

INTERCAMBIOS DE CALOR AGUA/SEDIMENTOS EN EL SISTEMA DE PRESAS ESPERANZA-SOLEDAD-SANTANA EN LA CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO

Jofre Meléndez Rodolfo¹, Ramos Arroyo Yann René² y Botello Rionda Salvador³

¹Doctorado en Ciencia y Tecnología del Agua, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez No. 77, Col. Centro, Guanajuato, Guanajuato, México. C.P. 36000

²División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez No. 77, Col. Centro, Guanajuato, Guanajuato, México. C.P. 36000

³Centro de Investigaciones en Matemáticas, A.C. Jalisco S/N, Col. Valenciana, Guanajuato, Guanajuato, México, C.P. 36240

rod_jm25@hotmail.com, yannramos2004@yahoo.com.mx, botello@cimat.mx

Introducción

Los flujos de calor que ocurren en una presa se dan entre la interfaz aire-superficie del agua ocurren como el resultado de intercambios de energía como son: radiación solar o radiación neta de onda corta, radiación neta de onda larga, flujos de calor latente por evaporación, y la transferencia convectiva del calor. Otros componentes podrían ser también considerados al realizar el balance de calor como la precipitación, fricción, etc., en donde según las características de la presa pueden ser fuentes significativas de energía (Webb *et al.*, 2008).

La componente que aporta en menor medida al balance de calor es la transferencia convectiva, la radiación neta aporta un 85 % del calor ganado y un 27 % del calor perdido, pero la mayor pérdida de energía se da por la evaporación con un aporte del 40 % del calor perdido (Figura 1) (Webb and Zhang, 2004).

En regiones extratropicales los procesos de intercambios de calor en las presas el 82 % de los intercambios se dan entre la atmósfera y la columna de agua de la presa, y aproximadamente un 15 % entre el agua de poro de los sedimentos y la columna de agua; el 3 % restante es energía intercambiada por otros procesos (McGregor and Petts, 1998; Caissie, 2006).

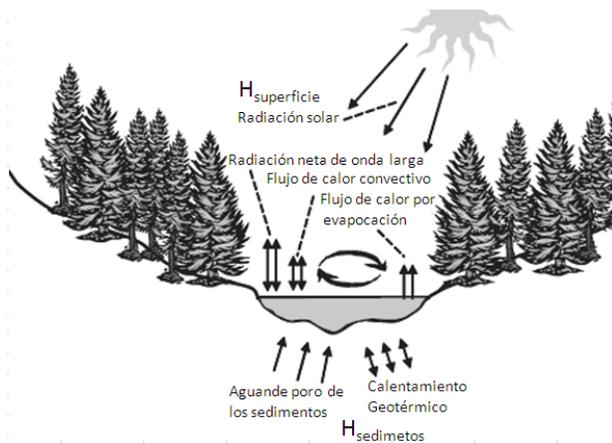


Figura 1. Procesos de intercambio de calor en una presa (modificado de Caissie, 2006).

Para presas pequeñas y situadas en zonas montañosas, en donde el efecto del viento y el sombreado son de consideración, el porcentaje de intercambio de calor entre la superficie y la atmósfera se reduce tomando mayor importancia los flujos de calor en la interface agua/sedimentos (Johnson, 2004). Esto ocurre en las presas de estudio.

Los intercambios de calor agua/sedimentos han recibido poca atención sobre todo en la perspectiva de la modelación, en donde algunos estudios incluso los desprecian, estos intercambios son importantes sobre todo en vasos de captación pequeños (Caissie, 2006; Webb *et al.*, 2008).

Los modelos de presas son utilizados para analizar la cantidad y la calidad del agua, las operaciones de sistema de presas, los sistemas de operación de reservorios, manejo conjunto de agua superficial y sedimentos, uso del agua y una serie de actividades de gestión de los recursos hídricos (Wurbs, 1998).

Estos modelos se utilizan para cuantificar el impacto de las estrategias de manejo de presas, vinculando las actividades humanas en la cuenca a la cantidad y calidad de la presa con el medio ambiente y la protección de los recursos hídricos (Mankin *et al.*, 1999).

La generación de modelos, calibración y procesamiento de datos han recibido gran atención a nivel mundial, mientras que la validación de modelos, la confiabilidad, la propagación de errores y el análisis de incertidumbre, no han sido tratados a fondo (Singh and Woolhiser, 2002).

Un problema latente para el futuro es el cambio climático global, el cual plantea que por el incremento de emisión de gases de efecto invernadero antropogénicos (GEI), la temperatura ambiente a nivel global ha incrementado aproximadamente 0.74 °C en 100 años (IPCC, 2007).

