

# 10. Simulación de la Dinámica Diurna del Oxígeno Disuelto en el Embalse Cerrón Grande.

C. García, D. Henríquez, G. Moz, M.D Rovira, Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales-UCA

## Resumen

El Embalse Cerrón Grande es un cuerpo de agua dulce artificial constituido como uno de los elementos de mayor valor en la ecología de El Salvador. La monitorización periódica por muestreo puntual es incapaz de ofrecer una descripción completa de la calidad de sus aguas, haciendo necesario implementar sistemas que ofrezcan una cobertura total la calidad de sus aguas y las variaciones temporales de la misma. En tal sentido, este estudio combina las técnicas de simulación y detección remota en la propuesta de una nueva metodología de monitorización del embalse Cerrón Grande basándose, en esta primera aproximación, en el oxígeno disuelto como variable clave. Esta metodología busca proporcionar una visión espacial y temporalmente continua de la calidad del agua del embalse.

## Palabras clave

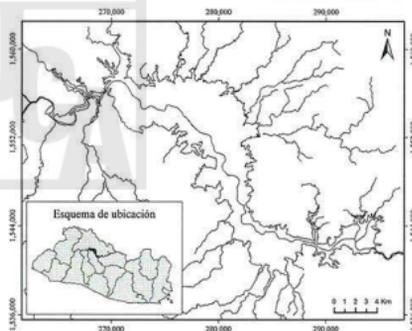
Detección Remota, Embalse Cerrón Grande, Monitoreo, Simulación.

## I. INTRODUCCIÓN

### A. Embalse Cerrón Grande

El embalse Cerrón Grande es un reservorio artificial de aprovechamiento hidroeléctrico que constituye el mayor cuerpo de agua dulce del país. Está situado entre los departamentos de Chalatenango, San Salvador, Cuscatlán y Cabañas, posee una extensión de 60,698 hectáreas incluyendo la superficie acuática y algunas microcuencas asociadas [1]; su nivel de agua oscila entre los 230 y 243 msnm en las estaciones seca y lluviosa respectivamente [2]. El embalse es el núcleo del humedal Cerrón Grande, el cual forma parte de los 6 humedales nacionales declarados sitio Ramsar [1], posee vegetación del tipo bosque tropical seco en sus orillas e islas y presenta una alta riqueza de aves migratorias

Fig. 1. Esquema de ubicación de embalse Cerrón Grande.



Simulación de la Dinámica Diurna del Oxígeno Disuelto en el Embalse Cerrón Grande.

y residentes; funciona como controlador de inundaciones y depurador natural de la elevada carga orgánica que portan los tributarios que lo alimentan [1].

Su problemática ambiental se centra en los siguientes aspectos:

- Acumulación de desechos sólidos
- Descarga de aguas residuales ordinarias y especiales
- Especies perjudiciales de flora y fauna: es especialmente importante la presencia de alga suspendida y jacinto acuático.

Las autoridades medioambientales nacionales desarrollan planes de investigación para el mejoramiento continuo de los humedales Ramsar; en ellos, los sistemas de monitorización de calidad de agua adquieren un papel fundamental en la medida en que aportan la información sobre la que ha de basarse la toma de decisiones.

Tradicionalmente, estos sistemas consisten en el muestreo y medición in situ de parámetros fisicoquímicos-biológicos de forma puntual y regularmente periódica; éstos son costosos e incapaces de ofrecer una visión sinóptica de la calidad del agua de cuerpos de gran extensión y compleja dinámica ecológica [3], como es el caso del embalse Cerrón Grande.

Por tanto, es necesario implementar nuevos sistemas de monitorización que ofrezcan, de manera económica, la distribución espacial y temporal de las variables de calidad del agua en toda la extensión del embalse. Una alternativa a dichos requerimientos es la simulación dinámica de los procesos naturales de variables clave en la calidad del cuerpo de agua, como por ejemplo el oxígeno disuelto.

#### B. Simulación del Oxígeno Disuelto en cuerpos de agua

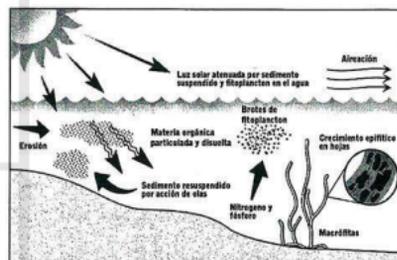
El oxígeno disuelto es un elemento primordial en las formas de vida superiores y en el control de muchas reacciones químicas a través de mecanismos de oxidación, constituyendo una variable que indica el

estado general de la calidad de los cuerpos de agua. En su dinámica participan los siguientes fenómenos biológicos y físicos [4].

- Fotosíntesis y respiración de algas, macrofitas, epifiton y zooplancton.
- Intercambios atmosféricos por mecanismos de aireación.
- Reacciones de oxidación por nitritos, nitratos, sedimentos, materia orgánica (OM) y demanda biológica carbonácea de oxígeno (CBOD).

