Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM
Núm. 44, 2001, pp. 64-84

Propiedades limnéticas de sistemas dulceacuícolas pequeños en Acambay, México: correlación de datos de campo con imágenes de video en color

Jorge López Blanco*
Luis Zambrano González

Recibido: 14 de febrero de 2000
Aceptado en versión final: 22 de junio de 2000

Resumen. En este trabajo se presenta un método para evaluar las características ecológicas de cinco microembalses o pozas, en Acambay, Estado de México, que se basa en la obtención y el procesamiento, mediante un sistema de información geográfica (SIG), de las imágenes de esos cuerpos de agua, tomadas con técnicas de teledetección videográfica a una altura sobre el terreno de entre 100 y 700 m. El análisis se apoya en el establecimiento de las correlaciones estadísticas entre los valores promedio puntuales de las siguientes propiedades limnéticas, importantes para la dinámica de los microembalses: 1. Sólidos suspendidos; 2. Turbidez/Transparencia del agua (Disco de Secchi); 3. Cobertura de macrofitas totales (sumergidas, emergentes y libreflotadoras); 4. Cobertura de macrofitas de superficie (emergentes y libreflotadoras); 5. Abundancia de zooplancton (organismos por litro) y 6. Concentración de Clorofila-*a* en el agua. Todas ellas con respecto a los valores de radiancia promedio (niveles digitales) de cada una de las *bandas* RGB en que fueron separadas las imágenes originales. Los valores de las variables se obtuvieron a partir de las muestras tomadas en el interior de los microembalses. Los resultados mostraron niveles de correlación significativos entre las variables, la concentración de sólidos suspendidos y la turbidez, con respecto a los valores promedio por banda imagen (R=0.85 a 0.98). En cambio, las correlaciones establecidas con la abundancia de fitopolancton y zooplancton fueron poco significativas. Este método mostró ser útil para la descripción de las variables físicas de los microembalses, pero no lo fue para las variables biológicas.

Palabras clave: Pozas, variables limnéticas, teledetección videográfica, Acambay, México.

Limnological characterization of small freshwater systems in Acambay, Mexico: correlation between field data and color video images

Abstract. A method to evaluate the ecological characteristics of five small ponds in Acambay, Central Mexico is presented. The method was based on video remote sensing and image processing techniques in a Geographical Information System (GIS) environment, using a set of color video imagery obtained from 100 to 700 m (height above ground). Our analysis is based on establishing statistical correlations between the average values of the following limnological variables, which are considered as important for pond dynamics: 1. Suspended solids; 2. Water Turbidity/Transparency (Secchi Disk); 3. Total areas covered by macrophytes (emergent, submergent and free-floating); 4. Area covered by surface macrophytes (emergent and free-floating); 5. Zooplankton abundance (organisms per liter), and 6. Concentration of chlorophyll-*a* in water. All these variables were determined with respect to average reflectance values contained in video imagery (digital numbers DN per RGB *band*). Values were obtained from samples taken within the ponds. Results showed high correlation levels between DN values of image's bands and suspended solids concentration or water turbidity (R=0.85 to 0.98), but were low in relation to phytoplankton or zooplankton abundance. This method can be used to estimate some physical variables within ponds, but is not useful to determine biological variables.

Key words: Ponds, limnological variables, video remote sensing, Acambay, Mexico.

INTRODUCCIÓN

En estudios realizados en los últimos años se ha demostrado que los sistemas dulce-acuícolas pequeños, del tipo de los micro-embalses, bordos o pozas tienen una gran importancia ecológica y alta potencialidad de generación de recursos (Margalef, 1983:37; Hernández-Aviléz, *et al.*, 1995; Scheffer, 1997; Zambrano y Macías, 1999). Esa importancia es particularmente notable en aquellas zonas en que, a causa de las condiciones del relieve, no es posible que se presente, de manera natural, la acumulación o embalse del agua a partir de la lluvia y de los escurrimientos.

* Instituto de Geografía, UNAM, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D. F. E-mail: jblanco@servidor.unam.mx

De los 14 000 cuerpos de agua lénticos o sin movimiento que reportó Athié en 1987, localizados en la República Mexicana, los microembalses o bordos representaron el 67%, mismos que cubrían casi 189 000 ha, es decir, un poco menos de un 15% de la superficie de cuerpos de agua epicontinentales del país (Hernández *et al.*, 1995:291). Se encuentran más ampliamente distribuidos en la región centro-occidente de México, particularmente en los estados de México, Guanajuato, Michoacán y Jalisco (*op. cit.*). Esos sitios se consideran nichos ecológicos que permiten la dispersión y sobrevivencia de diferentes organismos dulceacuícolas como peces, reptiles y anfibios.

Conocer el estado actual de las condiciones ambientales, particularmente ecológicas, de los cuerpos de agua pequeños y artificiales (como los del tipo mencionado), cuya superficie oscila generalmente entre menos de una hectárea y menos de 10, y considerar el problema de su caracterización, es de importancia fundamental, ya que representa un aporte para el mejor manejo de los recursos naturales de nuestro país.

La evaluación de las propiedades limnéticas de esos microembalses cobra relevancia cuando se quiere evitar su azolvamiento acelerado y mejorar la calidad del agua, que además de ser utilizada para riego, es un recurso destinado al uso doméstico empleado por algunos pobladores locales, especialmente en aquellas regiones donde, por condiciones climáticas y de relieve, no es posible tener gran disponibilidad de agua durante el período de sequía, problema común en grandes extensiones de México.

Esos cuerpos de agua constituyen la fuente de abastecimiento para realizar los primeros riegos de las tierras que se dedican a la agricultura de temporal (en los meses de febrero y marzo), las cuales se cultivan cada año generalmente con maíz, en el centro de México. Asimismo, se emplean para la producción de carpas (*Cyprinus carpio* L.; Hernández *et al.*, 1995), como fuente de alimentación alternativa, temporal y de autoconsumo durante una parte del año.

Sin embargo, la importancia de evaluar esos microembalses no se debe limitar a una perspectiva agrícola y de salud. Desde un punto de vista de conservación biológica, dichos microembalses, a pesar de no ser de origen natural, son receptores de una gran diversidad de animales endémicos del país (Zambrano y Macías, 1999).

Los microembalses cuentan con características limnéticas similares a las de los lagos naturales someros; la profundidad no es mayor a 2.5 m y prácticamente no tienen estratificación en la temperatura o en nutrientes, por lo que no hay barreras físicas (Moss, 1998). La similitud entre las condiciones de estos sistemas y los cuerpos de agua naturales ocasiona que los organismos que viven en los segundos encuentren un sitio de dispersión y de refugio en los microembalses.

En los últimos años las fotografías aéreas y las imágenes de video se han usado ampliamente para evaluación de plantas acuáticas y conocimiento de las variables ambientales más conspicuas de los ecosistemas acuáticos, tanto oceánicos como continentales (Lefevre *et al.,* 1984; Schloesser *et al.*, 1988; Welch *et al.*, 1988; Nohara, 1991; Marshall y Lee, 1994; Pasqualini y Pergent, 1996; Malthus y George, 1997; Ramírez *et al.*, 1998; López *et al.,* 1998).

El procesamiento de imágenes digitales (PID) por medios automatizados ha sido usual para obtener grupos estadísticos (*clusters* o grupos espectrales) de valores de elementos individuales de imágenes (pixeles), que corresponden a variables ecológicas de áreas cubiertas con plantas acuáticas, a nivel local y general (particularmente de macrofitas; Lehmann y Lachavanne, 1997; Ferguson y Korfmacher, 1997; Norris *et al.*, 1997; Robbins, 1997; entre otros).

Esas imágenes pueden tener su origen tanto en tomas fotográficas aéreas en color natural y en falso-color (infrarrojas) como en video-imágenes en color, dentro de un ambiente de SIG. Ambos tipos de películas fotográficas, así

como de video, analógico y digital, son usados comúnmente para realizar diferentes evaluaciones de cobertura de plantas acuáticas y de otras variables (Harris *et al.*, 1996; López Blanco *et al.*, 1998).

El objetivo de este trabajo es conocer las medidas de correlación entre los valores individuales de las dimensiones digitales (radiancia) de un conjunto de pixeles dentro de las imágenes de video, con respecto a los valores obtenidos directamente de algunas variables limnéticas que caracterizan al ecosistema acuático: 1. Sólidos suspendidos totales; 2. Turbidez/Transparencia del agua (profundidad de penetración con el Disco de Secchi); 3. Cobertura de macrofitas totales (sumergidas, emergentes y libreflotadoras); 4. Cobertura de macrofitas de superficie (emergentes y libreflotadoras); 5. Abundancia de zooplancton (número de organismos por litro) y 6. Concentración de Clorofila-*a* en el agua. Las dimensiones de las correlaciones mencionadas permitirán establecer una medida de predicción confiable para que, de una manera indirecta, sea posible evaluar algunas de las características limnéticas de los microembalses establecidos en sitios con características ambientales y de uso del suelo, semejantes a las del área en estudio.

ÁREA EN ESTUDIO

El área en estudio se localiza al noroeste de la ciudad de Toluca. Los datos fueron colectados en cinco microembalses (en este caso con extensiones que oscilan entre 0.86 y 9.59 ha) poco profundos (menores de 2 m) en Acambay, en la zona del Alto Lerma, en el Cinturón Volcánico Transmexicano, a 2 550 msnm (19°57'N, 99°51'W; Figura 1). El área en estudio se caracteriza, en términos geomorfológicos, por ser una depresión tectónica alargada (en sentido este-oeste) y colmatada de sedimentos aluviales y lacustres. Dicha depresión está limitada al norte por la falla Acambay-Tixmadeje y al sur por la falla Venta de Bravo.

