

CLASIFICACIÓN DE LAGOS SOMEROS PAMPEANOS MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT TM

DUKATZ, F., R. FERRATI & G. CANZIANI

*Instituto Multidisciplinario sobre Ecosistemas y Desarrollo Sustentable, Facultad de Ciencias Exactas, UNCPBA. Campus Paraje Arroyo Seco, 7000 Tandil – Buenos Aires, Argentina
fdukatz@exa.unicen.edu.ar*

ABSTRACT

Under normal hydro-meteorological conditions, lagoons cover up to 2,000,000 of the pampas territory, distributed in more than 2,000 permanent lacunar bodies. They contribute significantly to the life quality of their inhabitants and they constitute a potential source of environmental, economic and recreational resources. Several studies in different lagoons in different temporal periods have been developed in the province of Buenos Aires. They responded in an optimum way to the original goals, but they are barely valid when looking for dynamic spatial and temporal patterns in the lagoons, involving the use of the support basin. The use of remote sensors has proved effective in collecting the information needed to evaluate the quality of water bodies, to allow the search of temporal and spatial patterns, and to link lagoon water quality data with the characteristics of land use. We propose a procedure for previously normalized satellite image analysis that will allow a classification of the lagoons based on their optical properties, conditioned by the contents of suspended inorganic solid matter and algal biomass. The results will be compared to samples in the field and spatially extrapolated. They will be used to propose alternative management methods jointly with some local decision makers.

Keywords: remote sensing, classification, lagoons, optic properties.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas acuáticos continentales que caracterizan la región pampeana argentina en general, y la provincia de Buenos Aires en particular, poseen una alta complejidad debido a la influencia de un gran número de factores. Si bien las lagunas pampeanas se caracterizan por su forma redondeada, con profundidades medias entre 1.5 y 3 m, las características hidrometeorológicas fluctuantes, la ubicación geográfica y en la cuenca, el tipo y uso de los suelos de la cuenca, las características físico-químicas y biológicas propias de cada cuerpo de

agua y el uso que se realiza de las lagunas, condicionan fuertemente y de manera no lineal el estado de las mismas. La clasificación de dichos cuerpos de agua corresponden a los lagos polimícticos (Ringuelet, 1962) La identificación de su estado trófico, la dinámica asociada al manejo de la cuenca y el tratamiento y restauración de estos ambientes conocidos como *shallow lakes* en la literatura internacional, ha sido tema de interés en distintas partes del mundo y ha generado modelos de análisis y control, especialmente en los Países Bajos y Dinamarca. (Blindow *et al.*, 1998; Faafeng & Marit, 1998; Jeppesen *et al.*, 1998,

Van den Berg *et al.*, 1998 y Van Donk, 1998).

Debido al gran número de lagunas presentes en la región pampeana y a su distribución espacial, el uso de sensores remotos y el tratamiento de imágenes satelitales se torna una herramienta adecuada al momento de realizar un estudio integrado de las mismas. Para realizar una clasificación de las lagunas en distintas fases hidrológicas y climáticas, se propone un método de categorización basado en las características ópticas de las lagunas captadas por los sensores TM y ETM de LandSat 5 y 7 respectivamente.

Las lagunas presentan características ópticas diferentes debido a su distinta turbidez. Esta propiedad se relaciona también con el tipo de trofismo de los cuerpos de agua y con los flujos biogeoquímicos (Ringuelet, 1962). Permite también diferenciar dos condiciones ambientales: lagunas claras, caracterizadas por vegetación acuática emergente y aguas transparentes y lagunas turbias, las cuales poseen abundante biomasa algal y alto contenido de materia inorgánica en suspensión.

El agua misma contribuye a la absorción y a la dispersión de la luz. En lagos someros, además, la presencia de partículas orgánicas e inorgánicas en suspensión y de sustancias disueltas influye sobre sus propiedades ópticas. Todos los materiales de color ejercen una absorción diferencial. Las sustancias orgánicas disueltas ('gilvin', 'gelbstoff') y suspendidas en el agua en lagos saprotróficos con sedimentos turbosos y abundantes compuestos húmicos, tienen aguas generalmente ácidas, de color castaño oscuro, con pobre actividad bacteriana (Neiff, 2004). En la mayoría de los lagos poco profundos, la luz es absorbida predominantemente por material particulado, como las células de fitoplancton, detritos y partículas de sedimento suspendidas. Dado que el material absorbente tiene color, la

absorción de luz no es la misma para todas las longitudes de onda, y algunos colores penetrarán más profundamente que otros. El color aparente de las aguas es una característica de gran valor para la diferenciación funcional de las aguas lólicas y lénticas a nivel regional. Sioli (1975) clasificó en «aguas blancas», «aguas negras» y «aguas claras» a los cuerpos y cursos de agua del Amazonas. Se puede encontrar mayor información sobre las propiedades ópticas del agua de las lagunas en Scheffer, 1997. El uso de sensores remotos permite establecer la superficie ocupada por cada tipo de aguas, su posición y variación en el tiempo.