La materia orgánica puede encontrarse disuelta o suspendida y en cada caso puede ser refractaria (RDOM o LDOM) o lábil (RPOM o LPOM) La Fig. 2 presenta el esquema de la organización de los agentes que participan en dichos fenómenos y las interacciones entre las variables fisicoquímico-biológicas que los determinan; en la figura se resaltan las variables a las que se ha acotado el desarrollo del estudio.

Fig. 2.  
Dinámica de variables fisicoquímico-biológicas en cuerpos de agua.



Simulación de la Dinámica Diurna del Oxígeno Disuelto en el Embalse Cerrón Grande.

La temperatura y las corrientes internas del cuerpo de agua son variables determinantes en el desarrollo de estos fenómenos en la medida en que determinan la velocidad de las reacciones y la distribución espacial de las variables respectivamente.

En este sentido, el modelo matemático que permite simular las concentraciones de oxígeno disuelto en un cuerpo de agua aborda su dinámica a partir de dos componentes básicos:

Ecuaciones generales de dinámica hidráulica, térmica y material: El modelo se formula a través de las ecuaciones acopladas de transferencia de momento, calor y masa en estado transiente, con las que se recrean los fenómenos de producción o decaimiento de oxígeno disuelto. Estas ecuaciones pueden ser resueltas sobre la extensión del cuerpo de agua con el método de los elementos finitos.

Caracterización del cuerpo de agua: Las ecuaciones anteriores, generales en un principio, son adecuadas al cuerpo de agua objetivo incorporando información específica en cuanto a delimitación espacial y datos de variables fisicoquímico-biológicas. Esta información puede ser adquirida por medio de la observación satelital del cuerpo de agua, cuya técnica pertenece al campo de la detección remota.

### C. Detección remota

La detección remota se refiere al proceso de obtención e interpretación de información de objetos a distancia mediante instrumentos que no requieren contacto físico con los mismos [5].

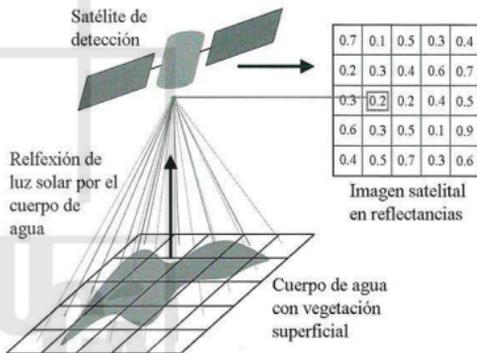
Múltiples investigaciones han determinado que la calidad del agua se encuentra estrechamente vinculada a su claridad, la cual determina las propiedades reflectivas de los cuerpos de agua en virtud de la materia coloreada suspendida o compuestos orgánicos disueltos [6].

Tales propiedades pueden ser medidas por instrumentos de detección remota como satélites de observación terrestre que captan la reflexión

de la luz solar por la superficie terrestre; de esta manera, la información de la calidad del agua puede ser determinada a partir de reflectancias capturadas en imágenes satelitales de los cuerpos de agua [7].

La Fig. 3 presenta el esquema general de adquisición de información por satélites de detección remota, en ella se muestra la influencia de la vegetación superficial (verde) en la captura de las reflectancias del cuerpo de agua.

Fig. 3. Adquisición de imágenes satelitales.



La información reflectiva es capturada en rangos de longitudes de onda conocidos como bandas; con ello, una imagen satelital aporta las reflectancias del cuerpo de agua en distintas longitudes de onda, permitiendo conocer el espectro de reflectancias de todos los materiales presentes [8], específicamente, de aquellos que determinan las variables de claridad del agua como la concentración de algas [6].

El satélite de detección Landsat 7 escanea la superficie terrestre con el sensor ETM+, el cual posee 6 bandas reflectivas que cubren el espectro electromagnético en longitudes de onda del visible (VIS, en bandas No. 1, 2 y 3) al infrarrojo cercano y medio (NIR y MIR en bandas No. 4, 5 y 7) [9].

El esquema de aplicación de la detección remota consiste en encontrar correlaciones entre variables fisicoquímico-biológicas, originalmente determinadas por muestreos y mediciones in situ, y las reflectancias en las bandas espectrales de la imagen satelital del cuerpo de agua.

Las correlaciones antes mencionadas son denominadas *modelos de detección remota* y son desarrollados con la finalidad de obtener los valores de las variables de calidad de agua únicamente a partir de operaciones efectuadas entre las reflectancias captadas en múltiples bandas del satélite de detección. Una forma general de estos modelos de detección se presenta en la ecuación (Ec. 1).

$$V_f = \sum_i C_i * B_i^{a_i}$$

Donde:

- $V_f$  Representa la variable fisicoquímica-biológica monitorizada
- $\sum C_i * B_i^{a_i}$  Expresa operaciones generales entre las reflectancias en las distintas bandas espectrales.
- $C_i$  Indica un coeficiente de correlación genérico.
- $B_i$  Simboliza una la reflectancia en una banda única o combinación aritmética de ellas, y
- $a_i$  Expresa un exponente entero.