Dentro de su cuarto informe el IPCC indica que se ha detectado un calentamiento de lagos, presas y ríos en numerosas regiones, una de estas es la Mesa Central de México. Esto tiene efectos sobre la estructura térmica y la calidad del agua en las presas de la zona de estudio.

El IPCC prevé que si siguen las condiciones actuales de emisiones de GEI para el año 2080 habrá una disminución considerable de la precipitación en zonas áridas y semi-áridas dificultando la recarga de las presas, además el aumento de las temperaturas afectaría también las propiedades físicas, químicas y biológicas de éstas. Los

efectos del cambio climático sobre numerosas especies acuáticas y sobre la calidad del agua serían predominantemente adversos (IPCC, 2007).

El código de acceso libre CE-QUAL-W2 (Cole and Wells, 2008) es un modelo hidrodinámico de presas montado en el compilador FORTRAN, que acopla procesos hidrodinámicos y químicos (principalmente degradación de la materia orgánica y de eutroficación) para predecir el comportamiento de ríos, lagos y presas. Utiliza la aproximación numérica de diferencias finitas. La geometría es fundamental debido a la definición de zonas de mezclado o sedimentación, la confiabilidad de la simulación depende de la batimetría. La batimetría puede ser muy simplificada, lo más importante es la relación cota topográfica-volumen. Sin embargo, en la medida que considere las dimensiones reales: variación del ancho en un transecto, la orientación de los tramos y las profundidades; los procesos hidrodinámicos y de mezclado eólico serán más confiables. Las celdas resultantes del modelo batimétrico son láminas de grosor constante y se asume homogeneidad lateral por lo que es un modelo 2D que considera variaciones a lo largo y a profundidad del sistema. Con el uso de este código pueden derivarse balances hídricos, los tiempos de residencia del agua en el sistema, los perfiles de temperatura, flujos de calor y las tasas de acumulación de sedimentos (Debele *et al.*, 2006).

Zona de estudio

La cuenca del río Guanajuato está en el centro del Estado del mismo nombre, entre los 101° 02' W y 101°20' W y los 21°05' y 20°52', dentro de la cuenca del río Lerma (Figura 2). Esta cuenca se ubica entre dos provincias fisiográficas: la Mesa Central al norte y el Eje Neovolcánico Transversal al sur; la falla del Bajío es un límite entre ellas. Esta cuenca se encuentra en su mayor parte en la sub-provincia fisiográfica

conocida como Sierra de Guanajuato, la cual tiene una extensión de 100 km, con dirección NW-SE (Ramos-Arroyo *et al.*, 2012).

En la figura 2 también se aprecian las subcuencas que están relacionadas directamente con la zona urbana. La subcuenca ESS o Esperanza-Soledad-Santana, es la que mayor cantidad de agua recibe por las precipitaciones e importante debido a que se encuentran dos presas que abastecen de agua al 40 % de la población de Guanajuato (Ramos-Arroyo *et al.*, 2012).

En la figura 2 también se aprecian dos extensiones del área urbana: la que se muestra en gris claro, la ciudad hasta 1976; en gris oscuro se muestra la mancha urbana actual.

Metodología

En investigaciones anteriores del grupo de trabajo se había obtenido mediciones de profundidad de las presas Esperanza y Soledad en puntos de control, con lo que se obtuvo una batimetría real actualizada hasta el 2011, y además se cuenta con una batimetría preliminar de la presa Santana.

Además de contar con los datos de batimetría se obtuvieron, a partir de mediciones realizadas en años anteriores los datos de escurrimiento y temperatura del agua en las entradas principales para los meses de agosto y septiembre del 2005 (periodo de lluvias), y de febrero de 2014 (periodo de secas) para la presa Esperanza; de julio de 2007 (periodo de lluvias) para la presa Soledad; y de febrero de 2014 (periodo de secas) para la presa Santana.

Esos datos sirvieron como datos de entrada para correr el modelo CE-QUAL-W2 en las 3 presas para distintos periodos que presentan escurrimiento contrastante.