Acambay se localiza en una planicie lacustre-aluvial poco inclinada, en la porción alta de la cuenca del río Lerma, uno de los ríos más importantes para la biodiversidad dulceacuícola nacional (Zambrano y Macías, 1999). Algunos de los principales organismos acuáticos del área son: el ajolote (*Ambystoma mexicanum*), el acocil (*Cambarellus montezumae*) y algunos pequeños peces como el de la especie *Girardinichthys multiradiatus*.

Todos los microembalses considerados son artificiales, construidos para la irrigación inicial de las tierras para cultivos de maíz y trigo durante la parte final del período de secas (Figura 2A). El volumen de agua colectada en ellos depende de las cantidades de lluvia precipitada durante la época húmeda inmediatamente anterior a su embalse temporal.

En el área en estudio, la cantidad de lluvia total anual media precipitada es de 903.8 mm (García, 1988). Las pozas se llenan durante los meses de junio a octubre, por el aporte de lluvia directa y, sobre todo, por el escurrimiento superficial de los cauces que drenan hacia las pozas, durante las tormentas más intensas. La temperatura promedio anual es de 14.2° C (máxima 16.8° C, mínima 10.6° C, García, 1988).

En todas las pozas consideradas en el área en estudio se han introducido *juveniles* de carpas (*Cyprinus carpio*), en diferentes densidades, cuya talla inicial para el cultivo es de 3 a 5 cm de longitud total (Figura 2B). Las carpas crecen durante la época de lluvias hasta que son colectadas durante el vaciado de los bordos, entre los meses de marzo y abril de cada año. La cantidad de pesca en cada bordo es mínima y se destina al consumo doméstico, ya que difícilmente ese reducido volumen puede tener algún interés comercial. Además, la talla alcanzada en los meses mencionados es pequeña (cercana a los 15 cm). La actividad de la pesca se realiza a mano, o bien con sacos, aprovechándose lo poco profundo de las pozas. Otros recursos para pesquería son los ajolotes, los charales y los acociles, que son colectados y consumidos por las personas de menores recursos económicos.

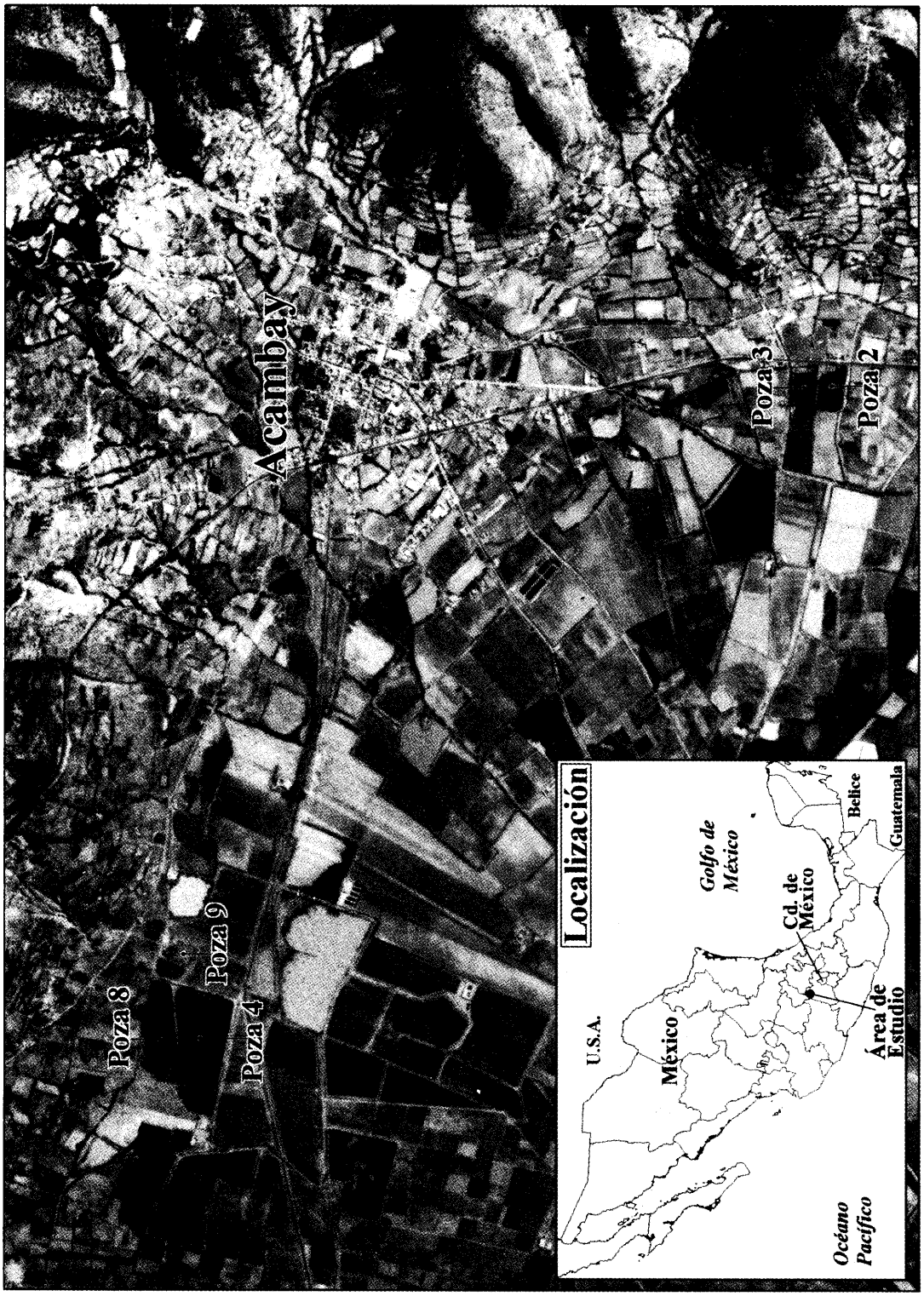

Figura 1. Localización del área en estudio en las inmediaciones de Acambay, Estado de México. Se muestra el emplazamiento de cada uno de los microembalses evaluados.

MATERIALES Y MÉTODO

Existen diferentes teorías que explican la dinámica de un cuerpo de agua dulce léntico, en las que se consideran como factores importantes la concentración de nutrientes en el agua, la turbidez, la cantidad de macrofitas enraizadas (Scheffer, 1997), las interacciones entre los diferentes organismos demersales como el plancton y los peces zooplanctívoros, y los efectos *cascada* (Carpenter *et al.*, 1985). Las interacciones de esos elementos son las que dan la pauta para generar distintas dinámicas en el ecosistema, desde su velocidad de azolvamiento hasta el nivel de diversidad biológica que existe. Es por ello relevante conocer las relaciones básicas entre la turbidez, la concentración de nutrientes y la cantidad de macrofitas en los microembalses mexicanos (Zambrano, 1999).

Sin embargo, debido a la cantidad de microembalses que existen en el país, las mediciones de las propiedades limnéticas en el campo resultan ser costosas en tiempo y recursos, lo que lleva a la necesidad de adaptar tecnologías de bajo costo, como el uso de cámaras de video convencionales y de los globos aerostáticos de manufactura doméstica que permitan el registro indirecto de las características mencionadas. Este es el planteamiento inicial para explicar la metodología utilizada.

El análisis se ha basado en el establecimiento de las correlaciones estadísticas entre los valores promedio puntuales de las variables limnéticas mencionadas en la introducción, con respecto a los valores de radiancia promedio (niveles digitales) en cada una de las *bandas* del visible (rojo-verde-azul o *RGB*) en las que se puede separar a las imágenes de video capturadas en formato digital de 24 *bits* por pixel (8 *bits* por *banda*).

Registro en campo de las variables limnéticas (ecológicas)

Los valores promedio puntuales de las variables ecológicas fueron obtenidos directamente de las muestras tomadas en el interior de los microembalses durante el trabajo de campo y de laboratorio. Dos de las cinco pozas del estudio (números 2 y 3) fueron registradas en febrero de 1995 y las tres restantes (4, 8 y 9), cuatro semanas después (marzo del mismo año; Figura 1).

La abundancia de fitoplancton, macrofitas y zooplancton depende de los sitios específicos evaluados, es por ello necesario dar una localización detallada de los elementos medidos directamente; es decir, tener un marco de referencia espacial preciso, tanto al interior de una poza, como entre un conjunto de ellas.

Para tener un conocimiento general del estado trófico de los microembalses evaluados, se colectaron muestras que permitieran definir algunas variables físicas, químicas y biológicas de los cinco microembalses (Figura 2C). Las tomas de las muestras se realizaron con algunos días de diferencia con respecto al registro de las imágenes de video.

Se obtuvieron algunos parámetros de elementos biológicos contenidos en el agua mediante la colecta de muestras compuestas por un litro del líquido, y la mezcla de tres submuestras. En todos los casos la hora de colecta fue cercana al mediodía. Los valores de la concentración de los sólidos suspendidos totales se obtuvieron por la técnica de ignición a 105° C (APHA, 1985).

Las variables físicas colectadas, relacionadas con la extensión, volumen y profundidad de cada poza fueron: 1. Área total de la poza; 2. Área cubierta de agua; 3. Relación entre área de agua y área total; 4. Profundidad media en metros y 5. Volumen aproximado en metros cúbicos (Cuadro 1).

La productividad primaria (abundancia de fitoplancton) en la columna de agua se determinó mediante la concentración de Clorofila-*a*, mediante el método fluorométrico (Lorenzen, 1966), colectando de 50 a 500 ml de agua, los cuales se filtraron formando una muestra compuesta de tres submuestras. Todas las tomas se hicieron a 10 cm de profundidad.

La abundancia de macrofitas se determinó mediante un índice de cobertura a lo largo de doce cuadrantes de 10 m de largo y utilizando en cada uno cinco cuadrantes de 40 cm de diámetro (Necchi *et al.* 1995). Las macrofitas se dividieron en: *a)* Enraizadas (sumergidas y emergentes) y *b)* Libreflotadoras. En general, los embalses presentan una configuración semirregular (cuadradas y rectangulares), por lo que, en cada uno de sus lados, se realizaron tres transectos perpendiculares a la orilla, y fueron tomados a igual distancia a lo largo de cada orilla (a 25, 50 y 75% de la distancia total de cada borde, considerando siempre el porcentaje desde el extremo inicial del microembalse).