Para que los modelos de detección remota reflejen consistentemente la calidad del cuerpo de agua en estudio, éstos deben ser determinados con imágenes satelitales adquiridas en la misma fecha de medición de las variables fisicoquímico-biológicas.

Modelos de detección con altos grados de precisión han sido desarrollados por Trescott [10], para concentraciones de algas y profundidad Secchi a partir de las bandas 1, 2 y 3 del satélite Landsat 7. He [3], extiende el desarrollo de modelos de detección a variables fisicoquímicas sin conexión directa con la claridad del agua como el nitrógeno amoniacal y fósforo total, con modelos basados en múltiples cocientes y potencias de las bandas 1 a 6 y 7 del satélite Landsat 5

Las características de la detección remota la sitúan como una alternativa ampliamente explotable que permite la monitorización rentable de cuerpos de agua en forma espacial y temporalmente continua [6]. Particularmente, la detección remota es el único método con la precisión adecuada para la observación de poblaciones de algas, dada su alta variabilidad en concentración y distribución espacial en temporadas de afloramiento [11].

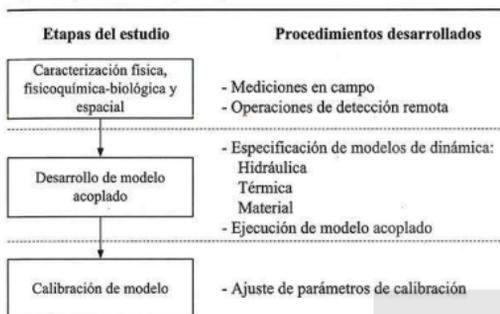
El presente estudio trata del desarrollo de un modelo acoplado del embalse Cerrón Grande en el que se incorpora su dinámica hidráulica, térmica y material en cuanto a oxígeno disuelto. El modelo se enmarca en el espacio bidimensional superficial; la caracterización de calidad de agua del embalse es abordada a través modelos de detección remota determinados con información de muestreos y mediciones in situ realizadas en el periodo de estudio.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología implementada en el desarrollo del sistema de monitoreo propuesto consiste en una caracterización del embalse Cerrón Grande seguida por el desarrollo del modelo acoplado y su correspondiente calibración. Estas etapas se esquematizan en la Fig. 4.

Simulación de la Dinámica Diurna del Oxígeno Disuelto en el Embalse Cerrón Grande.

Fig. 4. Esquema metodológico implementado.



A continuación se describen los métodos con los que se llevan a cabo las etapas del estudio.

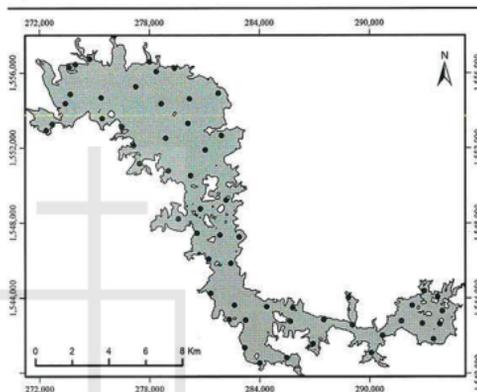
#### A. Caracterización física, fisicoquímica-biológica y espacial

La caracterización del embalse Cerrón Grande se realiza en la estación seca (meses Febrero a Mayo) del año 2013, ella incluye la realización de jornadas de muestreo y medición in situ además de tareas de adquisición y procesamiento de imágenes según se describe a continuación:

1) **Medición de variables fisicoquímico-biológicas:** Dichas variables son medidas en una red de puntos distribuida uniformemente sobre la extensión del embalse en jornadas de medición, como se presenta en la Fig. 5.

2) **Elección de tributarios:** Se seleccionan los tributarios que en estación seca posean el caudal suficiente para ejercer influencia sobre las corrientes internas. Esta selección se realiza atendiendo a recomendaciones de guarda-recursos; para cada tributario seleccionado se efectúa una medición de velocidad superficial y una geo-referenciación del punto de medición.

Fig. 5. Puntos de medición de variables fisicoquímico-biológicas.



La Tabla I presenta las fechas de realización de las jornadas de medición, variables monitoreadas y número de puntos de medición.

Tabla I. Medición de parámetros de calidad de agua

Fecha de medición	Variables monitorizadas	No. de puntos de medición
28 /2 /2013	Oxígeno disuelto. Temperatura.	62
29 /4 /2013	Variables fisicoquímico-biológicas: • Concentración de Algas (conteo de células). • Profundidad Secchi. • DBO. • Nitrogeno amoniacal.	6
8 /5 /2013	Velocidades superficiales de tributarios. Oxígeno disuelto. Temperatura.	8 (entradas de tributarios seleccionados)

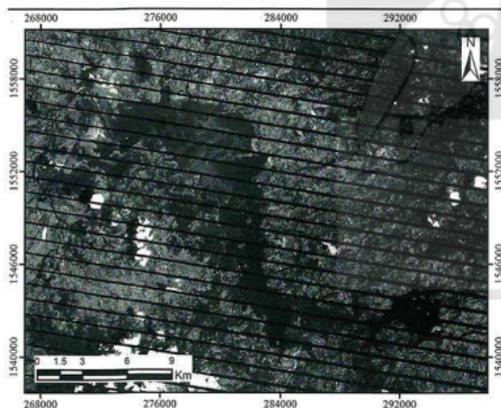
Simulación de la Dinámica Diurna del Oxígeno Disuelto en el Embalse Cerrón Grande.