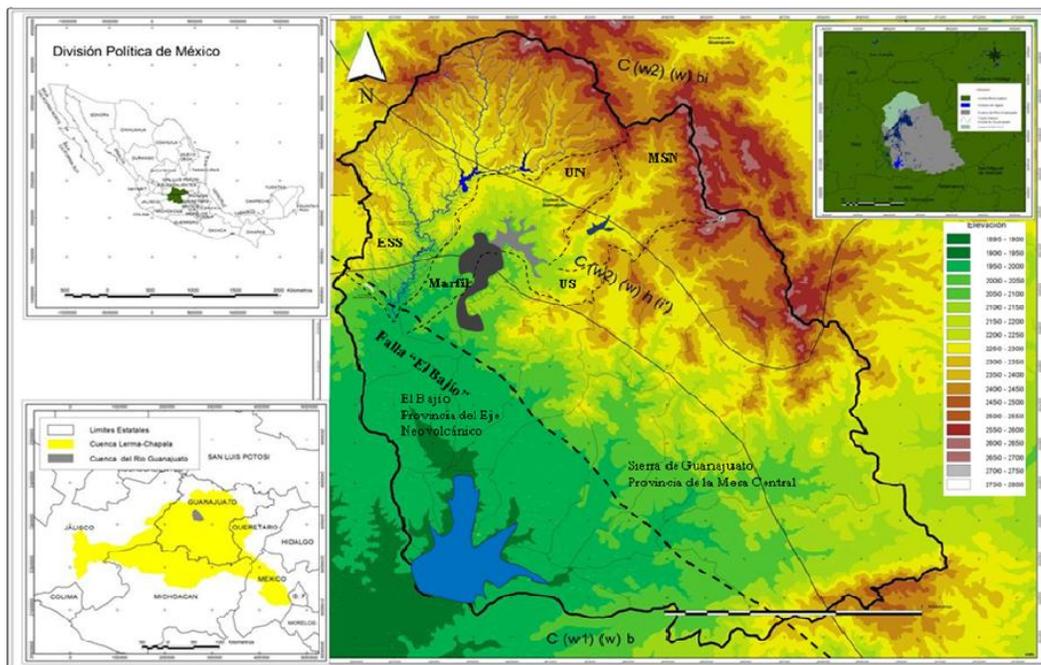


Figura 2. Localización geográfica de la cuenca río Guanajuato y sitios de importancia climática e hidrológica (Ramos-Arroyo *et al.*, 2012).

De igual forma se generó un modelo de temperatura y flujos de calor utilizando el método numérico de diferencias finitas en 1D con 3 fases (atmósfera, agua y sedimentos), utilizando datos medidos en la presa Santana durante abril de 2014 de temperatura del aire, temperatura de la superficie del agua y temperatura del agua sobre los sedimentos.

Resultados

La figura 3a muestra la presa Esperanza y la 3b muestra como el modelo CE-QUAL-W2 interpreta la morfología de la presa Esperanza, con 3 brazos y 19 segmentos. En la figura 3c se ve una vista vertical en donde se aprecian los 3 brazos, los 18 segmentos y las capas de cada uno.

De la misma forma la figura 4 muestra como el modelo CE-QUAL-W2 interpreta la morfología de la presa Soledad, la cual cuenta con 4 brazos y 20 segmentos.

La figura 5 representa la presa Santana y como es interpretada por el CE-QUAL-W2, esta presa cuenta con 5 segmentos y 1 brazo.

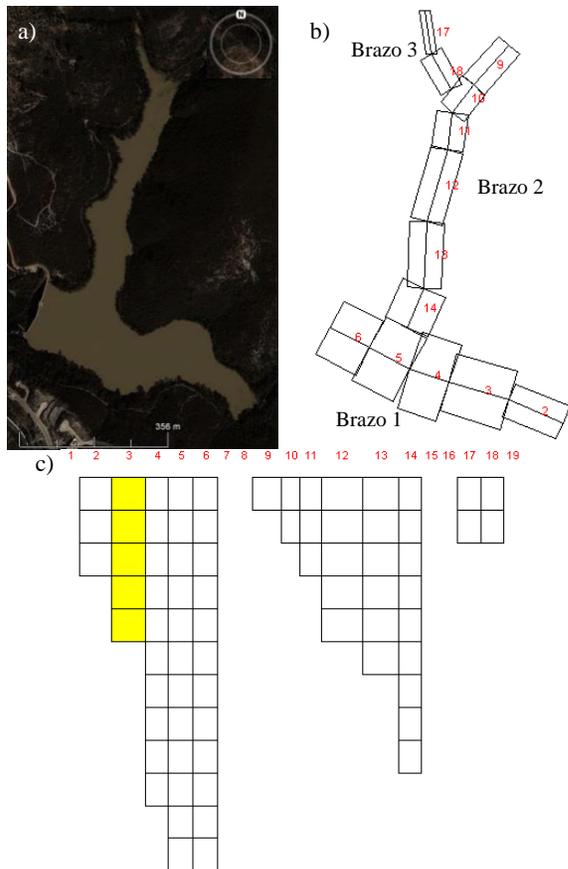


Figura 3. a) Presa Esperanza. b) Vista vertical. b) Vista horizontal.

