:mm	Temp. T °C	D. Secchi #	LO mg/m ³	RI mg/m ³	PS mg/m ³	SU mg/m ³	TD mg/m ³	IP -
AZU-2	130985	10.36	25	0.68	41	72.8	54.9	54	88.5	2
AZU-3	130985	10.23	24.9	0.92	38.2	66.8	50.3	49.4	62.8	2
AZU-4	130985	10.12	24.9	0.69	43.1	75.7	57.1	56.1	71.2	2
AZU-5	130985	10.08	24.9	0.62	40.1	72.9	54.9	54	68.4	2
AZU-6	130985	10	24.7	0.6	40.5	71.5	53.9	53.1	67	2
AZU-7	130985	10.29	24.9	0.84	32.1	60.3	45.4	44.7	56.6	1.9
AZU-8	130985	10.48	24.9	1.02	20.4	36.5	27.5	27.1	34.3	2
AZU-9	130985	10.45	24.9	1.02	25.1	45.6	34.4	33.8	42.9	2
AZU-10	130985	10.43	25	1.12	24.3	44.6	33.7	33	42.1	2.1
NAV-1	130985	12.46	24.6	0.38	79.9	110.2	83.1	81.8	103.4	1.6
NAV-2	130985	12.54	24.7	0.48	62.2	83.5	63	62	78.3	1.6
NAV-3	130985	13.03	24.9	0.52	69.2	92.8	69.9	68.9	86.8	1.7
NAV-4	130985	13.1	25	0.49	69.2	94.2	70.9	69.9	88.1	1.7
NAV-5	130985	13.13	24.9	0.46	64.8	89.5	67.4	66.4	83.7	1.6
NAV-6	130985	13.26	24.6	0.53	56.2	72.4	54.5	53.8	67.6	1.6
NAV-7	130985	13.4	24.8	0.49	56.2	76.9	57.9	57.1	71.9	1.6
NAV-8	130985	13.46	24.9	0.54	49	72.9	54.9	54.1	68.2	1.6
NAV-9	130985	13.52	24.9	0.44	47.7	69.7	52.5	51.7	65.4	1.6
NAV-10	130985	13.56	24.9	0.41	43.4	64.4	48.5	47.8	60.3	1.6
CAZ-1	130985	17.43	25.2	0.72	16.3	24.3	18.3	18	23	2.1
CAZ-2	130985	17.47	25	0.75	13.9	24.5	18.5	18.1	23.2	2.2
CAZ-3	130985	17.5	25.3	0.7	18.5	31.4	23.7	23.2	29.7	2.3
CAZ-4	130985	17.59	25.2	0.7	18.6	30.3	22.8	22.4	28.7	2.2
CAZ-5	130985	18	25	0.74	21.7	32.2	24.3	23.8	30.6	2.2
CAZ-6	130985	18.04	24.9	0.74	19.6	31	23.4	22.9	29.5	2.1
CAZ-7	130985	18.07	24.8	0.65	22.2	33	24.9	24.4	31.4	2.1
CAZ-8	130985	18.1	25	0.65	17.4	26	19.7	19.3	24.8	2.1
CAZ-9	130985	18.14	25	0.65	14	18.8	14.2	13.9	17.9	2.1
CAZ-10	130985	18.18	25	0.7	17.5	25.4	19.2	18.8	24.2	2.1

LO= Lorenzen(1967)

SU= SCOR/LUNESCU(1966)

RI=Richards(1952)

TD=Talling & Driver(1963)

PS=Parsons & Strickland(1963)

IP=Indice de pigmentos (Margalef)

ción, diluciones, etc.), que pueden afectar a la representatividad de las muestras. Todo ello ha de contribuir a la mejor interpretación y aplicación de los resultados obtenidos.

El índice de pigmentos citado constituye una indicación indirecta de la diversidad específica de la comunidad fitoplanctónica existente en cada biótomo, expresando en cierta medida el vigor de la misma, así como una dominancia oligoespecífica con el descenso del valor que alcanza. Suele ser bastante estable para cada masa de agua y esta circunstancia permite detectar posibles errores sistemáticos o de cálculo.