La obtención de zooplancton se realizó mediante cinco colectas de la columna de agua total (la cual se encontró en los rangos de 0.5 a 1.9 m de profundidad para las colectas y de entre 2 y 6 litros de volumen), con la ayuda de un tubo de PVC de 7 cm de diámetro. El agua colectada se pasó a través de una malla de 200 µ y los organismos atrapados fueron preservados en alcohol. Se determinó el número de cladoceras y de copépodos (Cuadro 2).

Registro de las imágenes de video

Las imágenes de los microembalses mencionados se registraron en los meses de febrero y marzo de 1995, previas al uso del agua para riego, casi simultáneamente a las fechas de los muestreos realizados durante el trabajo de campo.

Las imágenes fueron obtenidas con una cámara convencional de video, sujeta a un globo aerostático de fabricación doméstica, construido con bolsas de plástico infladas con helio y controlado manualmente desde el terreno mediante dos tirantes de hilo plástico (Figura 2D). La cámara de video empleada en este estudio es una convencional del tipo *Sony Handycam CCD-TR55*, con límites mínimo y máximo de distancia focal entre 11 y 66 mm respectivamente, con longitudes de onda de sensibilidad a la luz entre 0.4 y 0.7 µm y con un formato de cinta de 8 mm. El dispositivo de registro de las imágenes es el CCD (*Charge Coupled Device* o dispositivo de transferencia de carga). Este videosensor está formado por una gran cantidad de elementos fotodetectores activos (270 000 para este caso), instalados en un microcircuito de media pulgada de longitud diagonal.

Cuadro 1. Características dimensionales de las pozas analizadas en extensión y volumen

Poza Núm.	Área total (ha)	Área con agua (ha)	Área agua/ Área total (%)	Profundidad media (m; desviación estándar)	Volumen aproximado (m^3)
2	2.36	1.68	71.3	0.73 (0.18)	12 219.3
3	1.32	1.13	86.3	*1.02* (0.45)	11 624.8
4	*9.59*	*5.00*	52.1	0.53 (0.20)	26 360.0
8	5.42	4.04	74.6	0.72 (0.37)	*29 044.3*
9	0.86	0.76	*87.9*	0.49 (0.18)	3 691.7

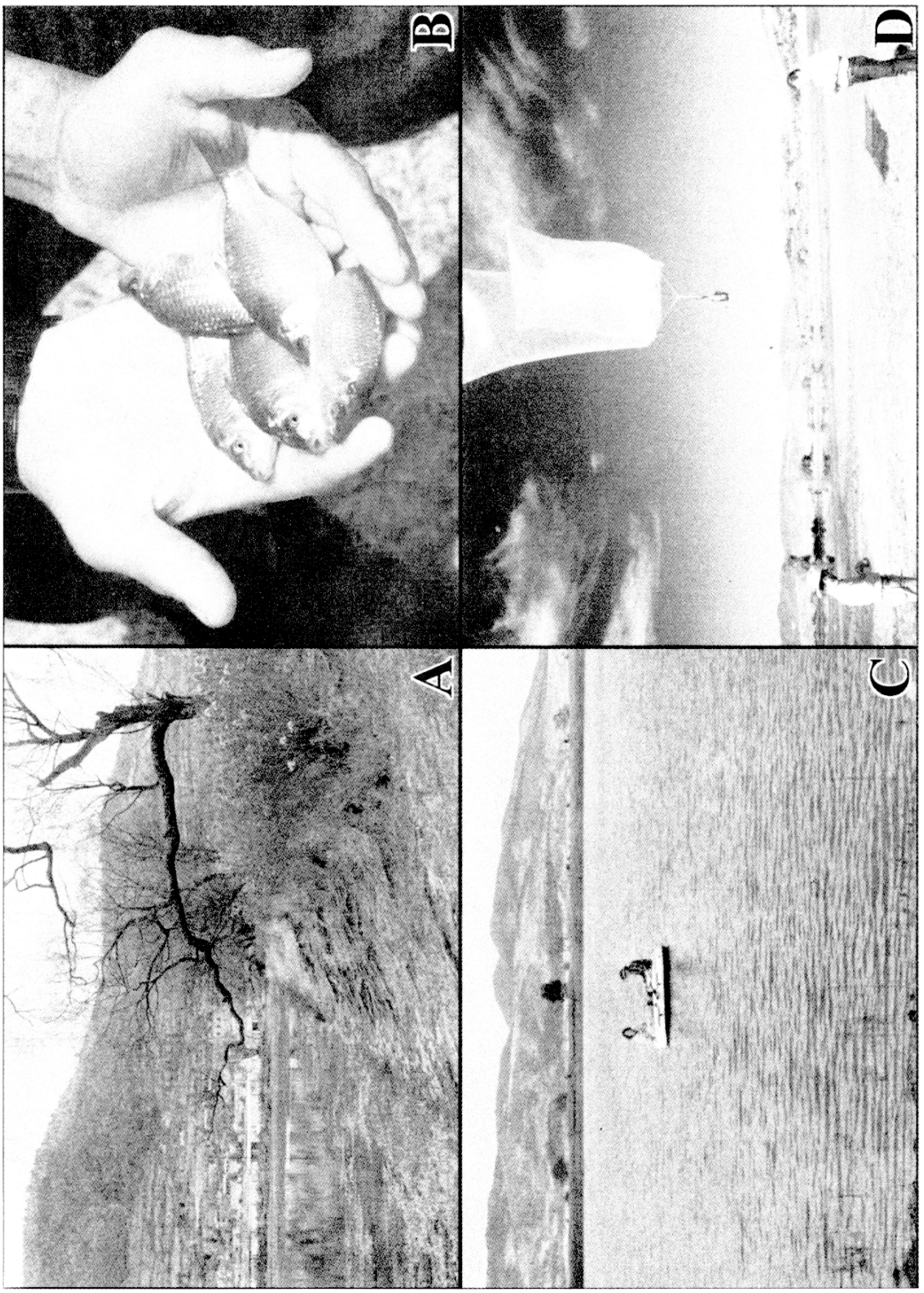

Figura 2. Método empleado. 2A. Vista de uno de los microembalses evaluados, nótese el bordo contenedor y la vegetación acuática. 2B. Carpas colectadas en una de las pozas. 2C. Toma de muestras y datos. 2D. El globo de fabricación doméstica y la cámara utilizada para el registro de las imágenes de video.

Cuadro 2. Valores de las variables limnéticas medidas en campo y de las muestras procesadas en laboratorio en las cinco pozas evaluadas

Poza Núm.	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Profundidad Disco Secchi (m)	Macrofitas totales (%)	Macrofitas superficie (%)	Zoo-plancton (Org/L)	Clorofila-*a* (mg/m^3)
2	2.33	0.73	97.78	79.43	19.14	10.08
3	32.33	0.25	12.06	1.67	16.60	3.62
4	7.00	0.54	93.02	57.53	23.30	1.77'
8	64.00	0.29	29.78	29.45	6.80	17.48
9	188.00	0.05	11.05	4.73	16.30	0.70

Las imágenes elegidas se procesaron dentro del Sistema de Información Geográfica *ILWIS* (*Integrated Land and Water Information System*, versiones 1.41 MS-DOS y versión 2.1 para Windows; ITC, 1993, 1994, 1997), mediante la aplicación de funciones convencionales de procesamiento digital de imágenes (Lillesand y Keufer, 1994).

Con el globo utilizado, el área de cubrimiento de terreno abarcó, dependiendo de la altura de vuelo y considerando que se tenía un lente de baja cobertura (con 11 mm de distancia focal), desde 0.17 ha, volando a 100 m de altura, hasta un máximo de 8.3 ha, volando a 700 m. Previo a la toma de las imágenes, se realizó trabajo de campo topográfico, a fin de establecer y medir puntos de control en el terreno, con lo que se obtuvo un sistema convencional de coordenadas ortogonales para georreferir las imágenes.

Las imágenes seleccionadas fueron digitizadas usando una tarjeta de captura digital de video del tipo *Video Reveal TV 500*, con una resolución espacial de 320 columnas x 240 renglones de pixeles (con un formato de archivo TIFF de 24 bits) en *color natural*. Las razones que explican el por qué del uso de esa resolución espacial se señalan ampliamente en López Blanco y Arias Chalico (1998).

Con el SIG empleado se aplicaron diversas funciones para el mejoramiento de las imágenes de video. Por ejemplo, en la agrupación con colores específicos a intervalos elegidos de valores de *pixeles*, filtros de realce *de bordes* y distribución de las frecuencias de los valores en el histograma para mejorar el contraste en las imágenes. Se empleó el procedimiento de digitización de rasgos en pantalla, con el fin de delimitar el borde de las áreas que mostraban características claras de cobertura de macrofitas acuáticas o bien, áreas con ciertas características de *verdor*, turbidez, etc. Igualmente, se hizo una evaluación usando la función *density slicing* del SIG para identificar y delimitar las áreas de mayor concentración de sedimentos suspendidos y áreas con mayor transparencia.

Por su tamaño y bajo contraste con el entorno, algunas marcas de control topográfico que se señalaron en el terreno, en ciertos casos no se apreciaron claramente en las imágenes ya capturadas. Por tanto, se emplearon técnicas para georreferir a las imágenes de video que presentaban ese problema y formar así mosaicos digitales de varias imágenes para tener el cubrimiento total de cada una de las pozas. Por ser más pequeñas que el resto, las superficies de las pozas 2, 3 y 9 se registraron completas en una sola imagen de video, respectivamente (Figuras 3 y 4).