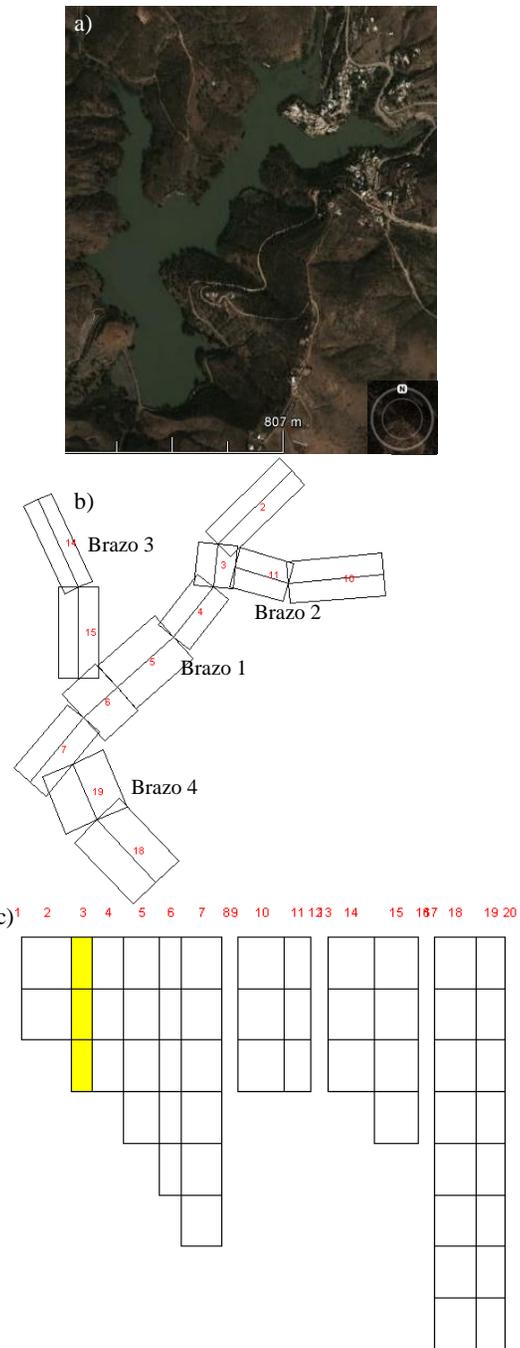


Figura 4. a) Presa Soledad. b) Vista vertical. b) Vista horizontal.

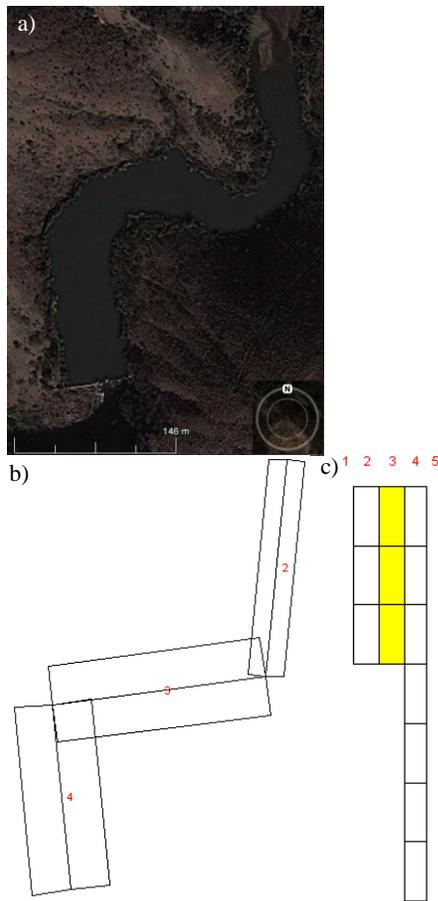


Figura 5. a) Presa Santana. b) Vista vertical. b) Vista horizontal.

La tabla 1 muestra las dimensiones de las presas Esperanza, Soledad y Santana en donde se ve que la presa que posee la mayor cantidad de volumen de almacenamiento es la Soledad, aunque es la presa que más volumen de sedimentos tiene. Aún así de la batimetría derivada la presa Esperanza es la que mayor profundidad tiene de las tres.

Tabla 1. Dimensiones de las presas Esperanza, Soledad y Santana.

Presa-cuenca	Área de captación de la cuenca [Km ²]	Volumen de lluvia media a la cuenca [Mm ³]	Superficie máxima de espejo de agua [Km ²]	V almacenamiento [Mm ³]	V sedimentos [Mm ³]	Fecha de construcción
Esperanza	17.45	13.92	0.15	0.96	0.54	1890
Soledad	28.16	34.3	0.34	2.5	1.7	1950
Santana	38.56	47.83	0.02	0.2	0.5	1860

Se obtuvieron contornos de temperatura para días representativos de cada periodo en cada presa (Figuras6-9).

Se puede observar en la figura 6 como en la presa Esperanza durante el periodo de lluvias la variación de la temperatura con la profundidad en el brazo 1 (canal principal) es de unos 3 °C, y se identifican 3 capas distintas, una cálida superficial no muy profunda, por debajo una más fría, y debajo una gran masa de agua profunda.