Visualización de imágenes y proceso digital.

Las imágenes se reciben en cintas magnéticas para ordenador (CCT) como datos numéricos correspondientes a los píxeles que integran un cuarto de escena y a cada una de las siete bandas espectrales del TM, enviadas desde el centro de recepción de imágenes de la Agencia Espacial Europea en Fucino/Frascati (Italia).

El tratamiento digital de las imágenes se ha llevado a cabo en las instalaciones del EARTHNET-NPOC, integrado en el INTA, con el que se concertó el Proyecto Piloto, con la muy eficaz colaboración de su personal especializado (José María de la Cruz y Rufino Barco, con una gran competencia y experiencia en este tipo de trabajos), así como el equipo de que dispone para visualización y proceso de imágenes digitales (PERICOLOR 1000, Numelec, con varias expansiones y una impresora multicolor de tecnología avanzada).

En un proceso inverso a la ubicación de los puntos en el embalse y sobre la cartografía o documentación existente, se han de identificar en la información digital aquellos píxeles que se correspondan con los puntos de toma de muestras.

En primer lugar se toma una porción de la escena o subescena que contenga cada embalse muestreado en esa fecha. La subescena mayor que admite el Pericolor es de 256x256 pixeles (unos 8x8 km) lo que obliga a tomar más de una subescena para abarcar la superficie de algunos embalses (Azután, Tranco de Beas, Negratín). Esta información es archivada en disco flexible para su proceso posterior. A continuación se procede a delimitar la masa de agua, separándola del terreno circundante mediante la determinación de un umbral de separación tierra-agua a partir del histograma de valores y de las secciones transversales necesarias. Todo ello se suele efectuar con los conjuntos de datos de subescenas correspondientes a la banda 4 TM.

Para localizar los puntos, al carecer de los medios adecuados (sistema y software) para la identificación automática mediante transformación matemática de coordenadas geográficas, hay que realizarlo directamente en pantalla, con auxilio de transparencias con la línea de orilla y los puntos situados, preparada a partir de la cartografía disponible y adaptadas a la escala aproximada con que aparece la imagen en la pantalla (1:30000 aproximadamente). Aunque pueda resultar subjetivo el procedimiento, viene a resultar eficaz y realista aplicándolo con una práctica objetivizada mediante criterios permanentes para corregir el paralaje visual.

Una vez identificados los puntos se obtienen las coordenadas parciales dentro de la subescena y las absolutas referidas al cuarto de escena por adición de las coordenadas del vértice origen de la subescena.

A partir de este momento se pueden obtener los valores de esos puntos en cada banda (Tabla 4). Dichos valores corresponden a radiancia (radiación) específica relativa, es decir la radiación reflejada por la superficie del embalse (por efecto de su reflectancia

