

COMPARACIÓN DE MODELOS DINÁMICOS DISTRIBUIDOS Y AGREGADOS DE TRÁNSITO DE CAUDALES Y CALIDAD DEL AGUA. CASO DE ESTUDIO: RÍO MAGDALENA (COLOMBIA)

Óscar S. Galindo y Luis A. Camacho

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Carrera 1 No 18A-12, Bogotá, Colombia.
E-mail: os.galindo754@uniandes.edu.co, la.camacho@uniandes.edu.co

Introducción

La mayoría de los modelos dinámicos de calidad del agua en corrientes superficiales (e.g. WASP, HEC-RAS, MIKE 11) están basados en modelos distribuidos de tránsito hidráulico y de transporte de solutos. Estos modelos por lo general se aplican en forma satisfactoria a nivel de evento horario o diario en tramos independientes de ríos. No obstante, otros autores (e.g. Withehead *et al.*, 1997; Rodríguez *et al.*, 2018) han estudiado la posibilidad y las ventajas de desarrollar modelos agregados dinámicos de tránsito hidrológico y calidad del agua, en aplicaciones de intervalos de tiempo continuo semanales, mensuales e incluso anuales, o en redes y sistemas de canales complejos. El marco jerárquico de modelación propuesto por Camacho (2000) y Camacho y Lees (2002) contempla el acople y las relaciones paramétricas desarrolladas, utilizando la técnica de igualación de momentos temporales, entre modelos agregados y distribuidos de tránsito de caudales y transporte de solutos (Fig. 1).

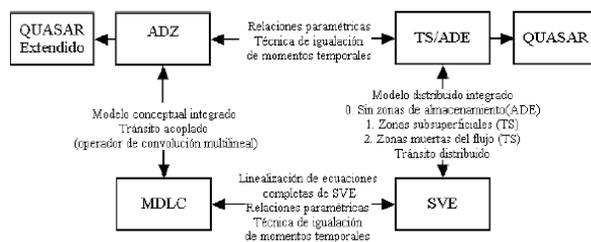


Figura 1.- Marco jerárquico de modelación del transporte de solutos en flujo no permanente propuesto por Camacho (2000).

Los modelos de transporte de solutos Aggregated Dead Zone (ADZ, Beer y Young, 1983) y Transient Storage (TS, Bencala y Walters, 1983), que corrige la ecuación de advección-dispersión (ADE, Taylor, 1954) han sido comparados ampliamente por Lees *et al.*, (2002) y Hernández y Camacho (2012). Por su parte modelos de tránsito hidráulico basados en las ecuaciones completas de Saint Venant, (SVE, Fread, 1985) y el modelo de tránsito hidrológico Multilineal Discreto de Retraso y Cascada (MDLC, Camacho y Lees, 1999) han sido comparados satisfactoriamente por Camacho y Lees (1999) y Rogéliz (2007).

El modelo agregado ADZ-MDLC se ha acoplado con el modelo dinámico de calidad del agua QUASAR (Whitehead *et al.*, 1997) extendido por Lees *et al.*, (1998). El modelo dinámico resultante (AMQQ) ha sido aplicado en el río Bogotá (UNAL-EAAB, 2009) y los ríos urbanos de la ciudad de Bogotá (UNIANDES-SDA, 2016) entre otros casos. Las aplicaciones incluyen sistemas hídricos complejos y simulaciones continuas de series de tiempo semanal, mensual y anual.

Objetivos y alcance

En este trabajo se comparan rigurosamente en términos de precisión y eficiencia numérica dos modelos dinámicos de calidad del agua, el modelo agregado AMQQ, y el modelo comercial distribuido HEC-RAS vs. 5.0. La comparación se realiza mediante la aplicación de los modelos en el Río Magdalena-Colombia, en un tramo de 317 kilómetros de longitud, comprendido desde el municipio de Purificación en el departamento de Tolima, hasta Puerto Triunfo en el departamento de Antioquia.

Metodología

La metodología seguida en el presente trabajo incluyó los siguientes pasos.