La dispersión de las ondas electromagnéticas en lagos depende fuertemente del color de la luz (Kirk, 1994). Los materiales suspendidos y disueltos contribuyen diferencialmente a la dispersión y absorción. Las partículas suspendidas de arcilla, por ejemplo, causan mayor dispersión, mientras que las sustancias orgánicas disueltas solo causan absorción. El fitoplancton contribuye tanto a la dispersión como a la absorción. Los coeficientes totales de absorción y dispersión en una longitud de onda determinada se deben a la suma de las contribuciones individuales del agua, compuestos orgánicos, fitoplancton y sedimentos inorgánicos en suspensión. (Prieur & Sathyendranath, 1981).

En el diagrama del espectro electromagnético de la Figura 1 se observan las diferentes regiones del mismo que incluyen los rayos ultravioletas (anchos de banda entre 0.3 y 0.4 micrones), el rango visible permitido por la atmósfera terrestre (0.4 a 0.7 micrones), los infrarrojos cercanos (0.7 a 1.2 micrones), el infrarrojo reflejado por el sol (1.2 a 3.2 micrones), infrarrojos medios (3.2 a 15 micrones) e infrarrojo lejano (longitudes mayores a 15.0 micrones). El eje de la ordenada representa el porcentaje de transmisión y muestra el rango en el cual la atmósfera permite a la mayoría de los

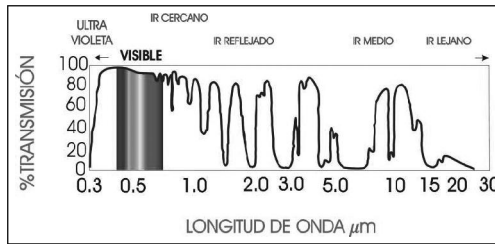


Figura 1. Porcentaje de transmisión de energía solar.

rayos solares alcanzar la tierra. El espectro visible refleja el dominio donde el 100% de la energía solar alcanza la superficie terrestre. En contraste, y debido al vapor de agua en la atmósfera, no hay transmisión de radiación solar en frecuencias entre 1.4 y 1.9 micrones.

Los sensores remotos de los satélites recolectan información en blanco y negro y obtienen varias imágenes –matrices– a la vez, en diferentes partes del espectro electromagnético. Cada matriz se corresponde con una longitud de onda determinada, normalmente entre 0.4 y 12.0 micrones. Cada una de estas matrices se denomina *banda* y el conjunto de matrices *imagen*.

Cada material absorbe y refleja la radiación solar con diferente intensidad para cada una de las longitudes de onda. La Figura 2 contiene tres curvas, cada una llamada espectro o

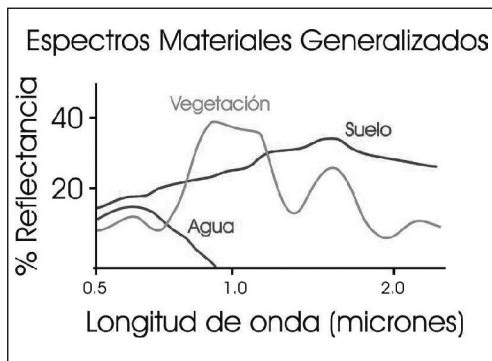


Figura 2. Firmas espectrales de diferentes materiales.

*firma espectral*², para tres ambientes. En cada espectro, el porcentaje de luz reflejada se muestra en función de la longitud de onda. En el caso de la vegetación, la mayor reflectancia se da alrededor de 1.0 micrón cuando es comparada con suelo desnudo. El contraste relativo se revierte a longitudes de onda mayores a 1.5 micrones. El agua es más brillante a bajas longitudes de onda, y no se observa reflectancia en longitudes de onda mayores a 0.9 micrones. El análisis de firmas espectrales permite explicar los contrastes relativos del agua, la vegetación y el suelo. En el recuadro se presenta un ejemplo de visualización.