Durante estos meses hubo precipitaciones que, con el incremento del escurrimiento, provocaron mezcla y turbulencia en las presas, por lo que la temperatura en la presa se hace homogénea y por lo tanto los gradientes térmicos son bajos.

La figura 7 muestra que en el periodo de secas existe una fuerte estratificación de la temperatura en la presa Esperanza de más de 10 °C. Además se pueden identificar 3 zonas importantes, una zona caliente que se encuentra en la superficie y cerca de la cortina con 27 °C, otra zona un poco más fría que está en la superficie en la parte donde llega el río a la presa (con temperaturas entre 23 y 25 °C) y conforme avanza hacia la cortina se hunde por debajo de la primera capa más caliente, y finalmente hay una tercera zona más profunda con una fuerte estratificación térmica y un gradiente de temperatura de 2.6°C/m y temperaturas que van desde 25 °C hasta 11 °C en la parte más profunda.

En la presa Soledad durante el periodo de lluvias (Figura 8) se puede ver una cierta estratificación aunque el gradiente de temperatura no es muy alto, de apenas unos 0.71 °C/m, con una temperatura máxima de 21 °C y mínima de 16 °C. Esto indicaría que la presa presenta mezcla vertical aunque no tan marcada como en la presa Esperanza.

En la presa Santana durante época de secas (Figura 9) se aprecia estratificación térmica de unos 8 °C en toda la presa y con un gradiente de temperatura de 1.14 °C/m. Se observa que la estratificación está presente aunque no es tan intensa como en la presa Esperanza, en este caso la temperatura máxima que se presenta es de 20 °C y la mínima de 12 °C.

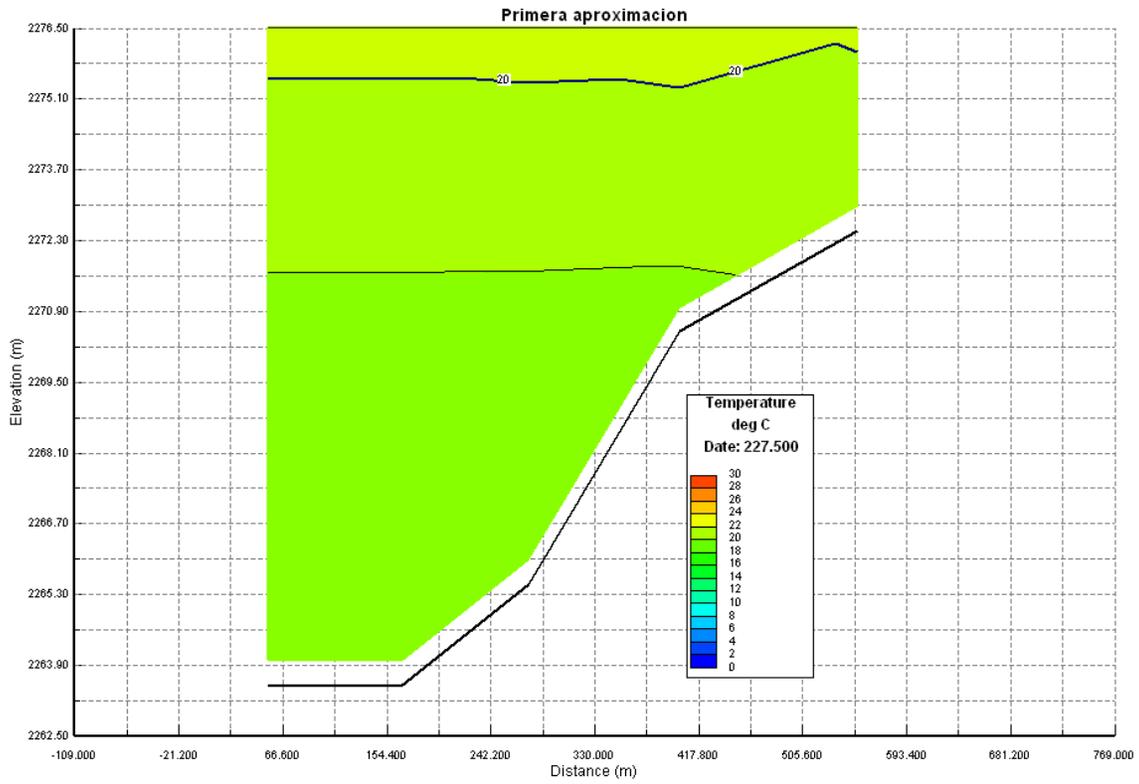


Figura 6. Distribución vertical de la temperatura en la presa Esperanza para el brazo 1 el día 15/08/05.

