

Aplicación de dos modelos de simulación de temperatura del agua en el río Fenton-Storrs-Connecticut

Application of two stream water temperature simulation models in the Fenton River-Storrs-Connecticut

Juan M. Stella¹

¹Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, México, juan.stella@itesm.mx

Correspondence author: Juan M. Stella, juan.stella@itesm.mx

Resumen

En esta investigación se desarrolló un modelo basado en parámetros físicos WTS (Water Temperature Simulation) para predecir los cambios de temperatura del agua en una corriente en el noreste del estado de Connecticut, Estados Unidos, en la temporada del verano. El modelo se calibró y validó durante la temporada de bajos caudales en el río de Fenton, tributario del lago Mansfield Hollow. La temperatura del agua se midió en intervalos de una hora durante el verano de 2004 y 2005 en varios lugares, para obtener datos a lo largo del río en cuanto a la calibración y comprobación del modelo. Los resultados de la aplicación de los modelos se probaron contra temperaturas observadas en el río y con el modelo de *SSTemp* (*Stream Segment Temperature model*) creado por Bartholow (2002). Los resultados muestran que ambos modelos pueden ser utilizados para la predicción de cambios de temperatura en el río y podrían ser empleados para valorar cambios

de temperatura debido a la extracción de agua subterránea, así como crear escenarios para la gestión de los recursos hídricos.

Palabras clave: SSTemp, WTS, temperatura, simulación, río, Nueva Inglaterra.

Abstract

In this research, the physically-based WTS (Water Temperature Simulation) model was developed to predict water temperature changes in a river in eastern Connecticut during the summer. The model was applied and calibrated with a one-hour time step during the summer's low-flow season on the Fenton River, which is tributary of the Mansfield Hollow Lake. Temperatures were recorded at one-hour intervals during the summer in 2004 and 2005, at various locations along the river to provide data for the model's calibration. Model results were tested against observed stream temperatures and also compared to the SSTemp (Stream Segment Temperature model) created by Bartholow (2002). Results show that both models can be used to predict changes in stream temperature due to changes in groundwater inflow/outflow, and could be used to assess various water management scenarios.

Keywords: SSTemp, WTS, temperature, simulation, stream, New England.

Fecha de recibido: 28/07/2016

Fecha de aceptado: 13/07/2017

Introducción

La predicción de los cambios de temperatura del agua en un río debidos a la variación de los caudales y la ubicación de la cubierta vegetal a lo largo del río, así como los cambios antrópicos, son frecuentemente necesarios para evaluar los impactos de las posibles decisiones de manejo relacionadas con la vida de los peces en un río (Poole & Berman, 2001). Aunque las temperaturas diarias promedio son útiles, muchas veces los cambios horarios son críticos, incluyendo las

temperaturas máximas y mínimas, creando la necesidad de simular temperaturas usando una escala de tiempo menor a un día (Stella, 2007). Se han desarrollado una serie de modelos para predecir las temperaturas en una corriente de agua. Muchos de los modelos dinámicos y físicamente basados requieren un extenso número de datos y amplia calibración; la mayoría también se desarrolló para sistemas de ríos con grandes caudales, a fin de evaluar alternativas de manejo, como impactos de desvíos de agua (Stella, 2007). El modelo de temperatura de base física SSTemp (Bartholow, 2002) es una versión simplificada del modelo de temperatura SNTemp creado por Theurer (Theurer, Voos, & Miller, 1984). Sólo se han hecho dos estudios utilizando modelos de simulación de la temperatura del agua en pequeños caudales en condiciones de bajo flujo como el río Fenton. Uno de ellos se realizó en el río Truckee, California, Estados Unidos, utilizando el modelo RTS (Rowell, 1975), con un intervalo de tiempo mensual (Deas, 2000). El otro estaba en el río Chama, Nuevo México, usando el modelo de SSTemp con un paso diario del tiempo (Surface Water Quality Bureau, 2003). El modelo de simulación de la temperatura del agua (WTS, Water Temperature Simulation) es el único que utiliza un paso de tiempo por hora para simular la temperatura del agua en condiciones de bajo caudal, típicas de las temporadas de verano en Nueva Inglaterra (Stella, 2007). Stella (2007) desarrolló un modelo de simulación de temperatura de agua (WTS) de base física, simple, y en función de los flujos de agua y energía, usando un enfoque dinámico para aplicar a ríos con caudales moderados como el río Fenton, en Connecticut, utilizando un paso de tiempo de una hora. El propósito de esta investigación fue aplicar dos modelos matemáticos dinámicos de simulación de temperatura del agua WTS y SSTemp para predecir los cambios en la temperatura del agua en ríos pequeños y de flujo libre. El río Fenton, localizado en el este de Connecticut, es uno de esos ríos, donde los flujos de verano y las variaciones de temperatura extremos son especialmente críticos para los organismos acuáticos, incluyendo la trucha (Warner, Ogden, Bagtzoglou, & Parasiewicz, 2006).