En este estudio, los sensores TM y ETM+ de los satélites LandSat 5 y 7 respectivamente, obtienen un conjunto de 7 u 8 imágenes individuales en blanco y negro, entre 0.45 y 12.5 micrones. Todas las imágenes se obtienen exactamente al mismo tiempo, y cada una es una matriz o imagen digital donde se asigna un valor entre 0 (negro) y 255 (blanco) a cada píxel.

En el diagrama de la Figura 3 se muestran las cinco primeras y la séptima banda correspondientes a una imagen de la ciudad de Miramar, adquirida el 19 de Marzo de 2001.

A la izquierda se observa la imagen a color real y a la derecha cada una de las bandas. Se puede ver un color negro en el mar en las bandas 4 y 5, debido a que el mismo no refleja las longitudes de onda superiores a los 0.8

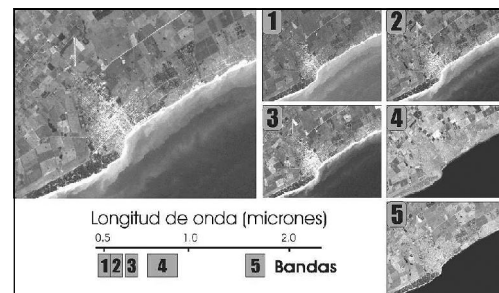


Figura 3. Ejemplo de las bandas LandSat TM de una imagen de la ciudad de Miramar.

micrones, lo cual coincide con la firma espectral del agua vista anteriormente. Por otro lado, abajo a la izquierda de la imagen, sobre la costa, se ve el «Vivero Dunicola F. Ameghino», un bosque de coníferas de 502 hectáreas. En este espacio, el valor más brillante se encuentra en la banda 4, aproximadamente a 0.9 micrones, valor pico en la firma espectral de la vegetación.

La clasificación de las lagunas propuesta en este trabajo se reduce a tres categorías: Clara, Marrón y Verde. Las lagunas claras son aquellas que tienen menor concentración de sedimentos en suspensión y sustancias disueltas. Las lagunas marrones son las que poseen alta concentración de sedimentos inorgánicos en suspensión (partículas de arcilla, por ejemplo) y las lagunas verdes aquellas que tienen alta concentración de fitoplancton. La pertenencia de cada una de las lagunas a una u otra clase puede presentar variaciones temporales debido a los *florecimientos* algales estacionales, razón por la cual se hace necesario determinar con mayor precisión los bordes de las clases.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron siete lagunas de la provincia de Buenos Aires:

Tabla 1.

Nombre	Latitud(Sur)	Fecha de imagen	Sensor
Carpincho	34°.5873	09/09/2004	LandSat 5 TM
La Segovia	37°.4979	13/10/1999	LandSat 7 ETM+
Gómez	34°.6273	09/09/2004	LandSat 5 TM
Bragado	35°.0853	09/09/2004	LandSat 5 TM
Las Mulitas	35°.4465	26/05/2003	LandSat 7 ETM+
La Barrancosa	37°.3297	17/12/2002	LandSat 7 ETM+
Wolfram	38°.2162	02/10/2004	LandSat 5 TM

Se trabajó con las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de las imágenes LandSat provistas por CONAE (detalle columna 4, Tabla 1). Las mismas fueron procesadas utilizando el software ERDAS Imagine® 8.5.

Las lagunas seleccionadas fueron previamente «enmascaradas» o separadas del terreno circundante para permitir la clasificación de los píxeles que forman el área limnética de las mismas. La técnica de enmascaramiento se realizó utilizando el Software ERDAS Imagine® en tres pasos. Primero se utilizó el módulo de Clasificación No Supervisada sobre la imagen de «wetness» obtenida mediante el método de Tasseled Cap³. En este caso, algunas áreas húmedas sembradas quedaron clasificadas como agua. En una segunda etapa, se clasificó la banda 4 de los sensores TM de LandSat, debido a que la reflexión de esta banda es menor ante la presencia de agua. Finalmente, se obtuvo la intersección de las dos imágenes, descartando así los errores de cada una de las clasificaciones utilizadas y obteniendo el enmascaramiento buscado. Cada una de las lagunas fue luego recortada mediante un Polígono para ser analizada individualmente.