Tabla 4

SAT.EMB.3/18

3 4
2 P1
9 8

Pto.	Banda	P1	2	3	4	5	6	7	8	9
NAV-1	B- 1	86	87	83	83	85	87	89	86	86
	B- 2	35	34	34	34	36	36	36	36	35
	B- 3	33	33	29	29	33	33	34	32	32
	B- 4	22	22	20	20	22	23	23	22	21
	B- 5	20	23	21	22	20	25	23	23	21
	B- 6	126	126	126	126	126	126	126	126	126
	B- 7	11	12	13	12	13	13	14	11	12
NAV-2	B- 1	86	85	85	84	83	86	86	86	83
	B- 2	34	34	34	33	34	34	34	35	34
	B- 3	31	31	29	29	29	29	30	31	29
	B- 4	20	19	18	19	18	20	20	20	19
	B- 5	17	18	18	17	17	19	19	16	16
	B- 6	125	125	127	127	127	125	125	125	125
	B- 7	10	10	11	10	9	9	10	12	7
NAV-3	B- 1	81	78	83	83	81	83	83	82	80
	B- 2	32	33	32	32	33	33	33	33	33
	B- 3	28	28	29	29	27	29	29	29	27
	B- 4	17	17	17	17	17	18	18	18	17
	B- 5	14	14	14	12	13	16	16	16	13
	B- 6	126	126	126	126	126	126	126	126	126
	B- 7	9	8	8	9	7	9	10	9	9
NAV-4	B- 1	83	81	81	79	83	82	85	85	89
	B- 2	34	33	32	30	30	32	34	34	35
	B- 3	29	29	29	27	27	29	30	30	34
	B- 4	21	21	21	19	19	20	22	22	24
	B- 5	22	26	22	18	17	21	23	25	28
	B- 6	129	135	135	129	129	129	129	129	135
	B- 7	10	13	10	10	6	10	14	12	14
NAV-5	B- 1	82	85	82	83	82	83	85	79	81
	B- 2	33	34	35	34	33	33	34	33	34
	B- 3	30	33	30	31	30	29	30	29	30
	B- 4	18	20	20	19	18	19	20	19	19
	B- 5	18	18	20	19	17	19	18	18	17
	B- 6	128	128	128	128	126	126	126	128	128
	B- 7	11	11	10	8	9	11	9	10	9
NAV-6	B- 1	85	79	83	81	81	82	83	81	83
	B- 2	35	35	34	32	32	34	34	33	34
	B- 3	29	27	29	29	27	28	29	29	29
	B- 4	18	18	18	17	17	18	18	18	18
	B- 5	15	16	15	16	17	17	17	16	16
	B- 6	126	126	126	126	126	126	126	126	126
	B- 7	9	7	7	9	7	10	9	10	8
NAV-7	B- 1	78	79	79	83	79	81	79	82	81
	B- 2	32	30	33	33	33	31	32	33	32
	B- 3	25	25	27	28	29	26	26	27	27
	B- 4	16	15	17	18	18	16	16	17	16
	B- 5	14	12	12	13	13	12	13	15	13
	B- 6	127	127	127	127	127	127	127	127	127
	B- 7	6	8	7	6	9	8	8	8	7

específica), referida a la superficie de resolución radiométrica, representada por un valor numérico entre 0 y 255 relativo en cada banda a su sensibilidad radiométrica, y que se corresponde mediante transformación matemática con $\text{mW/cm}^2 \cdot \text{eR}$, unidades de radiancia específica.

Los datos digitales de las bandas Landsat pueden ser utilizados directamente, sin embargo, para estudios referidos a una sola fecha, pero no para ecuaciones multitemporales, pues para las correcciones en función de las condiciones solares y atmosféricas se necesita operar con unidades físicas reales y comparables.

Las subescenas en cinta magnética y la información de campo y laboratorio, así como las coordenadas de los puntos, se enviaron a Denver para su tratamiento por la parte americana del proyecto en sus equipos especializados.

Correlaciones y regresiones estadísticas.

El objetivo es conseguir una serie de relaciones entre los valores de las bandas TM (variables explicativas o independientes) con los parámetros o variables medidos directamente (clorofila a, transparencia de Secchi, temperatura Celsius) o derivados de éstos como los índices de estado trófico de Carlson para clorofila y Secchi, que son las variables explicadas o dependientes.

A través del estudio de correlaciones múltiples y una regresión múltiple progresiva paso a paso, seleccionando las variables que presentan estimaciones más precisas, con mayor coeficiente de determinación (R^2) y menor error típico de la estima (ET), se llega a las relaciones que mejor se ajustan a la población para conseguir la predicción del parámetro considerado. (Tablas 5, 6 y 7).