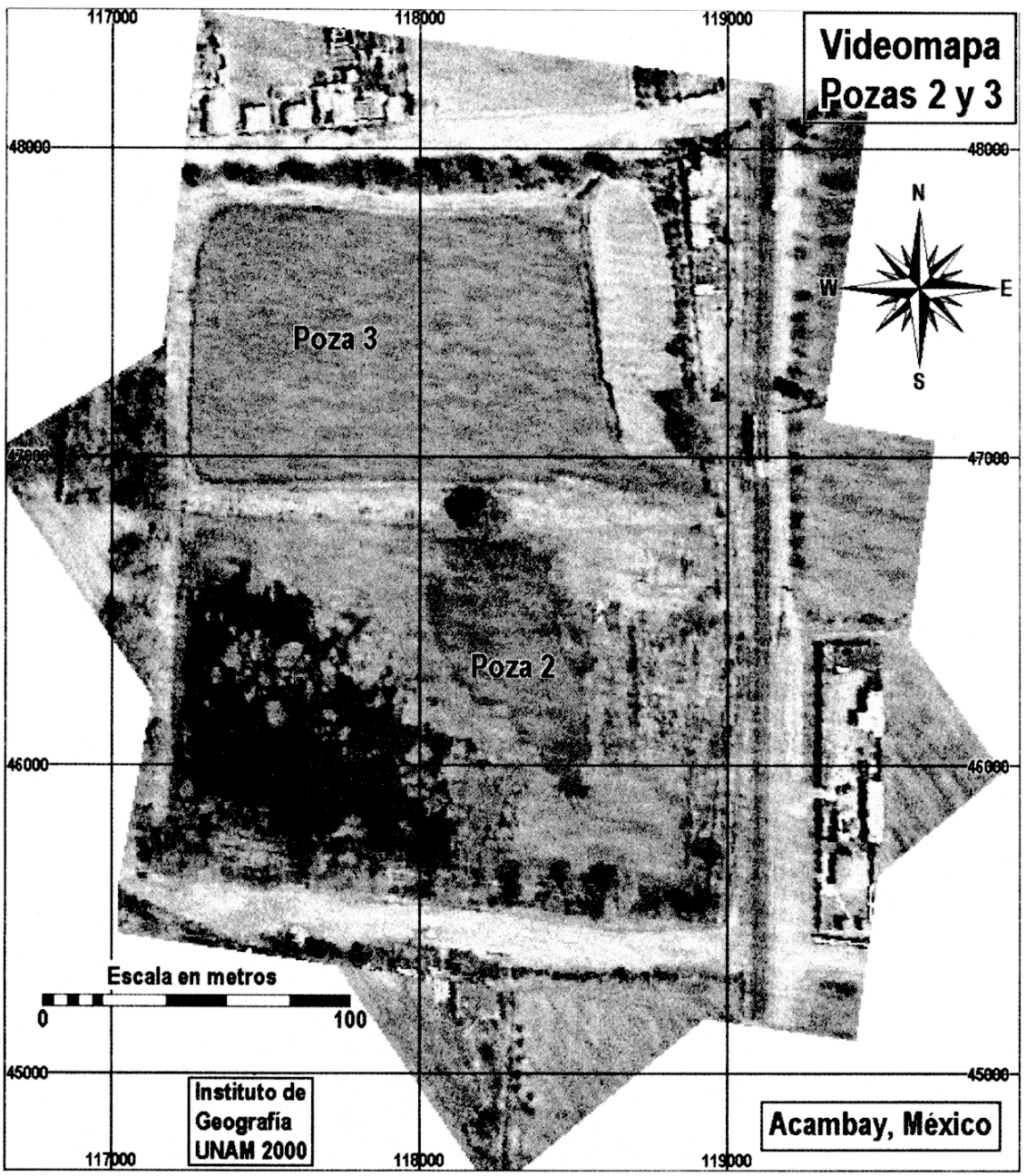

Figura 3. Videomapa de las pozas 2 y 3, construido a partir de un mosaico digital de tres imágenes. Nota: para obtener los valores completos (en m) de las coordenadas UTM, dividir entre diez los valores de la cuadrícula y sumar 400 000 a las X y 2 200 000 a las Y.

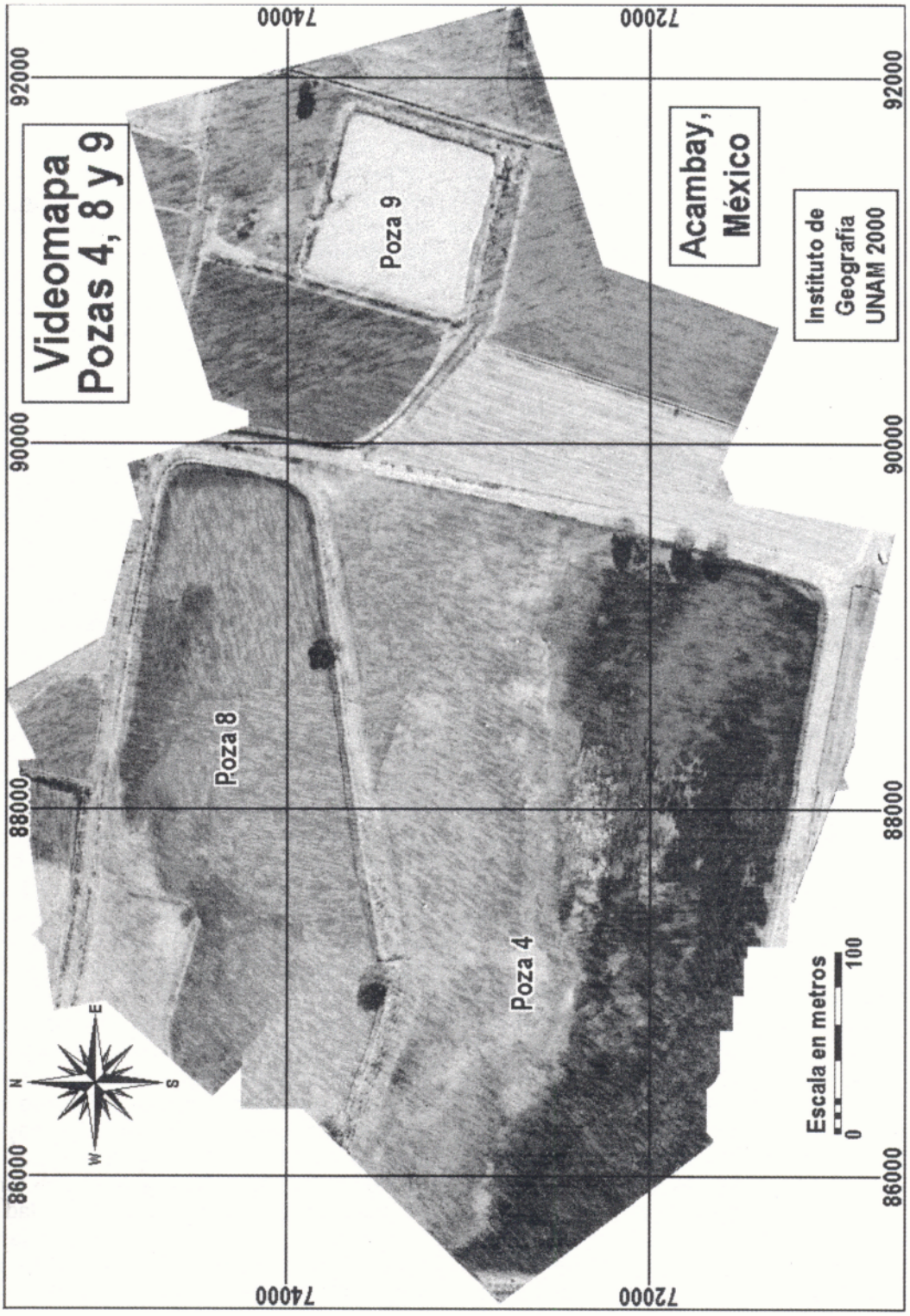

Figura 4. Videomapa de las pozas 4, 8 y 9, construido a partir de un mosaico digital de 16 imágenes (véase la nota del pie de la Figura 3).

Se obtuvo una versión digital del fotomapa a escala 1:20 000, producido por el INEGI en 1983, mediante su registro con un escáner convencional usando una resolución de 600 pixeles por pulgada (dpi). La cuadrícula de coordenadas UTM en ese fotomapa está marcada cada 2 000 m, referencias con las que fue posible georreferir y corregir geométricamente el fotomapa y tener así las coordenadas UTM con una resolución espacial adecuada (tamaño de pixel de 0.85 m). Esto se hizo con el fin de asignar a cada videoimagen un sistema de coordenadas UTM común, para que posteriormente fuese posible integrarlas en un mosaico digital y además poder realizar algunas mediciones de los rasgos más notables de las pozas, principalmente en sus contornos y en sus discontinuidades.

Procesamiento de las imágenes y sus correlaciones con las variables limnéticas

Se eligieron 19 imágenes para ser procesadas: tres para elaborar el mosaico digital de las pozas 2 y 3 (Figuras 1 y 3), y 16 para el mosaico digital de las pozas 4, 8 y 9 (Figuras 1 y 4).

Debido a que algunas de ellas son de mayores dimensiones (Pozas 4 y 8) y a que la altura conseguida cuando se registraron fue insuficiente para cubrir con una sola imagen la superficie total de cada poza, fue necesario buscar un procedimiento que permitiera integrar digitalmente a un conjunto de imágenes de video individuales (procedimiento conocido como *mosaiqueado*; López y Arias, 1998).

Para realizar el procedimiento de corrección geométrica de las videoimágenes, se empleó el modelo de corrección *proyectiva*, recomendable cuando se quieren evitar las deformaciones ocasionadas por el efecto de la proyección central (intrínseco a las fotografías aéreas e imágenes de video) al registrar información fotográfica de áreas con terrenos sensiblemente planos (ITC, 1997).