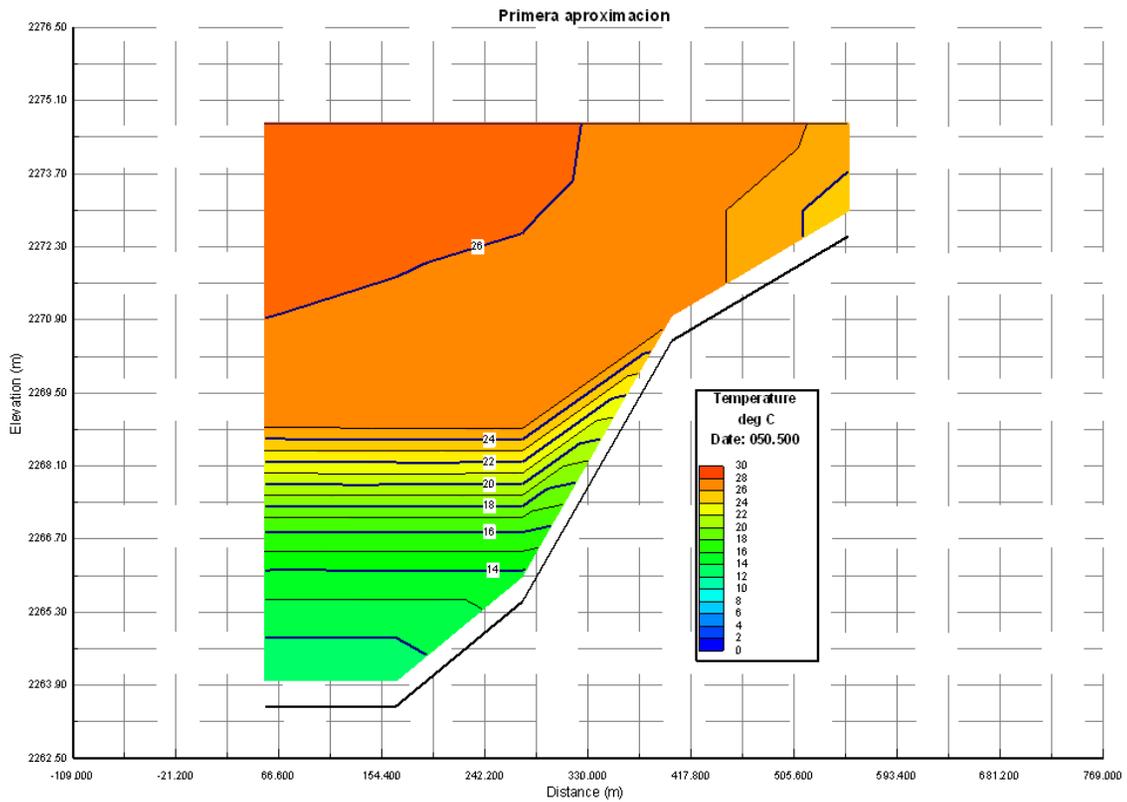


Figura 7. Distribución vertical de la temperatura en la presa Esperanza para el brazo 1 el día 19/02/14.