Las figuras siguientes son ejemplos de ecuaciones para clorofila a, inverso de la transparencia y temperatura, respectivamente,

Tabla 5

Parámetro = Clorofila a

Fecha	Imagen	Embalses	Exclu.	Bandas	N	R ²	ET:(YM)	Rango(*)
090685	202/032/4	CAZ-NAV-AZU	AZU	174	20	.74	25.1	9.4-48.8
								$Clf-a = 200.612 - 3.016*TM1 + 2.953*TM7 + 2.662*TM4$
250685	202/032/4	NAV-AZU	AZU	14	10	.86	13.3	24.0-84.9
								$Clf-a = 371.291 - 6.815*TM1 + 13.153*TM4$
270685	200/034/2	TRB-NEG	---	175	20	.85	28.0	0.1-1.0
								$Clf-a = - 5.094 + 0.069*TM1 - 0.253*TM7 + 0.085*TM5$
040785	201/032/2	ATZ-VAD-ALC-BEL	---	63	39	.07	54.1	1.1-6.4
120885	202/032/4	CAZ-NAV-AZU	AZU	347	20	.81	25.7	19.7-98.5
								$Clf-a = 117.376 - 7.238*TM3 + 8.233*TM4 + 3.890*TM7$
060985	201/032/2	VAD-ATZ-ALC-BEL	---	567	39	.53	51.5	0.2-6.4
130985	202/032/4	NAV-CAZ-AZU	AZU	275	18	.96	11.4	14.2-69.9
								$Clf-a = 277.363 - 6.196*TM2 - 2.067*TM7 - 2.007*TM5$
151085	202/032/2	SJN-BUR	---	346	19	.80	30.1	6.1-41.6
								$Clf-a = 64.831 + 5.446*TM3 + 3.237*TM4 - 1.319*TM6$

(*) Clorofila a, mg/m³

Tabla 6

Parámetro = Transparencia disco de Secchi

Fecha	Imagen	Embalses	Exclu.	Bandas	N	R ²	ET(ZYM)	Rango(†)
090685	202/032/4	CAZ-NAV-AZU	AZU	127	20	.75	14.8	0.55-1.05
								$1/TDS = 5.261 - 0.097*TM1 + 0.102*TM2 + 0.049*TM7$
250685	202/032/4	NAV-AZU	AZU	5416	10	.87	1.1	0.59-0.64
								$1/TDS = - 1.567 + 0.018*TM5 - 0.036*TM4 + 0.015*TM1 + 0.018*TM6$
270685	200/034/2	TRB-NEG	---	7312	20	.79	10.6	1.64-3.85
								$1/TDS = 0.538 - 0.054*TM7 + 0.042*TM3 - 0.010*TM1 - 0.002*TM2$
040785	201/032/2	ATZ-VAD-ALC-BEL	---	1324	39	.49	25.0	2.43-7.14
120885	202/032/4	CAZ-NAV-AZU	AZU	12	20	.22	10.1	0.35-0.55
060985	201/032/2	VAD-ATZ-ALC-BEL	---	2635	39	.78	19.5	1.5-9.4
								$1/TDS = - 2.050 + 0.016*TM2 + 0.014*TM6 + 0.014*TM3 - 0.010*TM5$
130985	202/032/4	NAV-CAZ-AZU	AZU	26	19	.88	7.7	0.4-0.75
								$1/TDS = - 4.371 - 0.083*TM2 + 0.074*TM6$
151085	202/032/2	SJN-BUR	---	513	19	.73	18.3	1.6-4.4
								$1/TDS = 0.816 + 0.061*TM5 - 0.024*TM1 + 0.032*TM3$

(†) Transparencia, m

Tabla 7

Parámetro = Temperatura superficial

Fecha	Imagen	Escalares	Exclu.	Bandas	N	R ²	ET(XYM)	Rango(*)	R' (1)
090685	202/032/4	CAI-NAV-AZU	AZU	14326	20	.70	1.62	21.2-23.2	0.30
250685	202/032/4	NAV-AZU	AZU	5624	10	.99	0.3	24.4-26.1	0.30
270685	200/034/2	TRB-NEG	---	261	20	.84	1.42	24.2-27.3	0.24
040785	201/032/2	ATI-VAD-ALC-BEL	---	127	39	.76	2.61	22.0-26.0	0.14
120885	202/032/4	CAI-NAV-AZU	AZU	347	20	.67	2.46	23.0-26.3	0.42
060985	201/032/2	VAD-ATI-ALC-BEL	---	253	39	.78	1.36	21.5-23.9	0.34
130985	202/032/4	NAV-CAI-AZU	AZU	27	20	.51	0.53	24.6-25.3	0.03
151085	202/032/2	SJN-BUR	---	651	17	.58	0.96	19.0-20.0	0.56