Materiales y métodos

Descripción del lugar de estudio

El río Fenton se encuentra en el este del estado de Connecticut, Estados Unidos (Figura 1), y es uno de los tres afluentes de tercer orden que entran en lago Mansfield Hollow. Los otros dos tributarios son los ríos Mount Hope y Natchaug. La cuenca del río Fenton tiene una longitud total de 22.8 km y una zona de drenaje de 88.9 km² (Warner *et al.*, 2006) aguas arriba del lago Mansfield Hollow. El lugar de interés para este estudio se extiende desde el puente Old Turnpike hasta el puente de Chaffeeville, con una distancia total de 4 040 km.

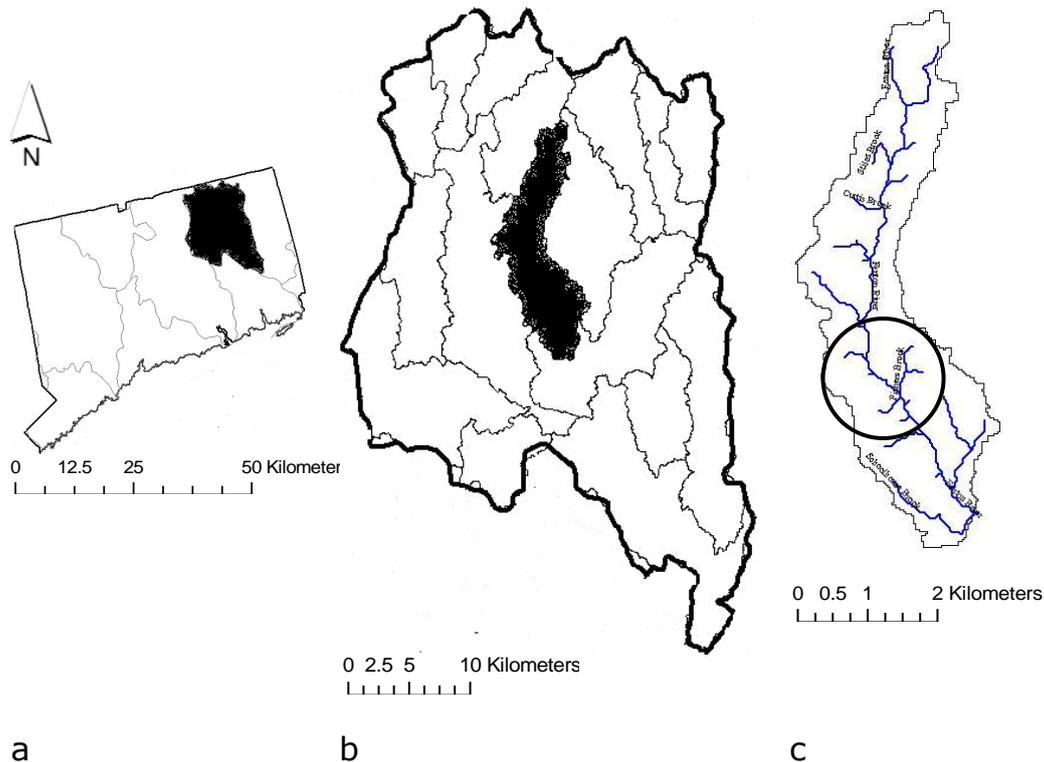


Figura 1. a) El estado de Connecticut y la cuenca oeste del río Thames en negro; b) La cuenca oeste del río Thames y la cuenca del río Fenton en color negro; c) La cuenca del río Fenton y el área de estudio en un círculo.