- 1) Calibración del modelo hidrológico MDLC programado en Matlab (The MathWorks, 2016) extendido para considerar desborde lateral (Galindo, 2017) utilizando datos de caudales diarios en el periodo 1995-1999. En el tramo de estudio Palermo –Puerto Wilches de 804 kilómetros de longitud se utilizan los datos disponibles de 51 estaciones limnométricas y limnigráficas (IDEAM-Colombia) sobre el río Magdalena y ríos afluentes. Para el proceso de calibración se utiliza la metodología GLUE (Beven y Binley, 1992) basada en simulaciones de Montecarlo que se analizan con la herramienta MCAT (Wagener y Lees, 1999). Se calibran cuatro parámetros en cada subtramo, coeficiente de rugosidad n -Manning, pendiente longitudinal efectiva, ancho efectivo del canal y coeficiente de descarga de vertedero lateral para considerar desborde de la sección transversal.
- 2) Verificación del modelo agregado con los parámetros calibrados con datos de caudales diarios para el periodo 2000-2004.
- 3) Utilización de los parámetros calibrados del modelo agregado MDLC en el modelo distribuido HEC-RAS. Esto es posible dado que el modelo agregado fue desarrollado a partir de la linealización de las ecuaciones de Saint Venant, y por lo tanto los parámetros tienen el mismo significado físico en ambos modelos.
- 4) Evaluación de la eficiencia de cada modelo en términos de la bondad de ajuste de los resultados de los modelos a los datos observados por medio del coeficiente de determinación de Nash (Nash y Sutcliffe, 1970).
- 5) Acople de los modelos MDLC-ADZ y comparación con la ecuación ADE en HEC-RAS. Para la comparación se utiliza una fracción dispersiva de 0.4 y un coeficiente de dispersión longitudinal calculado con la ecuación propuesta por Hernández y Camacho (2012), obtenida mediante la técnica de igualación de momentos temporales.

- 6) Calibración de los parámetros del modelo de calidad del agua convencional QUAL2Kw (Pelletier *et al.*, 2006) para condiciones de estado estable con datos tomados en dos campañas de mediciones de calidad del agua siguiendo la misma masa de agua (UNIANDÉS-ACUAGYR, 2004; Galindo, 2017).
- 7) Comparación de los dos modelos dinámicos de calidad del agua con los parámetros calibrados para una serie sintética de 5 años en el tramo de 317 kilómetros de longitud. En particular se compara el nivel de correspondencia entre los modelos dinámicos de calidad del agua mediante la eficiencia del modelo agregado para explicar la respuesta del modelo HEC-RAS. Por último se evalúa la eficiencia numérica de ambos modelos mediante la diferencia del tiempo de ejecución.

Resultados

En la Tabla 1 se presenta el resumen de los resultados de calibración del modelo de tránsito de caudales MDLC sin incluir, e incluyendo, desborde lateral en el tramo Palermo-Puerto Wilches de 804 kilómetros (Paso 1 de la metodología). En la Tabla 1 se incluye la eficiencia de Nash del modelo HEC-RAS que utiliza las ecuaciones completas de Saint Venant (SVE) con los parámetros calibrados del modelo agregado MDLC y el tiempo de cada corrida (T_s) en minutos. Nótese la alta eficiencia lograda en calibración con R^2 mayores a 0.83 y la mayor eficiencia numérica del modelo agregado que corre en 1/8 del tiempo del modelo distribuido.

Tabla 1.- Resultados de los modelos MDLC y HEC-RAS- SVE.

Sub-tramo	Distancia (Km)	MDLC R^2	SVE R^2	MDLC T_s (min)	SVE T_s (min)
Palermo – Puerto Wilches (sd)	804	0.88	0.83	0.25	2
Palermo – Puerto Wilches (cd)	804	0.91	0.86	0.25	2