(*) Temperatura, o C

(1) Coeficiente de correlacion simple con la banda TM6

mostrando listado de valores medidos en el embalse y estimados por aplicación de la ecuación, presentados asimismo en un gráfico comparativo de los pares de valores y la línea de identidad 1:1 como referencia.

Mapas temáticos.

La consecuencia inmediata de la aplicación de los coeficientes de la ecuación hallada sobre las bandas radiométricas, es decir la multiplicación de cada valor puntual por el mismo factor, así como las operaciones aritméticas de adición o sustracción de productos o de constantes, es la obtención de una imagen que es una función lineal de la distribución de la variable dependiente (afectada numéricamente por un factor operativo del sistema). Ella representa la distribución puntual de dicha variable.

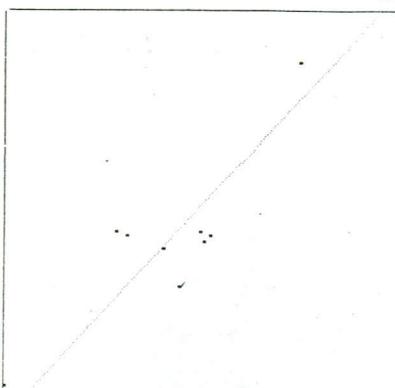
Por ello es preciso agrupar los valores en clases o rangos con el fin de que presenten una distribución zonal que resulte más útil para la interpretación de la imagen, evitando el aspecto poco definitorio de la imagen resultado bruta, debido al salpicado de valores dispersos en coloración aunque sean más o menos vecinos en magnitud, como se muestra en las imágenes en blanco y negro, reproducciones de los mapas temáticos correspondientes.

Por otra parte hay casos en que puede ser aconsejable un tratamiento posterior de la imagen resultado para suavizar visualmente el mapa lo que se consigue con un filtrado (convolución) más o menos intenso, que produce un efecto equivalente a un desenfoco de imagen, con lo que se produce una nueva agrupación de áreas afines. Además de grabar en disco las imágenes se pueden obtener fotografías de pantalla o imágenes en colores por impresora.

Así se llega a disponer de una cartografía temática que en este proyecto se está obteniendo, hasta ahora, a partir de unos

Fecha: 250685 Embalses: NAV
 $Clf-a = 371.291 - 0.815 * TH(1) + 13.152 * TH(4)$
 $R^2 = 0.855$ $R = 0.925$ $ET = 7.022$ [13.234 (y²)]
 $N = 10$ $y^* = 52.76$

Valores medidos y estimados

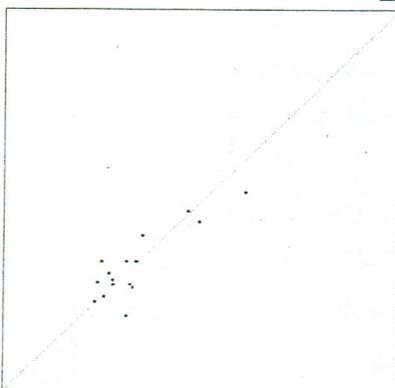


Ym= 59.3	Ye= 74.612
Ym= 48.6	Ye= 48.305
Ym= 51.1	Ye= 42.918
Ym= 84.9	Ye= 81.902
Ym= 55	Ye= 49.257
Ym= 24	Ye= 28.814
Ym= 55.9	Ye= 50.209
Ym= 54.4	Ye= 50.685
Ym= 43.1	Ye= 50.209
Ym= 41.3	Ye= 50.685