El área de las tierras altas de la cuenca del río Fenton se caracterizan por lagunas glaciales con pendientes moderadas que drenan hacia los valles de los ríos típicamente llenos de depósitos glaciales de sedimento formadas por capas estratificadas de arenas y gravas (Warner *et al.*, 2006). El flujo base de la corriente durante los periodos sin lluvias en verano es generalmente alimentado por el agua subterránea de los materiales estratificados a lo largo del río (Warner *et al.*, 2006). La precipitación media anual en el noreste de Connecticut es de aproximadamente 1 140 mm (USGS, 1998), mientras que el promedio de escorrentía es de unos 631 mm basado en medidas de

caudales en el observatorio USGS # 01121000 localizado en el río Mount Hope cerca de Warrenville, CT (USGS, 1998). Se supone que la diferencia de 509 mm es la evapotranspiración, la tasa de infiltración y el volumen de agua almacenado dentro de la cuenca. Las especies de peces más populares por orden de abundancia en el río Fenton son *Rhinichthys atratulus*, *Catostomus commersoni*, *Semotilus corporalis* y *Etheostoma olmstedii* (Warner et al., 2006).

Métodos

Los datos de campo necesarios para aplicar y calibrar los modelos WTS y SSTemp incluyen el caudal de agua del río, la temperatura del agua, las secciones transversales de los ríos y la densidad de la vegetación. Los datos meteorológicos necesarios para ejecutar el modelo, como la radiación solar, el aire y las temperaturas del suelo, se obtuvieron de la estación meteorológica de la Universidad de Connecticut, en la granja de Agronomía, 5 km al sur de la zona de estudio. Se monitorearon cinco lugares en tres diferentes sitios con distintas condiciones de cubierta vegetal, caudales y temperaturas dentro de la zona de interés a lo largo del río Fenton y los datos se registraron a intervalos de tiempo de una hora. El primer sitio se extiende desde el puente Old Turnpike hasta 120 m aguas abajo, conocido como Turnpike. El segundo sitio se extiende desde el extremo superior de la pradera hasta el extremo aguas abajo de ellas, 822 metros de largo, que se conoce como Meadows. El tercer sitio es el puente Old Turnpike hasta el extremo aguas abajo de Meadows, con una distancia total de 1.948 km, que se conoce como Turnpike-Meadows. La cubierta vegetal del sitio de Turnpike es una zona boscosa de alta densidad mientras que el sitio de Meadows es una superficie de pradera; el sitio de Turnpike-Meadows tiene condiciones mixtas de la cubierta con el área boscosa de alta densidad del Puente Old Turnpike y Meadows con superficie de prados.

Modelo de simulación de temperatura del agua WTS, teoría y asunciones

El modelo de simulación de la temperatura del agua (WTS) acopló dos componentes (Stella, 2007), un balance hídrico y un balance

energético, utilizando el *software* STELLA® (Onset Computer Company, 2006) como soporte computacional dinámico. El desarrollo de las ecuaciones que describen los flujos de masa y energía necesarios para desarrollar el modelo matemático se obtuvieron de Stella (2007).

Modelo de simulación de temperatura del agua SSTemp, teoría y asunciones

El modelo SSTemp supone sólo un sistema unidimensional y mixto que incluye el flujo de calor y el transporte de calor para calcular la temperatura del agua en un tiempo determinado que por lo usual es un día (Sansone & Lettenmaier, 2001). La geometría media del río se utiliza como condición de borde para los cálculos a menos que haya una presa en la corriente. La entrada lateral de agua desde un cauce tributario se distribuye de manera uniforme a lo largo de la longitud del segmento (Bartholow, 2002). El modelo SSTemp utiliza un paso de tiempo de un día y todas las entradas se dan en términos de un valor diario y no permite que el número de Manning ni el tiempo de viaje varíen en función del flujo (Surface Water Quality Bureau, 2003). Los procesos físicos en SSTemp incluyen convección, conducción y evaporación, así como la transferencia de calor hacia o desde el aire (radiación de onda larga), radiación solar directa (onda corta) y radiación reflejada de vuelta del agua.