3) *Detección remota*: La caracterización del embalse se completa con operaciones de detección, remota que consisten en su extracción y el desarrollo de modelos de detección remota.

La base de estas operaciones es una imagen multi-espectral del área del embalse adquirida por el satélite de detección Landsat 7 en la fecha del 24 de marzo 2013. Esta imagen cumple con ser la más próxima a la fecha de medición de las variables fisicoquímicas-biológicas y ofrecer visibilidad del embalse libre de afectación por nubes.

La imagen es adquirida sin costo a través del servicio Visualizador Global (GLOVIS) del Servicio Geográfico de los Estados Unidos (USGS). La Fig. 6 presenta la sección correspondiente al embalse Cerrón Grande en la imagen satelital adquirida.

Fig. 6. Imagen satelital Landsat 7 del embalse Cerrón Grande.



El desarrollo de los modelos de detección remota permite obtener las distribuciones de las variables fisicoquímico-biológicas monitorizadas en el estudio; esto se realiza en los siguientes pasos:

**1. Extracción de reflectancias:** Los puntos de medición de la jornada del 29 de abril son ubicados sobre la imagen satelital, para cada uno, se extraen las reflectancias en las bandas reflectivas de la imagen y se organizan de modo que a cada punto corresponda un juego de reflectancias y variables.

**2. Determinación de modelos:** Una vez completadas las extracciones, los modelos de detección remota son desarrollados mediante regresiones lineares múltiples con el método stepwise en el software Microsoft Excel® [12]; en ellas, las reflectancias extraídas son tomadas como variable independiente y las variables fisicoquímico-biológicas como dependientes, los límites de validación estadística de los modelos son: coeficiente de determinación  $R^2 > 0.7$ , valor crítico de F de correlación  $< 0.05$  y valores p de variables independientes  $< 0.05$ .

**3. Aplicación:** Los modelos desarrollados son aplicados a la imagen satelital, con lo que se obtienen imágenes de las distribuciones de las variables en toda la extensión del embalse.

**4. Extracción de resultados:** Los resultados de la aplicación del modelo son extraídos en una red de puntos ubicados sobre cada pixel del embalse y organizados de forma matricial con la estructura X, Y, Z, Dato, denominada nube de datos, donde X, Y, Z indican las coordenadas de un punto de extracción y Dato indica el valor de la variable fisicoquímico-biológica extraído.

Desarrollo de modelo acoplado

El modelo acoplado del embalse Cerrón Grande es desarrollado en el software Tdyn®, el cual es un entorno de simulación dinámica de fenómenos físicos basado en el método de los elementos finitos.

Simulación de la Dinámica Diurna del Oxígeno Disuelto en el Embalse Cerrón Grande.

La dinámica hidráulica, térmica y material del embalse es modelada con la especificación de las ecuaciones tradicionales de transferencia de momento, calor y advección de especies en estados transientes en sus formas bidimensionales (ver [13]); éstas se encuentran incluidas en el software de simulación y entregan como resultado campos de velocidades, temperaturas y concentración de especies respectivamente.

Dicha especificación consiste en la definición de las condiciones de frontera, valores iniciales e ingreso de la información adquirida por detección remota, ésta se realiza bajo las siguientes consideraciones:

- En la dinámica hidráulica del embalse no se considera el efecto de la velocidad del viento sobre las corrientes internas.
- La dinámica térmica se modela en el período de radiación solar efectiva de 6:00 am a 6:00 pm,
- En la dinámica material se considera únicamente el oxígeno disuelto.

La Tabla II presenta las condiciones de frontera y valores iniciales definidas para cada ecuación de transferencia.

Tabla II. Condiciones de frontera y valores iniciales.

Ecuación de transferencia	Condición de frontera	Valores iniciales
Momento	Contorno del embalse obtenido por detección remota. Velocidades de tributarios a su ingreso al embalse.	Campo de velocidades de corrientes internas.
Calor	Temperaturas de tributarios a su ingreso al embalse.	Campo inicial de temperaturas.
Masa	Concentración de oxígeno disuelto en tributarios a su ingreso al embalse	Campo inicial de concentraciones de oxígeno disuelto.

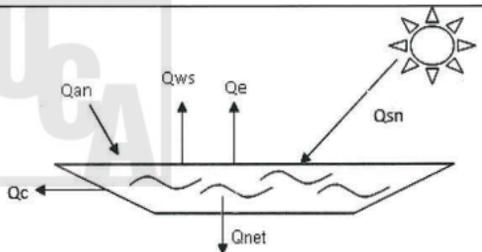
El campo inicial de velocidades de corrientes internas es determinado mediante una simulación de la dinámica hidráulica aislada en la que la masa de agua del embalse parte del reposo para luego alcanzar campos de velocidades en condición estable. Estos campos son los utilizados como condición inicial en las simulaciones acopladas.