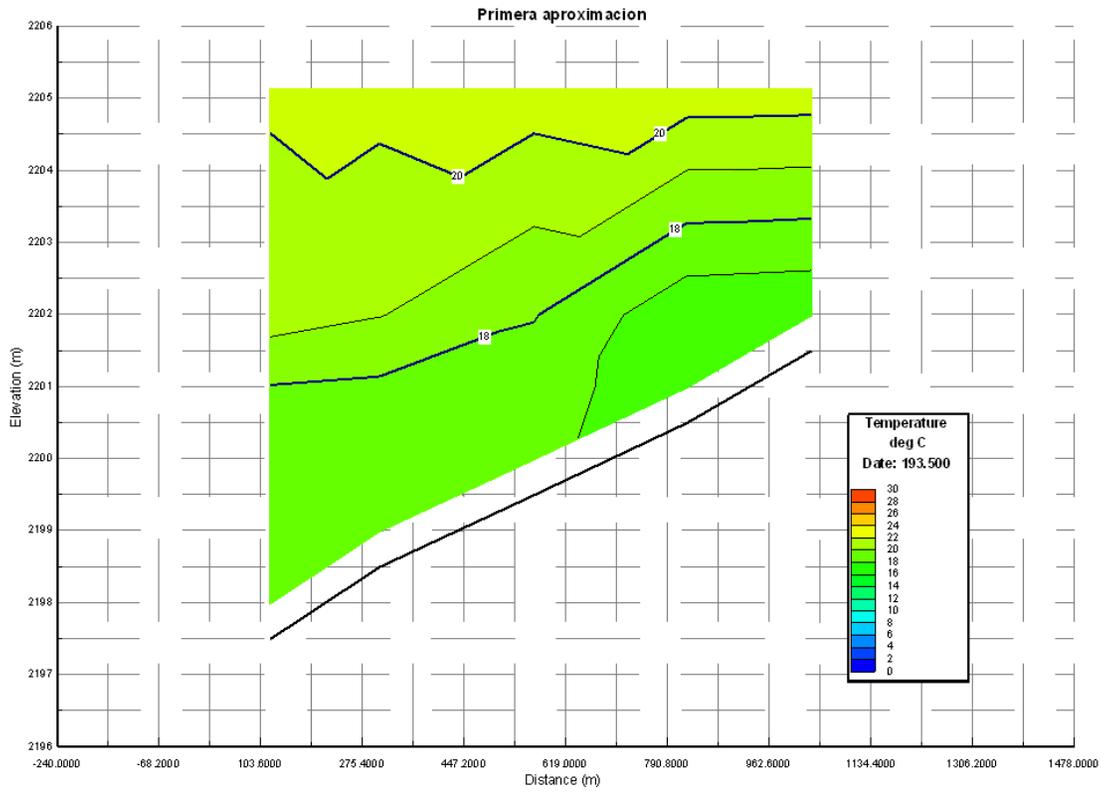


Figura 8. Distribución vertical de la temperatura en la presa Soledad para el brazo 1 el día 12/07/07.

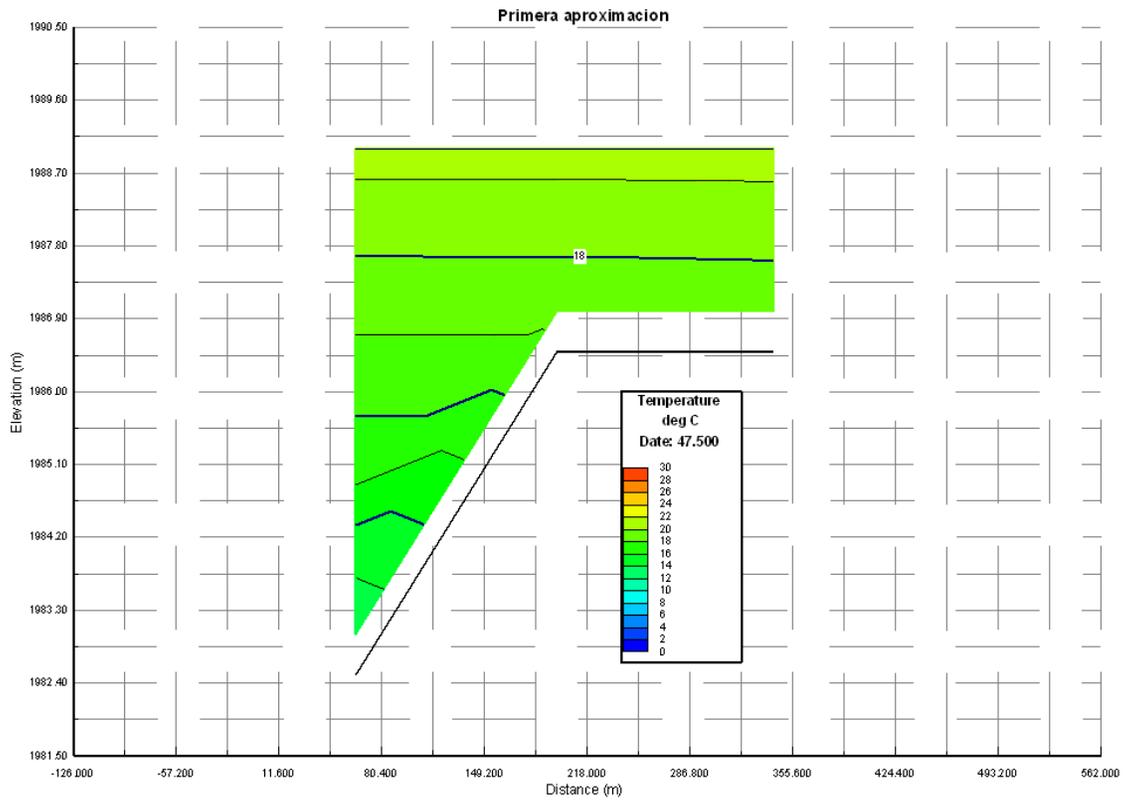


Figura 9. Distribución vertical de la temperatura en la presa Santana para el brazo 1 el día 16/02/14.

La figura 10a muestra la distribución de la temperatura que le correspondería a una columna de agua en la presa Santana. La figura 7b muestra los flujos de calor en la misma columna. Se puede observar que cerca de las interfaces los intercambios de calor se intensifican. Siendo mayores en la interfaz atmósfera/agua que en la interfaz agua/sedimentos.