Ym (abscisas) = 24 - 85 Ye (ordenadas) = 28 - 52 (mg/m3)
 Línea de referencia 1/1

Fecha: 151085 Embalses: SJN-SUR
 $1/Secchi = 0.816 + 0.061 * TH(5) - 0.025 * TH(1) - 0.032 * TH(3)$
 $R^2 = 0.73$ $R = 0.854$ $ET = 0.059$ [18.254 (y²)]
 $N = 17$ $y^* = 0.322$

Valores medidos y estimados

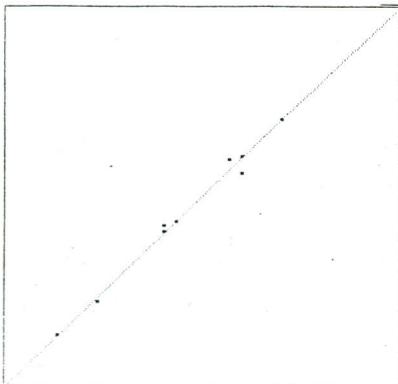


Ym= 0.46	Ye= 0.47
Ym= 0.247	Ye= 0.406
Ym= 0.271	Ye= 0.288
Ym= 0.265	Ye= 0.305
Ym= 0.271	Ye= 0.276
Ym= 0.249	Ye= 0.28
Ym= 0.235	Ye= 0.28
Ym= 0.229	Ye= 0.232
Ym= 0.606	Ye= 0.517
Ym= 0.333	Ye= 0.327
Ym= 0.207	Ye= 0.194
Ym= 0.222	Ye= 0.269
Ym= 0.217	Ye= 0.276
Ym= 0.487	Ye= 0.442
Ym= 0.207	Ye= 0.227
Ym= 0.243	Ye= 0.237
Ym= 0.25	Ye= 0.244

Ym (abscisas) = 0 - 1 Ye (ordenadas) = 0 - 1 (1/2)
 Línea de referencia 1/1

Fecha: 250685 Embalses: NAV
 $Temp. = -11.571 - 0.189 * TH(5) + 0.262 * TH(6) + 0.256 * TH(2) - 0.105 * TH(3)$
 $R^2 = 0.989$ $R = 0.994$ $ET = 0.077$ [0.32 (y²)]
 $N = 10$ $y^* = 25.29$