Es necesario realizar este procedimiento para poder generar un mosaico de videoimágenes, orientadas hacia el norte y con una dimensión única de pixel, de 60 cm para el mosaico de las pozas 4, 8 y 9 y de 68 cm para el mosaico de las pozas 2 y 3. Esto permitió cubrir toda el área en estudio con sólo dos videomapas (Figuras 3 y 4).

Los valores o parámetros que caracterizan a cada una de las pozas se obtuvieron tanto mediante el trabajo de campo (profundidad media), y el empleo de las imágenes de video procesadas (superficie total y superficie con agua), así como a través de la combinación de las dos fuentes de información anteriores (por ejemplo para estimar el volumen de agua por poza).

De las 19 imágenes seleccionadas, se eligieron dos para caracterizar la dimensión digital de los pixeles de las cinco pozas del estudio. En las Figuras 5A y 5B se muestran las áreas cuyos valores de las tres bandas correspondientes (azul-verde-rojo, AVR) se emplearon para establecer los valores promedio de radiancia (columnas 2 y 3 del Cuadro 3). En la columna 2 de la misma tabla se señala la cantidad de pixeles que fueron utilizados para establecer esos valores promedio.

Al observar las áreas *muestreadas* por poza de las Figuras 5A y 5B, se comprueba con claridad que existen diferencias muy marcadas entre sus características de coloración y tonalidad, asimismo, se puede apreciar y demostrar que las áreas empleadas para obtener los valores medios de radiancia por pixel son lo suficientemente homogéneas para ser consideradas como representativas de las superficies con agua de cada una de ellas.

El que se hayan utilizado sólo dos videoimágenes para realizar el análisis estadístico de las dimensiones digitales de los pixeles de las pozas, se debe a que es necesario que la información analizada para cada una haya sido registrada en las mismas condiciones de hora, cantidad de luz, iluminación del terreno, inclinación de los rayos de luz, densidad de la bruma, etc., para poder ser válidas las medidas de comparación entre ellas. Otra razón para utilizar esas dos imágenes, y no una sola, es que existe una separación considerable entre las pozas 2 y 3 con respecto a las pozas

4, 8 y 9, la cual no podía ser cubierta por una sola imagen de video (distancia de separación entre grupos de pozas en la Figura 1).

Para establecer el grado de acercamiento y dependencia de los valores de dimensión digital de los pixeles de las tres bandas AVR de cada imagen de video, con respecto a los valores de las seis variables limnéticas que pueden ser consideradas como representativas de las condiciones ecológicas de un cuerpo de agua y que hipotéticamente se esperaba que presentaran diferencias visibles en las videoimágenes, se realizó un análisis de correlación lineal simple.

Como variable dependiente (eje Y), se consideró a los valores promedio de dimensión o nivel digital de los pixeles por banda; como variable independiente (eje X) se consideró a los valores promedio de las variables limnéticas colectadas en el terreno (Figura 6). Se empleó el programa *Microcal Origin Versión 3.5* (Microcal Software Inc., 1994) para el procesamiento estadístico y para su posterior representación gráfica de las correlaciones de las seis variables examinadas en el estudio.

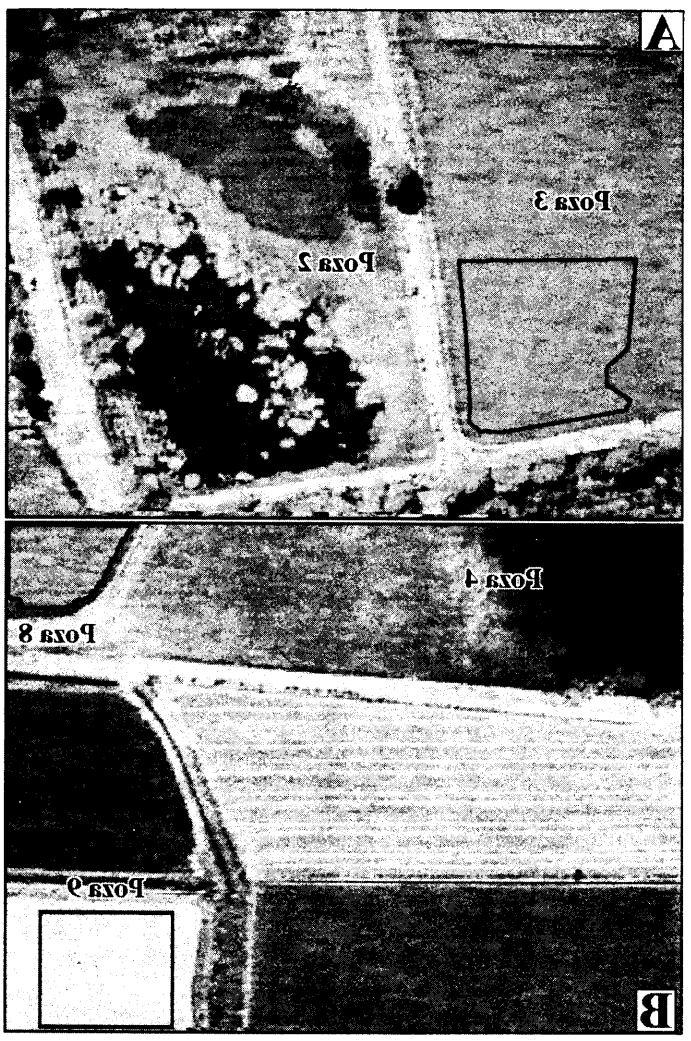

Figura 5. Áreas de "*muestreo*" de valores pixel dentro de las pozas, para determinar las estadísticas descriptivas de la radiancia promedio por banda. 5A. Para las pozas 2 y 3. 5B. Para las pozas 4, 8 y 9.

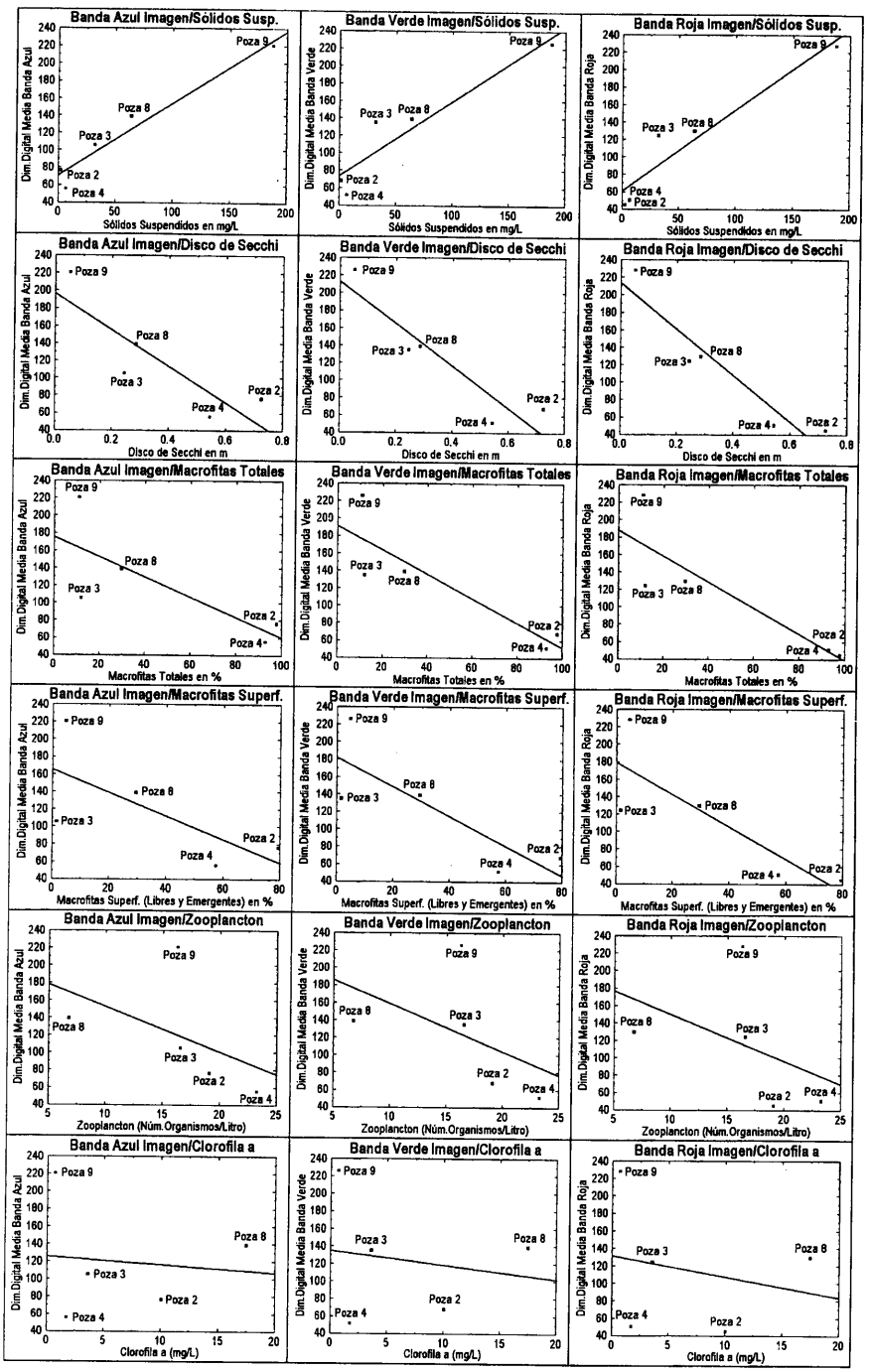

Figura 6. Rectas de ajuste de las regresiones simples entre los valores promedio de radiancia (por banda) en el eje Y, con respecto a los valores medidos para cada una de las seis variables limnéticas consideradas (eje X).