Se observó en las lagunas un patrón de estacionalidad ocasionado por crecimiento algal diferencial a lo largo del año. Considerando el análisis que desde las imágenes se realizará de dichos cambios, se hace necesario quitar la influencia que sobre la radiación recibida tienen la distancia al sol y el ángulo de elevación solar correspondientes al día y hora de la adquisición de la imagen. Para ello se realizaron las correcciones necesarias utilizando los métodos de conversión a radiancia para productos LandSat 5 y 7 propuestos por USGS (US Geological Survey⁴). De esta manera, las imágenes se normalizaron y permitieron compararlas para su clasificación, sin distorsión del día solar.

Para obtener la firma espectral de cada laguna en un momento determinado, se analizaron estadísticamente los seis valores de los píxeles que conforman los cuerpos de agua –uno por cada una de las bandas (1, 2, 3, 4,

5 y 7). De cada banda, y para cada laguna, se determinaron los valores máximo y mínimo, media, mediana y desvío estándar. El coeficiente de variación, en general menor a 0.2, permite utilizar el valor medio como representativo de los datos obtenidos, quedando así determinados los valores promedio por banda para las firmas espectrales correspondientes.

RESULTADOS

El conjunto de lagunas seleccionado y sus correspondientes firmas espectrales, abarca las categorías clara, marrón y verde definidas previamente. Para visualizar la clasificación, se realizó la proyección de las componentes de cada una de las firmas espectrales realizando todas las combinaciones posibles de bandas en los ejes, resultando ser la proyección en las bandas 1 y 4 la más representativa (Figura 4). La banda 4 es usada habitualmente para el estudio de la vegetación y refleja la presencia de fitoplancton dentro de las lagunas. La banda 1 del espectro visible, determina el nivel de reflectancia del agua debido a las sustancias inorgánicas disueltas. Las lagunas claras tienen valores de reflectancia baja para ambas bandas, mientras que las verdes tienen un valor alto de reflectancia en la banda 4, que se condice con la firma espectral de la vegetación vista con anterioridad. Por otro lado,

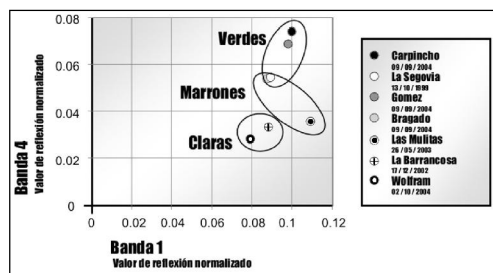


Figura 4. Clasificación de lagunas típicas de cada categoría.

las lagunas marrones tienen un mayor valor en ambas bandas que las claras, pero menor valor en la banda 4 que las verdes.

El método aplicado y el esquema resultante permiten tomar firmas espectrales de otras lagunas y clasificarlas en función de su ubicación dentro del plano, logrando extrapolar los resultados obtenidos a partir de las lagunas utilizadas y definir con mayor precisión las fronteras del ligamento.

La evolución temporal, especialmente la estacionalidad, que se observa en las lagunas se comprobó realizando una comparación temporal del estado de la laguna *La Barrancosa*, ubicada en el Partido de Benito Juárez. La Figura 5 muestra que la laguna se encuentra dentro de la categoría de las claras, aunque en algunos momentos se acerca a la reflectancias propias de la categoría de las lagunas marrones.

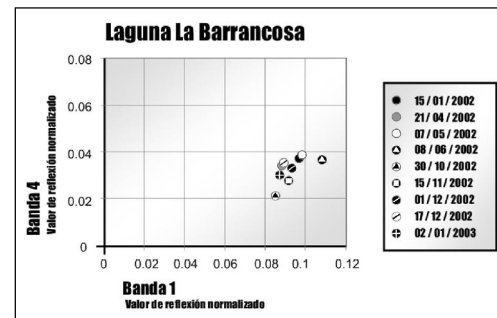


Figura 5. Seguimiento temporal de la laguna *La Barrancosa*.

CONCLUSIONES

Las propiedades ópticas de los objetos terrestres en general, y del agua en particular, son percibidas apropiadamente por los sensores ubicados en los satélites LandSat 5 y 7. La capacidad de los sensores de captar dichas propiedades y encontrar resultados en forma de firmas espectrales permitió, a través de este trabajo, reconocer los diferentes estados de las

lagunas y clasificarlas según el material orgánico e inorgánico, disuelto o en suspensión.