Los campos iniciales de temperatura y oxígeno disuelto se toman a partir de los puntos de la jornada del 28 de febrero cuyos valores fueron medidos entre las 7:00 am y 8:00 am.

En las ecuaciones de transferencia de calor y advección de especies [13] se incorporan términos de fuente volumétrica de calor ( $q_v$ ) y producción neta de oxígeno disuelto (OD), a través de los cuales se ingresa la información específica del embalse.

El término de fuente volumétrica  $q_v$  se refiere a los intercambios térmicos en el embalse como resultado de la radiación solar esquematizados en la Fig. 7. El cálculo del término se define con la ecuación (Ec. 2) deducida a partir de Kirk [14] y Kapetsky [15].

Fig. 7. Esquema de intercambios de calor en un cuerpo de agua.



$$q_F = \frac{Q_{net}}{z_f} = \frac{Q_{sn}(1 - e^{-\eta z}) + (Q_{an} - Q_{ws} - Q_e \pm Q_c)}{z_f} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- $Q_{net}$ : Es el calor neto absorbido por el agua ( $W/m^2$ ).
- $Q_{sn}$ : Es la radiación neta de onda corta incidente ( $W/m^2$ ).
- $Q_{an}$ : Es la radiación atmosférica de onda larga ( $W/m^2$ ).
- $Q_{ws}$ : Es la emisión por la superficie del agua ( $W/m^2$ ).
- $Q_e$ : Es el calor perdido por evaporación del agua ( $W/m^2$ ).
- $Q_c$ : Es la transferencia de calor por conducción entre el agua y medio circundante ( $W/m^2$ ).
- $\eta$ : Factor de absorción de radiación de onda corta incidente (adimensional), definido en la ecuación (Ec. 3).
- $z_f$ : Profundidad fótica (m), definida en la ecuación (Ec. 4).

$$\eta = \frac{c}{z_{SD}^{\beta}} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$z_f = \gamma z_{SD}^{\theta} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde  $z_{SD}$  indica la profundidad Secchi, definida con la nube de datos obtenida por detección remota, y  $c$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  y  $\gamma$  son parámetros empíricos adimensionales con los valores estándares de 1.16, 0.8, 3.19 y 0.83 respectivamente [17].

La definición de los términos de la ecuación (Ec. 2) y ecuaciones auxiliares para su cálculo puede encontrarse en Henderson-Sellers [16] y Kapetsky y Nat, [15].

La producción neta de oxígeno disuelto OD se configura en los términos presentados en la ecuación (Ec. 5), éstos corresponden a la acotación de términos esquematizada en la Figura Fig. 2.

$$OD = \sum \left( \frac{(k_{ag} - k_{ar})\delta_{OM}\Phi_a}{\text{Producción neta de OD por fotosíntesis algal}} + \frac{A_{surf}K_L(\Phi'_{OD} - \Phi_{OD})}{\text{Aporte de OD por reaeración}} \right) - \frac{K_{BOD}R_{BOD}\theta^{T-20}\Phi_{CBOD}}{\text{Decaimiento de OD por DBO carbonácea}} - \frac{K_{NH_3-N}\delta_{NH_3-N}\gamma_{NH_3-N}\Phi_{NH_3-N}}{\text{Decaimiento de OD por Nitrógeno amoniacal}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

- $\Phi_a$ : Campo de concentración de algas ( $Kg/m^3$ ).
- $\Phi_{CBOD}$ : Campo de concentración de DBO ( $Kg/m^3$ ).
- $\Phi_{OD}$ : Campo de concentración de oxígeno disuelto ( $Kg/m^3$ ).
- $\Phi_{NH_3-N}$ : Campo de concentración de nitrógeno amoniacal ( $Kg/m^3$ ).

Los campos de concentración  $\Phi_a$ ,  $\Phi_{CBOD}$ ,  $\Phi_{NH_3-N}$  son definidos con las nubes de datos obtenidas por las operaciones de detección remota. El campo de oxígeno disuelto  $\Phi_{OD}$  es resultado de la ecuación de advección especificada en Tdyn. La concentración de algas es calculada a partir de los conteos realizados y un peso celular especificado. Los términos adicionales de la ecuación (Ec. 5) son definidos en [4].

### C. Calibración de modelo

La calibración se refiere al ajuste de los parámetros de modelación de manera que los resultados de las simulaciones de temperatura y oxígeno disuelto se aproximen en la mayor medida posible a los valores obtenidos en las jornadas de medición.

El procedimiento consiste en la ejecución de sucesivas corridas del modelo en las que los parámetros son modificados y los nuevos resultados son comparados con las mediciones de campo mediante el cálculo de índices de validación estadística.