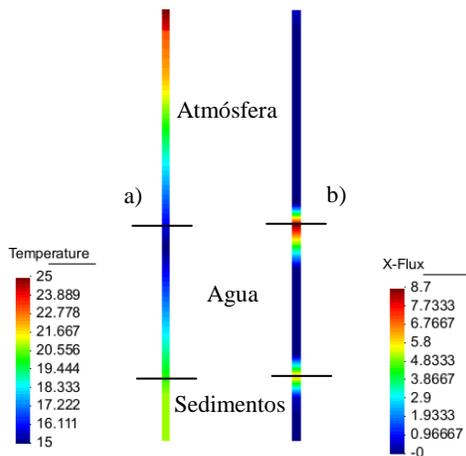


Figura 10. a) Distribución de la temperatura en la columna (°C). b) Flujos de calor en la columna (W/m²).

Conclusiones

En la época de lluvias existe dentro de las presas una capa superficial más caliente producto de la radiación directa que recibe el reservorio durante el día, una capa intermedia que es una lámina donde existe mucha turbulencia debida al escurrimiento, y por último una gran capa más fría y profunda. Cabe destacar que en este periodo la presa se encuentra muy mezclada.

Durante la época de secas existe una zona superficial que se mantiene más caliente debido a la radiación solar que recibe y a que prácticamente no hay escurrimiento, por lo que esta zona se mantiene estática. Hay una segunda zona que recibe un flujo base constante y que provoca que cerca del río que llega a las presas la temperatura sea un poco menor, y por último hay una tercera zona fuertemente estratificada térmicamente en donde los intercambios de calor que se dan dentro de la presa son más intensos debido a un gradiente térmico elevado.

La presa Esperanza es la de mayor profundidad y además recibe un flujo de entrada mayor, en comparación con las presas Soledad y Santana. Esto provoca que el mezclado durante la época de lluvias y la estratificación durante la época de secas sea más marcada que en las otras dos presas.

Usar modelos hidrodinámicos puede ser bastante útil para la planeación y manejo de presas al poder reproducir además del flujo, zonas de turbulencia y acumulación de sedimentos, así como su comportamiento térmico, con lo que también se puede derivar la composición química, y así poder ubicar zonas de acumulación de contaminación o zonas con una mayor concentración de peces.

Es importante destacar que, aunque son mayores los flujos de calor entra la interfaz atmósfera/agua, son también de magnitud importante los intercambios en la interfaz agua/sedimentos. Es por eso que es importante seguir haciendo investigaciones sobre flujos de calor en esta última interfaz sobretodo en presas pequeñas como las que hay en la zona de estudio, en donde adquieren mayor importancia.

Referencias

CAISSIE, D. The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, 2006, pp. 1-18.

COLE, T.M. and WELLS, S.A. *CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.6*. Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University. Portland, 2008, 715 pp.

DEBELE B., SRINIVASAN, R. and PARLANGE, J.Y. Couplin gup land watershed and downstream waterbody hydrodynamic and wáter quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better wáter resources management in complex river basins. *Environmental Modeling Assessment*, 2006.

IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Sui., 2007, 103pp.

JOHNSON S.L. Factors influencing stream temperatures in small streams: substrate effects and a shading experiment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 61, num. 6, 2004, pp. 913-923.

MANKIN, K.R.; KOELIKER, J.K. AND KALITA, P.K. Watershed and lake wáter quality assessment: An integrated modeling approach. *Journal of WaterResourcesAssociation*, Vol. 35, num. 5, 1999, 1069-1088 pp.

MCGREGOR, G.R. and PETTS, G.E. River energy budgets with special reference to river bed processes. *Hydrological Processes*, Vol. 12, 1998, pp. 575-595.

RAMOS-ARROYO, Y.R.; MARTÍNEZ-ARREDONDO, J.C.; ORTEGA-CHAVÉZ, V. AND JARAMILLO, J. Descripción de la variación espacial de parámetros climáticos de la cuenca del Rio Guanajuato (En revision), 2012.

SINGH, V.P. and WOOLHISER, D. A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, pp. 270-292.

WEBB, B.W. and ZHANG, Y. Inter-annual variability in the non-advective heat energy budget of Devon streams and rivers. *Hygical Processes*, Vol. 18,2004, pp. 2117-2146.

WEBB, B.W., HANNAH, D.M., MOORE, R.D., BROWN L.E. and NOBILIS, F. Recent advances in stream and river temperatura research. *Hydrological Processes*, Vol. 22, 2008, pp. 902-918.

WURBS, R.A. Dissemination of generalized wáter resources models in the United States. *Water International*, Vol. 23, 1998, 190-198 pp.