Resultados y discusión

Simulación de temperatura del agua

La Figura 2 muestra las temperaturas por hora observadas y las simuladas por SSTemp, WTS en el sitio Turnpike del 1 de julio al 19 de agosto de 2004.

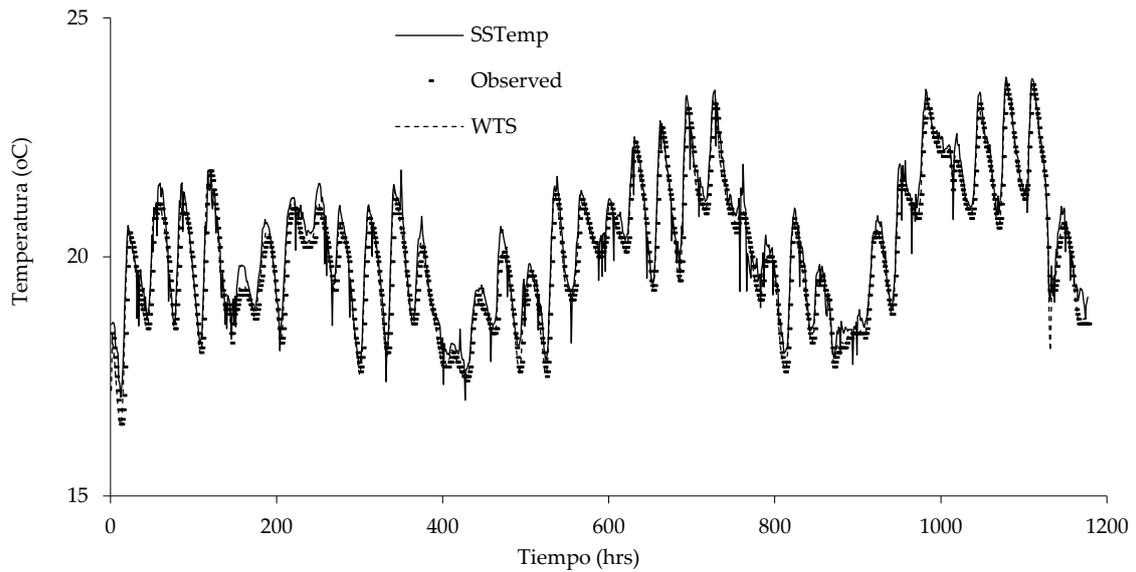


Figura 2. Temperatura del agua observada y simulada por SSTemp y WTS en Turnpike desde el 1 de julio al 19 de agosto de 2004.

La Figura 3 muestra las temperaturas por hora observadas y las simuladas por SSTemp, WTS en el sitio Turnpike-Meadows del 12 al 23 de julio de 2004.