RESULTADOS

Las características dimensionales de las cinco pozas evaluadas se han simplificado en el Cuadro 1. Los valores muestran, con relación a extensión y volumen, que existen diferencias marcadas entre ellas. Sus valores de extensión total y de extensión de superficie con agua, en el momento del registro de las imágenes, varían, para el primer caso, desde 0.86 hasta 9.59 ha y, en el segundo, desde 0.76 hasta 5.00 ha. Es decir, la poza con mayor extensión de agua (Poza 4) tuvo casi siete veces más hectáreas que la de menor extensión (Poza 9). Para las profundidades medias las diferencias son menos drásticas y oscilan entre 0.49 m (Poza 9) y 1.02 m (Poza 3).

En términos de los volúmenes aproximados de agua en los microembalses se consideraron tres tipos de pozas; las pozas *grandes*, que tenían en ese momento un volumen cercano a los 28 000 m^3 (Pozas 4 y 8), las pozas *medianas*, que tenían un volumen cercano a los 12 000 m^3 (Pozas 2 y 3), y la poza *pequeña,* con un volumen cercano a los 4 000 m^3 (Poza 9).

En el Cuadro 2 se muestran los valores de las variables limnéticas medidas en campo y de las muestras colectadas y procesadas en laboratorio para las cinco pozas evaluadas. En ella se puede observar que existen diferencias importantes entre las pozas, las principales se presentan cuando se analizan las columnas que corresponden a las variables: 1. Sólidos suspendidos totales (SST); 2. Profundidad de penetración con el Disco de Secchi (SEC) y 3. Porcentaje de cobertura de macrofitas totales (MACT) (columnas 1 a 3, respectivamente).

Al analizar sus valores y tendencias es posible separar a las pozas en tres grupos, el primero es el de las pozas 2 y 4. Estas pozas tienen bajos valores de SST (de 2 a 7 mg/l), altos valores de SEC (de 0.5 a 0.7 m) y altos valores de MACT (de 93 a 98%). El segundo grupo es el formado por las pozas 3 y 8, las cuales presentan valores medios tanto de SST (de 32 a 63 mg/l), de SEC (de 25 a 29 cm) como de MACT (de 12 a 30%). Finalmente, en el tercer grupo se incluye solamente a la Poza 9, la cual se separa completamente del resto. Ésta presenta un valor muy alto de SST (188 mg/l), muy bajo de SEC (5 cm) y bajo de MACT (11%).

Al analizar los valores de las tres variables limnéticas restantes, 4. Porcentaje de cobertura de macrofitas de superficie (MACS); 5. Abundancia de zooplancton (ZOO) y 6. Concentración de Clorofila-*a* en el agua (CLOA; columnas 4 a 6, respectivamente) no es posible establecer un comportamiento claro. Por ejemplo, para el caso de las MACS, los valores bajos correspondientes a las pozas 3 y 9 (de 2 a 5%), el valor medio a la Poza 8 (29%) y los valores altos a las pozas 2 y 4 (de 58 a 79%). En cuanto al ZOO las diferencias entre los valores no son muy marcadas, tres de las pozas presentan valores medios (de 16 a 19 org/l), y dos, valores relativamente extremos (7 org/l para la Poza 8 y 23 org/l para la Poza 4). La variable CLOA presenta un valor muy alto en la Poza 8 (17 mg/m^3), alto en la Poza 2 (10 mg/m^3) y tres valores relativamente bajos a medios (de 0.7 a 3.6 mg/m^3).

En el Cuadro 3 se presenta una síntesis de los parámetros estadísticos descriptivos más importantes correspondientes a los diversos valores de dimensión digital de los pixeles, de cada una de las tres bandas-imagen analizadas (AVR, azul-verde-roja) y a cada una de las pozas.

El que se haya considerado a las tres bandas para el análisis de correlación no es ocioso, ya que al capturar digitalmente las video-imágenes resulta que cada uno de sus pixeles presenta tres valores distintos, que pueden variar, cada uno, entre 0 y 255 (formato de 8 bits), lo que significa que si se considera simultáneamente a los 24 bits de las tres bandas AVR por pixel, es posible tener una dimensión de color de entre casi 17 millones de valores admisibles (ITC, 1997:470-477).

Cuadro 3. Descripción estadística de los valores pixel de las áreas valoradas en las imágenes de video de las pozas (véanse las áreas *muestreadas* en las Figuras 5A y 5B)

Banda-Poza	No. de Pixeles	Media	Desv. Estándar	Mediana	Mínimo	Máximo	Error Estándar
Az-Poza 2	4942	76.3	8.3	76	30	104	0.117
Ve-Poza 2	4942	67.6	6.6	68	27	92	0.094
Ro-Poza 2	4942	44.6	8.4	44	8	76	0.120
Az-Poza 3	5775	105.1	8.3	106	75	137	0.110
Ve-Poza 3	5775	134.5	5.4	134	110	156	0.071
Ro-Poza 3	5775	124.0	8.3	124	82	152	0.109
Az-Poza 4	2377	55.2	8.4	55	26	86	0.172
Ve-Poza 4	2377	51.6	8.3	50	19	85	0.171
Ro-Poza 4	2377	50.3	9.8	50	10	85	0.202
Az-Poza 8	1875	138.8	11.0	141	77	175	0.254
Ve-Poza 8	1875	138.7	9.4	139	83	179	0.217
Ro-Poza 8	1875	129.4	11.9	129	65	175	0.275
Az-Poza 9	3286	*220.7*	10.1	221	167	255	0.176
Ve-Poza 9	3286	*225.7*	8.0	225	193	255	0.139
Ro-Poza 9	3286	*227.8*	9.9	229	185	255	0.172

Notas: Az=Banda azul, Ve=Banda verde, Ro=Banda roja. Los valores sombreados agrupan los promedios por banda más bajos para las pozas 2 y 4 (las más *oscuras*). Los valores promedio subrayados agrupan a las pozas 3 y 8 (pozas *medianamente oscuras*). Los valores en negritas agrupan los promedios por banda más altos de todas las pozas (Poza 9, con el agua *más blanquecina*; Figura 4).

Si lo que se busca es una diferenciación del "color" del agua, desde una cierta altura, con relación a las variables limnéticas, entonces se debe aprovechar la mayor heterogeneidad potencial.

Además, se debe tomar en cuenta que, para fines de simplificación del análisis de correlación, fue más sencillo realizar tres correlaciones independientes, una para cada banda (Figura 6), que elaborar un análisis de correlación multidimensional integrando simultáneamente los valores de las tres bandas. Más aún, de la manera en como se hizo el análisis en este trabajo, fue posible determinar si alguna de las tres bandas, independientemente, podría ser empleada individualmente como modelo de estimación indirecta de alguna de las variables limnéticas consideradas.

Analizando los valores y tendencias mostrados en el Cuadro 3 se puede señalar que es importante la cercanía relativa entre las medias de las dimensiones digitales de los pixeles de las pozas 2 y 4, y por otro lado, el alejamiento considerable de la media de la Poza 9, con respecto a todas las demás. Los valores más altos de error estándar (EE) son los de las pozas 8, 4 y 9, en ese orden. La Poza 8, en particular, presenta los valores mayores de EE, considerando a las tres bandas en su conjunto. Esto se interpreta como una medida de dispersión y heterogeneidad de las dimensiones digitales de los miles de pixeles considerados (1 875 para la Poza 8, hasta 5 775 para la Poza 3). Es decir, los valores individuales de la Poza 8 tienen mayores diferencias entre sí, que las diferencias entre los valores de la Poza 3, por ejemplo, la cual tiene los valores más pequeños de EE. Al tomar en cuenta de

manera separada a las tres bandas de todas las pozas, las verdes presentaron los valores de dispersión menores (valores bajos de EE); en cambio, a las bandas rojas correspondieron los más menores.

Existe la posibilidad de distinguir tres grupos de pozas, en función de los valores promedio de las tres bandas de las cinco (Cuadro 3 y Figura 5): el primero es el de las pozas que tienen agua de color más *oscuro* que el resto (Pozas 2 y 4); el segundo es el de las pozas *medianamente oscuras* (Pozas 3 y 8) y el tercero corresponde a la poza con agua *más blanquecina* (Poza 9).

Las pozas 2 y 4 son muy semejantes en términos de que presentan valores bajos de dimensión digital (intensidad luminosa convertida a valores numéricos entre 0 y 255), ellas son relativamente más oscuras que el resto de las pozas. Sin embargo, existen diferencias considerables entre ellas, sobre todo si se comparan los valores medios de sus bandas AVR. La Poza 2 muestra un dominio de color de las bandas azul y verde (76 y 68) con respecto a la roja (45), en cambio, en la Poza 4 los valores promedio de las tres bandas son muy similares entre sí (55, 52 y 50). Esto significa que el agua de la Poza 2 es más azul-verdosa oscura que la de la Poza 4, siendo ésta última de color café oscuro, por sus valores más bajos, es decir, ninguno de los tres colores primarios es dominante sobre el resto (Figura 5).

También las pozas 3 y 8 son semejantes entre sí y forman un grupo que, de manera general, posee valores intermedios de dimensión digital (de 105 a 139). Sin embargo, entre ellas, dos también tienen sus diferencias de color. La Poza 3 muestra un dominio de color de la banda verde (135), la roja es un poco menor (124) y la azul mucho menor (105), lo que da como resultado que esta poza tenga una tonalidad verdosa dominante (Figura 5). En cambio, en la Poza 8 los valores promedio de las tres bandas son relativamente similares entre sí (AVR= 139, 139, 129), aunque sobresalen los valores de las bandas azul y verde, lo que conlleva a que esta poza tenga una tonalidad más cercana a esos colores (Figura 5).

Los valores de la Poza 9 corresponden a los promedios más altos de las cinco pozas (por banda; 221, 226 y 228) y además, en términos de dimensión del color, se puede interpretar que, en particular esta poza, es la menos *oscura* o más *blanquecina* de todas (Cuadro 3 y Figura 4).