Dado que el material satelital se reduce a matrices numéricas y estas constituyen un insumo adecuado para modelos matemáticos, se abre la posibilidad de utilizar los resultados obtenidos para alimentar diferentes herramientas de conocimiento obteniendo resultados aceptables y precisos.

Contar con una herramienta potente para el estudio remoto de ecosistemas es imprescindible para plantear escenarios de manejo actuales y futuros. Es además imprescindible para calibrarla, la obtención de datos de campo que permitan aplicar clasificación supervisada y así definir adecuadamente los sucesivos estados que presentan estacionalmente (o de año en año) las lagunas, sobre la base de información objetiva y reproducible.

Las propiedades ópticas de las lagunas permiten diferenciar patrones espacio-temporales de variabilidad de las mismas.

Por otra parte, los resultados obtenidos por la teledetección dan una base para la diagramación de los trabajos de campo y, esta información, permite luego extrapolar espacialmente los datos obtenidos para los indicadores ambientales (transparencia, concentración y calidad de sólidos suspendidos, etc). Esta combinación de escalas de análisis posibilita contar con un modelo sinóptico, accesible por su costo de recursos económicos y de tiempo, para auxiliar la toma de decisiones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la CONAE por haber provisto gentilmente las imágenes satelitales necesarias para la realización del trabajo. Al Mg. Fabian Grosman y al M. V. Pablo Sanzano

por el aporte de conocimientos y la super-visión a través de las tareas de campo. Al Lic. Mauro Chaparro, a la Sra. Florencia Castets, al Sr Pablo Saavedra y al Sr. Manuel Vargas Russo por el apoyo incondicional.

Trabajo realizado con financiamiento de ANPCyT, Programa de Modernización Tecnológica, BID 1201/OC-AR, 13-502.

BIBLIOGRAFÍA

- Blindow, I.; A. Hargeby & G. Andersson.** 1998. Alternative Stable States in Shallow Lakes: What Causes a Shift? En: *The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes*. Ed. Springer-Verlag, New York, 353-360p.
- Faafeng, B. & M. Mjelde.** 1998. Clear and Turbid Water in Shallow Norwegian Lakes Related to Submerged Vegetation. En: *The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes*. Ed. Springer-Verlag, New York, 361-368p.
- Jeppesen, E.; M. Sfyndergaard; J. P. Jensen; E. Kanstrup & B. Petersen.** 1998. Macrophytes and Turbidity in Brackish Lakes with Special Emphasis on the Role of Top-Down Control. En: *The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes*. Ed. Springer-Verlag, New York, 369-377p.
- Kirk, J. T. O.** 1994. *Light and Photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Maidment D. R.** 1992. *Handbook of Hydrology*. Mc Graw Hill.
- Prieur, L. & S. Sathyendranath.** 1981. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter and other particular materials. *Limnology and Oceanography* 26: 671-689.
- Scheffer, M.** 1997. *Ecology of Shallow Lakes*. Chapman & Hall.
- Van den Berg, M.; H. Coops; M. L. Meijer; M. Scheffer & J. Simons.** 1998. Clear Water Associated with a Dense Chara Vegetation in the Shallow and Turbid Lake Veluwemeer, The Netherlands. En: *The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes*. Ed. Springer-Verlag, New York, 339-352p.

Van Donk, E. 1998. Switches Between Clear and Turbid Water States in a Biomnipulated Lake (1986-1996): The Role of Herbivory on Macrophytes. En: *The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes*. Ed. Springer-Verlag, New York, 290-297p.

NOTAS

¹ Gelbstoff: Material disuelto en agua de mar que es resistente a los ataques bacteriales. Su nombre viene del color amarillo que imparte al agua. También es conocido como sustancia amarilla o gilvin.

² La firma espectral de una superficie se define como la radiación reflejada en función de la longitud de onda.

³ El método Tasseled Cap es un procedimiento que realza, en diferentes bandas, determinadas características de las imágenes; como suelo descubierto (soil), vegetación (greenes) y agua (Wetness)
Ver: <http://landcover.usgs.gov/pdf/tasseled.pdf>

⁴ Ver: http://landcover.usgs.gov/pdf/image_preprocessing.pdf y <http://landsat.usgs.gov/documents/L5TMCAL2003.pdf>