En la Fig. 2 se presentan algunos resultados de calibración del modelo QUAL2Kw para condiciones de estado estable (Paso 6 de la metodología). Específicamente se presentan los resultados de las especies de nitrógeno orgánico, amoniacal y nitratos. Nótese como el modelo de calidad del agua representa adecuadamente la nitrificación en el tramo de estudio de estudio de 317 kilómetros de longitud (disminución del nitrógeno orgánico y aumento de los nitratos). En la Fig. 3 por su parte se presentan los resultados completos de los modelos dinámicos AMQQ y HEC-RAS para una serie de datos sintéticos de 5 años (Paso 7). En la Tabla 2 se incluyen los coeficientes de Nash R^2 para cada uno de los determinantes de calidad del agua. Estos valores representan la eficiencia con la cual el modelo agregado explica los resultados del modelo distribuido. Nótese que esta eficiencia es mayor a 0.8 para la mayoría de determinantes modelados.

Tabla 2. Eficiencia de comparación modelos AMQQ y HEC-RAS.

Determinante	R^2
Temperatura	0.95
Conductividad	0.98
Oxígeno Disuelto	0.85
Demanda Bioquímica de Oxígeno	0.87
Nitrógeno Amoniacal	0.79
Nitratos	0.71
Fósforo Orgánico	0.92
Fósforo Inorgánico	0.93

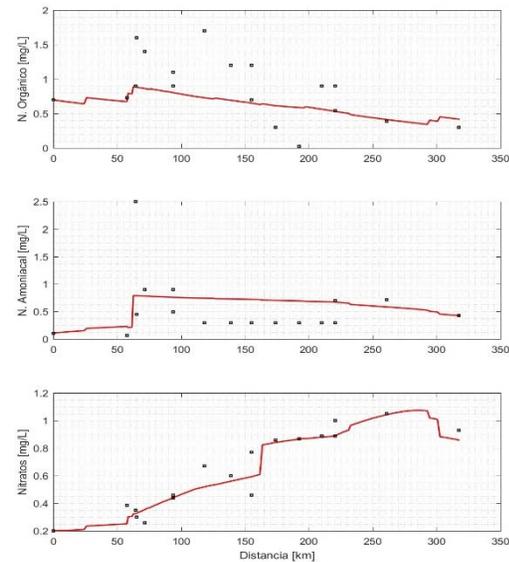


Figura 2.- Resultados de calibración del ciclo de nitrógeno modelo QUAL2Kw en condiciones de estado estable.

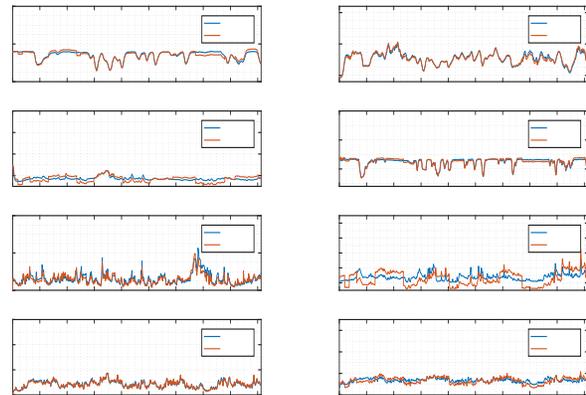


Figura 3. Comparación de las respuestas de algunos determinantes en los modelos dinámicos de calidad del agua AMQQ y HEC-RAS.

Conclusiones

Ambos modelos son capaces de representar los procesos físicos y químicos del Río Magdalena con gran similitud (R^2 global de 0.88), siendo el modelo agregado AMQQ más eficiente numéricamente. Al utilizar los parámetros calibrados rigurosamente del modelo agregado MDLC, en el modelo distribuido HEC-RAS se obtiene una muy buena representación de los datos con un alto coeficiente de determinación. Como el primer modelo es más eficiente numéricamente es posible calibrarlo utilizando simulaciones de Monte Carlo. El modelo dinámico agregado de calidad del agua es una alternativa eficiente numéricamente y suficientemente precisa que permite describir los mecanismos de transporte y de transformación de la calidad del agua en una red compleja de canales para periodos de tiempo continuo semanales, mensuales o anuales.

Referencias

Camacho, L. A., y Lees, M. J. (1999). Multilinear discrete lag-cascade for channel routing. *Journal of Hydrology*, 226, No. 1-2, 30-47.