Las comparaciones entre valores simulados y medidos son realizadas en puntos y tiempos coincidentes entre la simulación y la jornada de medición. Las mediciones empleadas en el procedimiento de calibración corresponden a temperaturas y concentraciones de oxígeno disuelto de una selección aleatoria del 38% de los puntos de medición de la jornada del 28 de febrero del 2013.

Los parámetros de modelación ajustados son  $c$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  y  $\gamma$  de las ecuaciones (Ec. 3) y (Ec. 4), y el peso celular con el que la concentración de algas  $\Phi_a$  es definida en la ecuación (Ec. 5).

Los índices estadísticos utilizados se presentan en las ecuaciones (Ec. 6) a (Ec. 8), en ellas se incluyen los rangos de aceptación con los que los índices indican comparaciones satisfactorias [18] y [19].

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{i,med} - V_{i,stim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{i,med} - V_{med,prom})^2}}; 0 \leq RSR \leq 0.7 \quad (\text{Ec. 6})$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (V_{i,med} - V_{i,stim})}{\sum_{i=1}^N (V_{i,med})} * 100; -25 \leq PBIAS \leq 25 \quad (\text{Ec. 7})$$

$$R^2 = \frac{\left[ \frac{\sum_{i=1}^N (V_{i,med} - V_{med,prom}) * (V_{i,stim} - V_{stim,prom})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{i,med} - V_{med,prom})^2 * \sum_{i=1}^N (V_{i,stim} - V_{stim,prom})^2}} \right]^2}{0.7 \leq R^2 \leq 1} \quad (\text{Ec. 8})$$

El valor de RSR indica la magnitud media del error estándar presentado por el modelo respecto a los valores medidos con los que es comparado, el índice PBIAS de la magnitud del sesgo que presenta el modelo, mientras que el coeficiente de determinación  $R^2$  indica la medida que el modelo describe las variaciones de los valores medidos (reales).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de las metodologías de caracterización y modelación acoplada del embalse Cerrón Grande.

#### A. Caracterización física, fisicoquímica-biológica y espacial

Los modelos de detección remota desarrollados para las variables fisicoquímico-biológicas concentración de algas, DBO, nitrógeno amoniacal y profundidad Secchi se presentan en la Tabla III.

Tabla III. Modelos de detección desarrollados.

Variable	Modelo desarrollado	
Algas	$\Phi_a = 1.4544 + 0.1171 * (B4/B3)^2$	(Ec. 9)
DBO	$\Phi_{CBOD} = -298.3643 + 4339.5284 * B1 - 1850.6291 * B2 + 77.9653 * B4$	(Ec. 10)
NH <sub>3</sub> -N	$\Phi_{NH3-N} = -1.5611 + 445.3502 * B3^2 + 47.0689 * B4^2$	(Ec. 11)
Secchi	$z_{SD} = 1965.5747 - 22916.7869 * B1 + 4949.9895 * B2 + 3311.4025 * B3 - 2767.7081 * B5$	(Ec. 12)

Donde:

- $\Phi_a$ : Concentración de algas en  $10^5$  cel/ml.
- $\Phi_{CBOD}$ : Concentración de DBO en mg/L.
- $\Phi_{NH3-N}$ : Concentración de nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N) en mg/L.
- $z_{SD}$ : Profundidad Secchi en cm.
- $BN$ : Banda número  $N$  ETM+.



Los resultados de la evaluación estadística de los modelos efectuada en la ejecución del método stepwise se presentan en la Tabla IV, de ella se observa que todos los modelos cumplen satisfactoriamente los límites establecidos para los valores de  $R^2$ ,  $F$  y  $p$ .

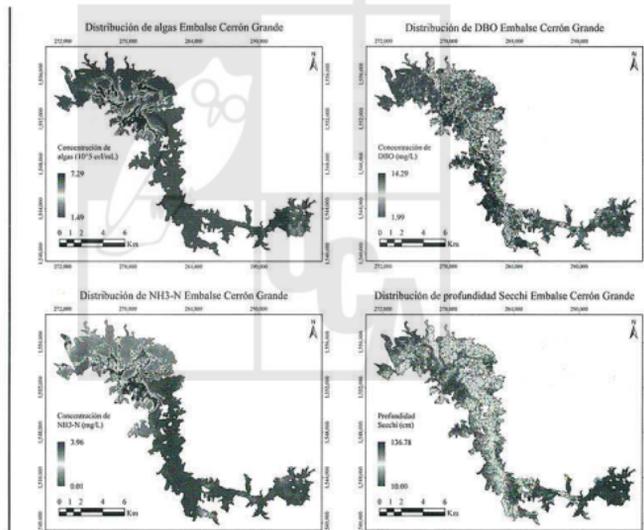
Tabla IV. Evaluación estadística de modelos de detección.