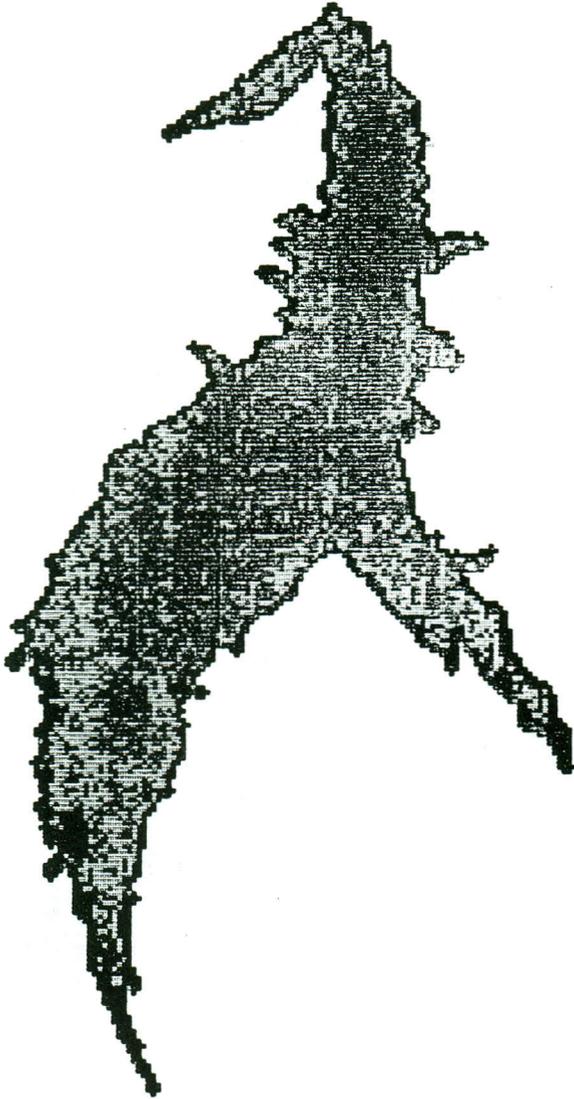
Valores medidos y estimados

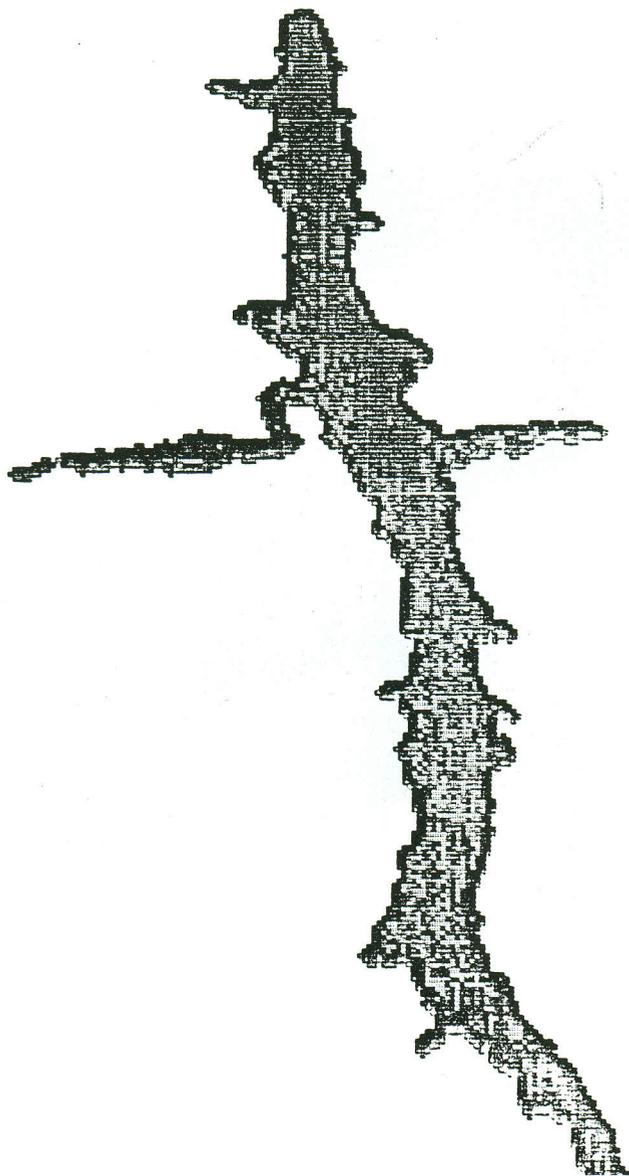


Ym= 24.4	Ye= 24.415
Ym= 24.7	Ye= 24.671
Ym= 25.3	Ye= 25.302
Ym= 24.7	Ye= 24.674
Ym= 25.2	Ye= 25.224
Ym= 25.7	Ye= 25.778
Ym= 25.8	Ye= 25.67
Ym= 26.1	Ye= 26.09
Ym= 25.8	Ye= 25.803
Ym= 25.2	Ye= 25.268