En el Cuadro 4 se muestran los parámetros obtenidos en las regresiones lineales entre los valores medios de dimensión digital DD de los pixeles por banda/imagen, con respecto a los valores de las variables limnéticas, asimismo, en la Figura 6 se integran las 18 gráficas de las regresiones.

A partir de una revisión general de estas gráficas se observa que existe relación directa entre los niveles de SST, con respecto a los valores de DD, mientras mayor es el valor de concentración de los SST mayores son los valores de DD en las imágenes; así cuanto más *blanquecina* es el agua de la poza, más concentración de sólidos suspendidos tiene. Por el contrario, para el resto de las variables se presenta una relación inversa. Esto es, entre menor es el valor de la DD en las imágenes, mayor es el valor de la variable limnética considerada. También se observa, conforme uno revisa las variables limnéticas (desde SEC hasta CLOA), que las rectas de ajuste de las regresiones se hacen progresivamente más "planas" u horizontales, lo que indica que la dependencia entre imagen-variable limnética se reduce notablemente, hasta el caso extremo de la concentración de Clorofila-*a* en el agua, en que la recta es prácticamente horizontal.

Analizando los valores y tendencias mostrados por los coeficientes de determinación R del Cuadro 4, es posible establecer algunas observaciones: existen diferentes niveles de significancia de correlación entre los valores imagen y las seis variables limnéticas. Los valores de R son muy altos y altos para las variables SST, SEC y MACT (un máximo de 0.98 hasta un mínimo de -0.77). Los niveles

de probabilidad (P) son significativos en P<0.05 para las tres bandas con respecto a SST y para dos bandas en relación con SEC. Además, los niveles de P son significativos en P<0.10 para la banda azul respecto a SEC, y las bandas verde y roja tanto de MACT como de MACS. A diferencia de lo anterior, para todas las bandas en relación con ZOO y CLOA los niveles de significancia de P fueron mayores a 0.10, llegando a un valor máximo de 0.87 (banda azul CLOA).

Los niveles de probabilidad (P) son significativos en P<0.05 para las tres bandas con respecto a SST y para dos bandas en relación con SEC. Además, los niveles de P son significativos en P<0.10 para la banda azul respecto a SEC, y las bandas verde y roja tanto de MACT como de MACS. A diferencia de lo anterior, para todas las bandas en relación con ZOO y CLOA los niveles de significancia de P fueron mayores a 0.10, llegando a un valor máximo de 0.87 (banda azul CLOA).

A partir de los datos obtenidos en este trabajo y si se tuviese que escoger solamente una de las tres bandas para estimar las variables que registraron el mejor ajuste (Cuadro 4), se consideraría a la azul como la más adecuada para evaluar indirectamente la cantidad de sólidos suspendidos totales en las pozas (R=0.976). La banda roja es la más útil para tasar la dimensión de turbidez del agua mediante el Disco de Secchi (R= -0.944). Finalmente, la banda verde es la que mejor estima el porcentaje de cobertura total de las macrofitas totales (R=-0.875).

Cuadro 4. Parámetros de las regresiones entre los valores medios de dimensión digital de los pixeles por banda/imagen, con respecto a los valores de las variables limnéticas de las pozas evaluadas

Banda de la Imagen-Variable	Coeficiente A (error estándar)	Coeficiente B (error estándar)	Desviación estándar	Coeficiente de terminación R	Probabilidad (P)
Azul-Sólidos Suspendidos	70.498 (09.5)	0.8298 (0.1)	16.164	0.97642	*0.00433*
Verde-Sólidos Suspendidos	73.483 (15.7)	0.8546 (0.2)	26.692	0.94241	*0.01645*
Roja-Sólidos Suspendidos	60.431 (14.7)	0.9330 (0.2)	24.945	0.95692	*0.01066*
Azul-Disco de Secchi	196.574 (32.5)	-208.621 (74.0)	39.181	-0.85218	0.06669
Verde-Disco de Secchi	212.860 (25.6)	-240.737 (58.1)	30.769	-0.92269	*0.02550*
Roja-Disco de Secchi	213.584 (23.4)	-265.314 (53.2)	28.190	-0.94463	*0.01551*
Azul-Macrofitas Totales	175.311 (34.5)	-1.151 (0.6)	47.978	-0.76777	0.12956
Verde-Macrofitas Totales	191.758 (27.7)	-1.398 (0.4)	38.576	-0.87542	0.05179
Roja-Macrofitas Totales	187.897 (30.8)	-1.491 (0.5)	42.776	-0.86723	0.05691
Azul-Macrofitas Superficie	165.384 (36.7)	-1.335 (0.8)	53.943	-0.69358	0.19398
Verde-Macrofitas Superficie	181.882 (31.0)	-1.686 (0.7)	45.488	-0.82166	0.08795
Roja-Macrofitas Superficie	179.016 (32.1)	-1.846 (0.7)	47.194	-0.83560	0.07802
Azul-Zooplancton	203.987 (93.5)	-5.159 (5.4)	65.576	-0.48280	0.41007
Verde-Zooplancton	213.180 (99.9)	-5.452 (5.8)	70.067	-0.47873	0.41462
Roja-Zooplancton	203.000 (110.2)	-5.343 (6.4)	77.323	-0.43581	0.46321
Azul-Clorofila-a	125.531 (48.8)	-0.935 (5.3)	74.496	-0.10134	0.87119
Verde-Clorofila-a	134.483 (51.6)	-1.615 (5.6)	78.724	-0.16413	0.79196
Roja-Clorofila-a	131.191 (54.9)	-2.372 (6.0)	83.728	-0.22396	0.71725

Notas: Las gráficas de las regresiones pueden observarse en la Figura 6. N=5. A=Valor de la intercepción en el eje de las Y. B=Pendiente de la recta de regresión. Se han sombreado los valores máximos de R para cada variable/banda. Los valores de P en negritas son significativos en *P<0.05*. Los valores subrayados de P son significativos en *P<0.10*.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se puede considerar a los microembalses como sistemas semicerrados en donde existen procesos tridimensionales, hecho que hace complejo su entendimiento, además de que los factores ecológicos se tienen que circunscribir dentro de una dimensión espacial, que involucra siempre la extensión de superficie y la profundidad.

Las comunidades dulceacuícolas responden a escalas temporales más detalladas que las comunidades terrestres, los cambios en los factores a medir son muy rápidos, lo que dificulta la obtención directa de la información.

Los estudios en cuerpos de agua dulce se pueden realizar a diferentes escalas, abarcan desde el desarrollo de un sistema limnético integrado a partir de diferentes cuencas de ríos, lagos, flujos de agua subterránea, etc., hasta estudios que se enfocan a las características ecológicas entre unidades lago de un sistema, como lo es este caso de estudio, o bien, los enfoques que buscan mayor detalle espacial y temporal a partir de la evaluación de las diferentes porciones dentro de un solo lago.

Las bajas correlaciones que se obtuvieron entre los parámetros de las imágenes y los correspondientes a las variables biológicas dentro de la columna de agua, como el fitoplancton y el zooplancton, sugieren que estos microembalses de alta montaña no están regulados por dinámicas ascendentes (o *bottom-up*, Carpenter *et al.*, 1985), como lo están los lagos someros de las zonas templadas. Por el contrario, las dinámicas de este tipo de microembalses están más influenciadas por la cantidad de sólidos suspendidos que se remueven desde el fondo del sistema, su efecto sobre el nivel de turbidez y su consecuencia directa en la comunidad de macrofitas (Zambrano *et al.*, en prensa), lo cual además se refleja en las altas correlaciones que se presentaron con respecto a estas variables.

Es importante señalar, en relación con los niveles relativamente altos de concentración de Clorofila-*a* en el agua, que lo anterior indica que los microembalses están sensiblemente eutroficados. Además, hay que advertir los valores bajos de abundancia de zooplancton en todas las pozas, esto si se les compara con los de las pozas que están fuera de las zonas intertropicales y presentan clima templado (Zambrano *et al.*, en prensa).

A partir de los datos obtenidos, se puede afirmar que los niveles de predictibilidad de las variables SST, SEC y MACT, mediante los valores de las dimensiones digitales DD de las bandas/imagen, son considerablemente altos. En cambio, para la variable MACS, pero sobre todo para las variables ZOO y CLOA, no es posible pensar en que se pueda tener un nivel de confiabilidad mínimo para *predecir*, a partir de imágenes de video, sus valores en el cuerpo de agua.

Con las imágenes de video se tiene un registro detallado del objeto de estudio en el momento necesario y con la suficiente resolución espacial que se requiere para la caracterización de las variables limnéticas de los microembalses en el centro de México.

Se reconocen las limitaciones en términos de recepción de información espectral (bandas dentro del visible) y de resolución espacial que tienen las imágenes de video en color, digitizadas en formato de 24 bits. La razón de su uso es que, en el momento de los registros de las imágenes empleadas en este trabajo, sólo se contaba con ese tipo de *sensor*. Sin embargo, en años recientes se ha probado el uso de la película fotográfica infrarroja (transparencia en falso-color), la cual ha ofrecido buenos resultados para deslindar coberturas de dos especies dominantes de pastos marinos en un área cercana a Ensenada, B.C. (López *et al.*, 1998). Esa misma película podría ser aplicada a pozas semejantes a las evaluadas aquí, a fin de delimitar coberturas más reales de plantas acuáticas en la superficie del agua de esos microembalses.

Los resultados mostraron altos niveles de

correlación entre los valores promedio por banda imagen, con respecto a la dimensión de la concentración de los sólidos suspendidos totales, la profundidad de penetración mediante el Disco de Secchi y la cuantificación del porcentaje de la cobertura de macrofitas totales. Las regresiones que consideran el porcentaje de cobertura de macrofitas visibles de superficie (emergentes y libre flotadoras) presentaron correlaciones medias.