Variable dependiente	$R^2$	Valor crítico de $F$	Mínimo de $p$ (con intercepto)	Máximo de $p$ (con intercepto)
Algas	0.789	0.0400	0.008	0.044
DBO	0.996	0.0100	0.003	0.006
$NH_3-N$	0.957	0.0018	0.001	0.038
Secchi	0.999	0.0016	0.002	0.008

Los modelos de detección remota presentados poseen el limitante de haber sido desarrollados con pocos puntos de medición y un único par jornada / imagen. Modelos de detección de aplicación extendida podrían ser desarrollados con un mayor número de pares imagen / jornada, en los que las mediciones de variables fisicoquímico-biológicas deberá ser lo suficientemente abundante.

Las distribuciones de las concentraciones de algas, DBO, nitrógeno amoniacal y profundidad Secchi generadas a partir de los modelos de detección desarrollados se presentan en la Fig. 8.

Fig. 8. Resultados de modelos de detección remota desarrollados.



Simulación de la Dinámica Diurna del Oxígeno Disuelto en el Embalse Cerrón Grande.

### B. Modelado acoplado

Las distribuciones de temperatura y oxígeno disuelto generadas por el modelo acoplado se presentan en la Fig. 9 según son dadas por el software Tdyn; estas distribuciones son resultado de simulaciones efectuadas con los valores determinados para los parámetros de calibración de los modelos de dinámica térmica y material, los cuales se presentan en la Tabla V.

Tabla V. Parámetros de calibración

Modelo	Parámetro	Estándar	Calibrado
Dinámica térmica	$c$	1.16	1.16
	$\beta$	0.8	0.8
	$\theta$	3.19	2
	$\gamma$	0.83	0.83
Dinámica material de oxígeno disuelto	Peso celular (pg/cel)	19.9-33	24.7

Las distribuciones generadas muestran marcadas similitudes de patrones entre la temperatura y la profundidad Secchi al igual que el oxígeno disuelto y la concentración de algas; a partir de ello se deduce que dichas variables fisicoquímicas-biológicas son las que ejercen mayor influencia en los resultados de los modelos mencionados respectivamente.

A la vez, es apreciable en la distribución del oxígeno disuelto el efecto de la carga contaminante de los tributarios, la cual se manifiesta con los trazos de baja concentración de oxígeno disuelto.

La Figura Fig. 9 presenta también las gráficas de comparación entre valores simulados y medidos para puntos y tiempos coincidentes entre la simulación y la jornada de medición del 28 de febrero. De ellas se observa que los modelos de dinámica térmica y material describen efectivamente la tendencia de las variaciones en las temperaturas y concentraciones de oxígeno disuelto reales.

Los valores de los índices estadísticos obtenidos se presentan en la Tabla VI.

Tabla VI. Índices estadísticos de modelos

Modelo	RSR	PBIAS	R <sup>2</sup>
Dinámica térmica	0.69	0.08	0.61
Dinámica material de oxígeno disuelto	0.89	0.72	0.24

Los valores de los índices RSR y PBIAS indican que los modelos operan con una baja magnitud media de error y prácticamente sin sesgo alguno.

Los valores del coeficiente de determinación R<sup>2</sup> muestran que el modelo de dinámica térmica supera al de dinámica material en términos de la capacidad de descripción de las variaciones de la temperatura y oxígeno disuelto medidos, el cual no cumple con los criterios presentados en las (Ec. 6) y (Ec. 8). Sin embargo, la gráfica de comparación del oxígeno disuelto medido y simulado en la Fig. 9 revela que el bajo valor de R<sup>2</sup> se debe únicamente a casos particulares.

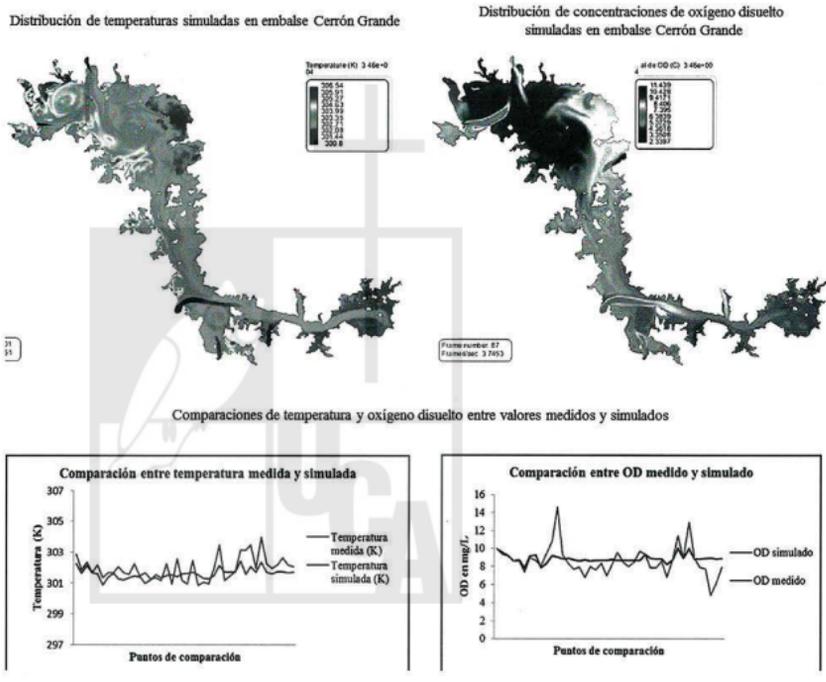
Los siguientes aspectos indican posibilidades de mejora del desempeño del modelo acoplado:

- Las distribuciones de variables fisicoquímicas-biológicas han sido generadas con pocos puntos de medición y además poco representativos del estado del embalse en la fecha a la que corresponden las mediciones de calibración
- Los parámetros cinéticos y pesos celulares utilizados en el modelo de producción neta de OD no son propios del embalse Cerrón Grande.