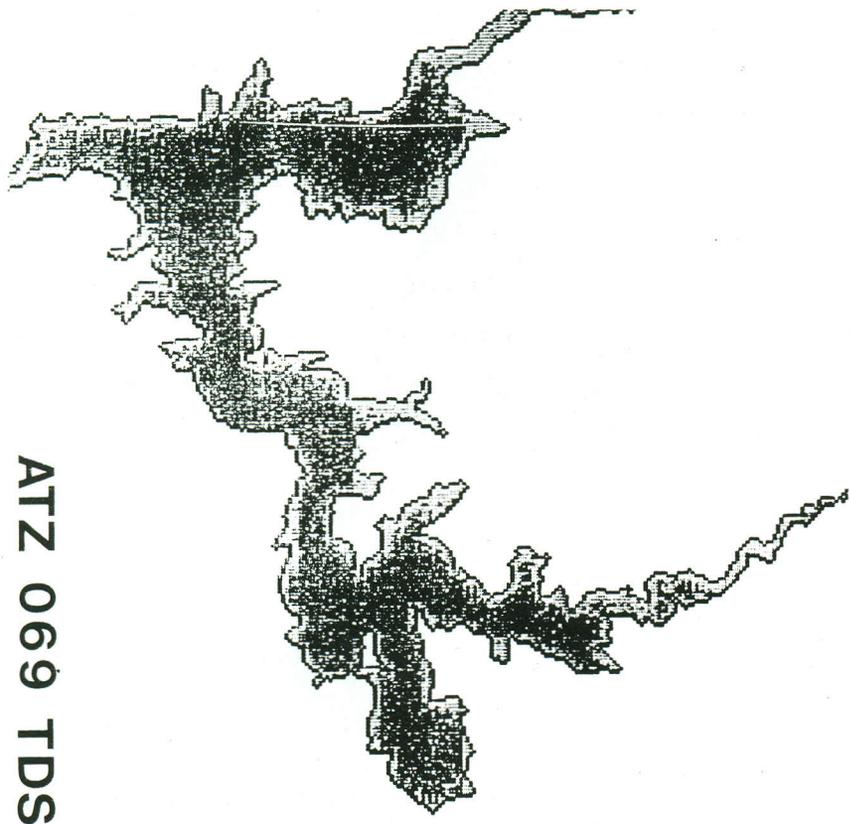
Ym (abscisas) = 24 - 27 Ye (ordenadas) = 24 - 27 (C)
 Línea de referencia 1/1

NAV 256 CLF





BUR 150 CLF



ATZ 069 TDS

muestreos coincidentes con la toma de datos por parte del satélite, pero que se pretende puedan obtenerse directamente de la información digital debidamente procesada, sin apenas datos directos de los embalses, una vez se obtengan ecuaciones válidas para fechas distintas (corregidas con los ángulos cenital y azimutal del sol, condiciones de humedad atmosférica, etc.) y con auxilio, en su caso de radiómetros de campo para tomas directas de valores similares a los de los sensores TM.

Todo ello puede conducir a disponer en su día de una herramienta útil para poder generalizar estudios de masas de agua continentales con fines tanto de diagnóstico cualitativo o cuantitativo de la evolución de ciertos parámetros, como para otras muchas aplicaciones que la teledetección vía satélite y el tratamiento digital de imágenes permiten ya o pueden permitir en el futuro.

BIBLIOGRAFIA

- American Society of Photogrammetry: "Manual of remote sensing". 2a. ed. Falls Church, A.S.P., 1983. 2 vol., 1209 p.
- Blackwell, R. y Roland, D.: "Trophic classification of selected Colorado lakes". E.P.A., 600/4-79-005, 1979
- Carlson, R.: "A trophic state index for lakes". Limnology and oceanography. Vol. 22, num. 2, 1977, pp. 361-369
- Carpenter, D.J. Y S.M.: "Modeling inland water quality using Landsat data". Remote sensing of environment. Vol. 13, 1983, pp.
- Draper, N. y Smith, H.: "Applied regression analysis". John Wiley & Sons, 1966
- Scarpace, F.L. et al.: "Landsat analysis of lake quality". Photogrammetric engineering and remote sensing. Vol. 45, num. 5, mayo 1979
- Verdin, J.P.: Limnological applications of multispectral remote sensing". U.S. Department of the interior. Bureau of Reclamation. REC - ERC - 84 2, 1984, 51 p.
- Verdin, J.P.: "Monitoring water quality conditions in a large western reservoir with Landsat imagery". Photogrammetric engineering and remote sensing. Vol. 51, num. 3, marzo 1985, pp. 343-353