En los casos de las variables de zooplancton y Clorofila-*a*, los coeficientes de las determinaciones fueron muy bajos, es decir, el método propuesto no resultó ser útil para determinar indirectamente en ellas sus valores a partir de las imágenes de video en color natural.

La posibilidad de predecir valores de variables limnéticas, mediante el procesamiento de las bandas de las imágenes de video, resulta ser promisorio y satisfactorio en términos estadísticos, aun cuando las limitantes pudieran ser la no generalización de la aplicabilidad de estos modelos predictivos, simples y lineales para otras áreas en estudio, con características diferentes a las de las pozas del área de Acambay, Estado de México.

El procesamiento de las imágenes de video ha permitido demostrar su utilidad en los estudios de variables limnéticas de los sistemas dulceacuícolas artificiales pequeños del centro de México. Este procedimiento basado en la teledetección videográfica analógica, representa una opción real, de bajo costo, para la obtención de información a distancia de objetos cuyas dimensiones, a alturas adecuadas, permiten ser registrados por el sensor de la cámara.

RECONOCIMIENTOS

Se reconoce y agradece a las siguientes personas su apoyo para la realización del trabajo de campo durante la toma de muestras y el registro de las imágenes con el globo aerostático: Enrique Elizarrarrás, Leopoldo Galicia, Eduardo Pérez, Víctor Aguirre y Demián Hinojosa. También se agradece ampliamente a los propietarios de las pozas evaluadas en este trabajo, los señores Maclovio Ruiz y hermanos, el habernos facilitado su acceso y registro. Parte de los resultados del proyecto serán publicados en la revista *Hydrobiologia/ Developments of Hydrobiology* (Kluwer). Este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo económico y logístico de los Institutos de Ecología y Geografía (UNAM) y del *Biodiversity Support Program* en colaboración con *Nature for Conservancy* (WWF y USAID).

REFERENCIAS

📖 APHA (1985), *Standard methods for the examination of the water and wastewater*, American Publish Health Association, 16th Edition, Washington D. C.

📖 Athié, L. (1987), *Calidad y cantidad de agua en México*, Universo Veintiuno, México.

📖 Carpenter, S. R., J. F. Kitchell y J. R. Hodgson (1985), "Cascading trophic interactions in a lake productivity", *Bioscience*, USA, 35:634-639.

📖 Espinoza Pérez, H., M. T. Gaspar Dillanes y P. Fuentes Mata (1993), "Listados faunísticos de México. III", *Los peces dulceacuícolas mexicanos*, Depto. de Zoología, Instituto de Biología, UNAM, México.

📖 Everitt, J. H. and D. E. Escobar (1992), "Applications of airborne video for agricultural and rangeland management", *Technical Papers of The ASPRS/ACSM/RT 1992 Convention, Mapping and Monitoring Global Change*, vol. 5 (Resource Technology 92), Washington, D. C., August 3-8, pp. 117-136.

📖 Ferguson, R. L. y K. Korfmacher (1997), "Remote sensing and GIS analysis of seagrass meadows in North Carolina, USA", *Aquatic Botany,* Elsevier, The Netherlands, *58:241-258.*

📖 García, E. (1988), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, Instituto de Geografía, UNAM, México.

📖 Harris, N. R., D. E. Johnson, T. L. Righetti y M. R. Barrington (1996), "A blimp borne camera system for monitoring rangelands, riparian zones, or critical areas", *Geocarto International Vol.11, No.3:99-104*, September, Hong Kong.

🕮 Hernández Aviléz, J. S., M. C. Galindo de Santiago y J. Loera Pérez (1995), "Bordos o microembalses", en De la Lanza Espino, G. y J. L. García Calderón (comps.), *Lagos y presas de México*, Centro de Ecología y Desarrollo, México, pp. 291-308.

🕮 INEGI (1983), *Fotomapa a escala 1:20 000, Clave E14A17-B (Acambay, Estado de México)*, obtenido con fotografías aéreas registradas en 1982, SPP-Dirección General de Geografía, México.

🕮 ITC (1993), "The Integrated Land and Water Information System ILWIS Version 1.4", *User's Manual*, First edition, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, The Netherlands.

🕮 ITC (1994), "The Integrated Land and Water Information System ILWIS Version 1.41, Supplement to 1.4", *User's Manual*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, The Netherlands.

🕮 ITC (1997), "The Integrated Land and Water Information System ILWIS Version 2.1 for Windows", *User's Guide*, First edition, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, The Netherlands.

🕮 Lefevre J. R., C. Valerio and A. Meinesz (1984), "Optimisation de la technique de la photographie aerienne pour la cartographie des Herbiers de Posidonies", *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, in Boudouresque, C. F., J. de Grissac A. and Olivier J. (eds.), *GIS Posidonie publ.*, Fr., 1984:1:49-55.

🕮 Lehmann A. and J.-B. Lachavanne (1997), "Geographic information systems and remote sensing in aquatic botany", *Aquatic Botany 58:195-207*, Elsevier, The Netherlands.

🕮 Lillesand, T. M. and R. W. Kiefer (1994), *Remote sensing and image interpretation*, Third Edition, Wiley & Sons, New York, USA.

🕮 Long, D. S., J. E. Taylor and J. McCarthy (1986), "Cessna aircraft cabin door mount for photographic and videographic cameras", *Photogram. Engineering and Remote Sensing,* vol. 52, No.11, USA, pp.1753-1755.

🕮 López Blanco, J. y T. Arias Chalico (1998), "Elaboración de videomapas mediante la corrección fotogramétrica de imágenes de video en color: la región de La Montaña de Guerrero", *Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 37,* Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 21-35.

🕮 López Blanco, J., P. Ramírez García and A. Lot, (1998), "Local distribution of seagrass (*Phyllospadix spp*) by means of processing infrared and color imagery obtained with a tethered blimp to the North of Ensenada, Mexico", *Proceedings of the Fifth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Management*, San Diego, USA, 5-7 October 1998, vol. I, pp. 97-104.

🕮 Lorenzen, C. J. (1966), "A method for the continuous measurement of *in vivo* chlorophyll concentrations", *Deep-Sea Research* 13:223-227.

🕮 Malthus T. J. and D. G. George (1997), "Airborne remote sensing of macrophytes in Cefni Reservoir, Anglesey, UK", *Aquatic Botany 58:317-332*, Elsevier, The Netherlands.

🕮 Margalef, R. (1983), *Limnología*, Editorial Omega, Barcelona, España.

🕮 Marshall T. and P. F. Lee (1994), "Mapping aquatic macrophytes through digital image analysis of aerial photographs: an assessment", *J. Aquat. Plant Manage*, USA, 32:61-66.

🕮 Microcal Software Inc. (1994), *Microcal Origin Version 3.5*, Northampton, MA 01060, USA.

🕮 Moss, B. (1998), *Ecology of fresh waters*, Blackwell Scientific Publications, London.

🕮 Necchi, O. Jr., L. H. Z. Branco and C.C. Z. Branco (1995), "Comparison of three techniques for estimating periphyton abundance in bedrock streams", *Arch. Hydrobiol.*, USA, 134:393-402.

🕮 Nohara, S. (1991), "A study on annual changes in surface cover of floating-leaved plants in a lake using aerial photography", *Vegetatio 97:125-136*, Kluwer, Belgium.

🕮 Norris, J. G., S. Wyllie-Echeverria, T. Mumford, A. Bailey and T. Turner (1997), "Estimating basal area coverage of subtidal seagrass bed using underwater videography", *Aquatic Botany 58:269-287*, Elsevier, The Netherlands.

🕮 Pasqualini, V. and C. Pergent-Martini (1996), "Monitoring of *Posidonia oceanica* meadows using image processing", 351-358. in Kuo, J., R. C. Phillips, D. I. Walker and K. Kirkman, Seagrass

Biology, *Proceedings of an International Workshop*, Faculty of Sciences, The University of Western Australia, Nedlands, Western Australia.

🕮 Ramírez García, P., J. López Blanco and Daniel Ocaña (1998), "Mangrove vegetation assessment in the Santiago River Mouth, Mexico, by means of supervised classification using Landsat TM imagery", *Forest Ecology and Management*, 105:217-229, Elsevier, The Netherlands.

🕮 Robbins, B. D. (1997), "Quantifying temporal change in seagrass areal coverage the use of GIS and low resolution aerial photography", *Aquatic Botany*, 58:259-267, Elsevier, The Netherlands.

🕮 Scheffer, M. (1997), *Ecology of shallow lakes*, Kluwer Academic Publishers.

🕮 Schloesser, D., C. Brown and B. A. Manny (1988), "Use of aerial photography to inventory aquatic vegetation", *Journal of Aerospace Engineering*, USA, vol.1, No.3:142-150.

🕮 Sersland, C. A., C. A. Johnston and J. Bonde (1995), "Using GPS-Linked, color video image mosaics to assess wetland vegetation", *Proceedings of the 15th Biennial Workshop on Color Photography and Videography in Resource Assessment*, May 1995, Indiana State University, Terre Haute, Indiana, USA.

🕮 Welch, M. Madden Remillard and R. B. Slack (1988), "Remote sensing and geographic information system techniques for aquatic resource evaluation", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, USA, vol. 54, 2:177-185.

🕮 Zambrano, L. (1999), *Cambios en la dinámica del sistema dulceacuícola por la introducción de carpas (Cyprinus carpio) en las pozas del municipio de Acambay, Estado de México*, tesis Doctorado en Ecología, Instituto de Ecología, UNAM, México.

🕮 Zambrano, L. and C. Macías García (1999), "Impact of intentional fish introduction in Mexican freshwater systems", *in* Claudi R. and J. Leach, *Non-indigenous freshwater organisms in North America: vectors of introduction, biology and impacts*, Lewis Publishers, USA, pp.113-127.

🕮 Zambrano, L., M. Perrow, C. Macías García and V. Aguirre Hidalgo (en prensa), "Impact of introduced carp (*Cyprinus carpio*) in subtropical ponds of Central Mexico", *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, USA.