En general los resultados obtenidos indican que el modelo acoplado es capaz de representar la calidad del agua del embalse, sin embargo es necesario llevar a cabo muestreos más exhaustivos que suministren información precisa de la concentración de algas, DBO, nitrógeno amoniacal y profundidad Secchi.

Simulación de la Dinámica Diurna del Oxígeno Disuelto en el Embalse Cerrón Grande.

Fig. 9. Resultados de modelo acoplado y comparaciones de valores simulados y medidos en puntos y tiempos coincidentes.



Simulación de la Dinámica Diurna del Oxígeno Disuelto en el Embalse Cerrón Grande.

## IV. CONCLUSIONES

Los métodos de caracterización practicados son suficientes en tanto que brindan toda la información necesaria para el desarrollo completo del modelo; la detección remota ha probado ser un método integral para la caracterización espacial y fisicoquímica-biológica, que sustentado con amplia información de campo, permitiría la monitorización puramente remota del embalse Cerrón Grande.

Los resultados del procedimiento de calibración confirman la posibilidad de establecer un sistema de monitorización de niveles de oxígeno disuelto basado en un modelo acoplado. El desarrollo planteado en este estudio debe ser extendido con información de campo de mayor amplitud espacial y temporal que permita incluir fenómenos no considerados en la dinámica del oxígeno disuelto y validar su desempeño.

## V. REFERENCIAS

- [1] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. (2012 a). Catálogo de Zonas Críticas Prioritarias en Humedales Ramsar El Salvador, Plan de Mejoramiento de Humedales en El Salvador, San Salvador.
- [2] (2013) UT. [En línea]. Disponible en: <http://www.ut.com.sv/web/guest/reportes>.
- [3] HE, W., CHEN, S., LIU, X. y CHEN, J. (2008). Water quality monitoring in slightly-polluted inland water body through remote sensing –A case study in Guanting Reservoir, Beijing, China. *Environ. Sci. Engin.* 1. 1-11.
- [4] COLE M.T. y WELLS A. S. CE-QUAL-W2: a Two-Dimensional Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, version 3.2. p. B29-30, B-38.
- [5] (2013) NOAA. [En línea]. Disponible en: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/remotesensing.html>.
- [6] LI, R. y LI, J. (2004). Satellite Remote Sensing Technology for Lake Water Quality Monitoring: An Overview. *Environmental Informatics Archives.* 2. 893-901.
- [7] WU, G., LEEUW, J., LIU, Y., SKIDMORE, A. y PRINS, H. Comparison of MODIS and Landsat TM 5 Images for mapping tempo-spatial dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake, National Nature Reserve, China. *International Journal of Remote Sensing.* 29:8. 2183-2198.
- [8] RICHARDS, J. (2013). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin: Springer.
- [9] NASA (2007). *Landsat 7 Science Data Users Handbook*. Estados Unidos: NASA.
- [10] TRECSCOTT, A. (2012). *Remote Sensing Models of Algal Blooms and Cyanobacteria in Lake Champlain*. Environmental and Water Engineering Masters Projects. Artículo 48.
- [11] KUSTER, T. (2004). Quantitative detection of Chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Limnol. Oceanogr.* 49:6. 2179-2189.
- [12] ALBRIGHT, S., WINSTON, W. y ZAPPE, C. (2011). *Data Analysis and Decision Making*. Estados Unidos: South-Western Cengage Learning.
- [13] COMPASS. (2006). *Tdyn theoretical background*.
- [14] KIRK, J. (1994). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Australia: Cambridge University Press.
- [15] KAPETSKY, J.M. y NATH, S.S. (1997). Una Evaluación Estratégica de la Potencialidad para Piscicultura Delcaucicola en América Latina. FAO. COPESCAL. Documento Técnico. No. 10. Roma.
- [16] HENDERSON-SELLERS, B. (1984). *Engineering Limnology*. Pitman advance pub.
- [17] FRENCH R., COOPER, J. y VIGG, S. (1982). Secchi Disc Relationships. *Water Resources Bulletin.* 18(1). 121-123.
- [18] GUPTA, H. V. S. SOROOSHIAN, y P. O. YAPO. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4(2): 135-143.
- [19] SANTHI, C, J. G. ARNOLD, J. R. WILLIAMS, W. A. DUGAS, R. SRINIVASAN, y L. M. HAUCK. (2001). Validation of the SWAT Model on a Large River Basin With Point and Nonpoint Sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37(5): 1169-1188.