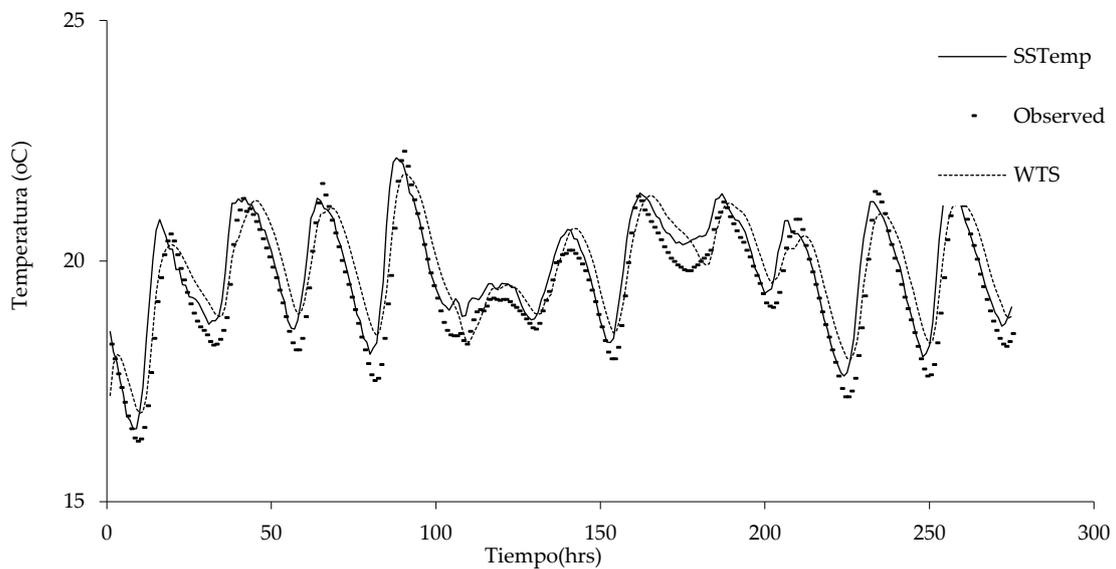


Figura 3. Temperatura del agua observada y simulada por SSTemp y WTS en Turnpike-Meadows del 12 al 23 de julio de 2004.

La Figura 4 muestra las temperaturas por hora observadas y las simuladas por SSTemp, WTS en el sitio Meadows del 2 de agosto al 3 de septiembre de 2005.

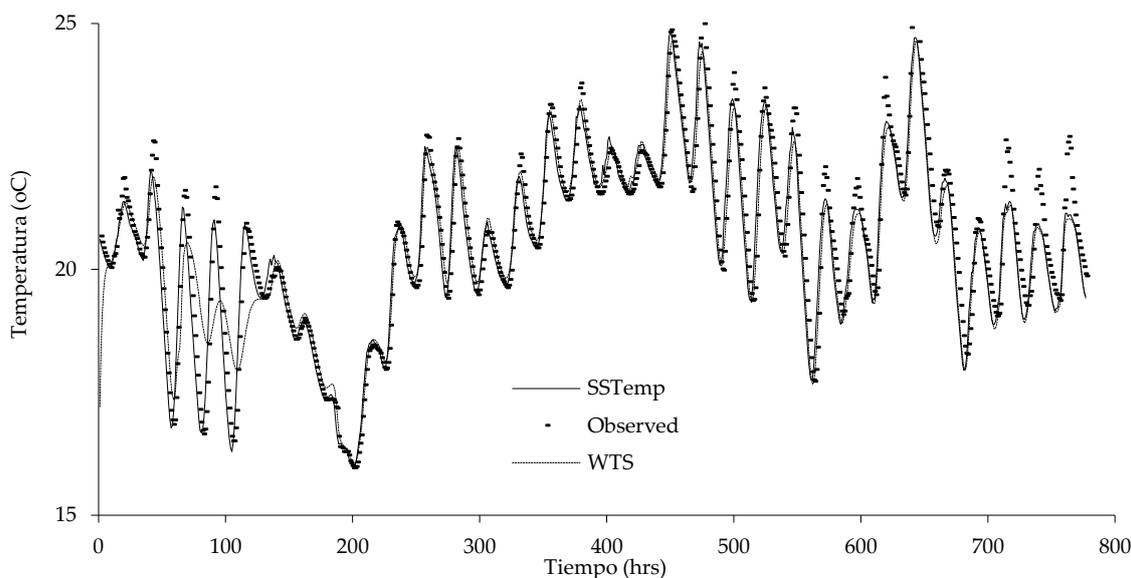


Figura 4. Temperatura del agua observada y simulada por SSTemp y WTS en Meadows del 12 de agosto al 3 de septiembre de 2005.

Análisis estadístico

Para analizar y comparar los resultados obtenidos durante las simulaciones se utilizó el método de regresiones lineales R-cuadrado (R^2) y el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS). Un resumen de los resultados se muestra en la Tabla 1 para los valores simulados por los modelos SSTemp y WTS, y la temperatura del agua observada para Turnpike y Turnpike-Meadows en 2004 y Meadows en 2005.

Tabla 1. R-cuadrado en Turnpike, Turnpike-Meadows in 2004 y Meadows en 2005.

Square-R (R^2)			
	Turnpike	Turnpike-Meadows	Meadows

	2004	2004	2005
SSTemp	0.976	0.913	0.976
WTS	0.988	0.932	0.895
Nash-Sutcliffe (NS)			
SSTemp	0.975	0.834	0.970
WTS	0.973	0.867	0.891

Para analizar y comparar la temperatura máxima de agua por hora observada y simulada cada día se aplicó el método de regresiones lineales (R^2). En la Tabla 2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos entre la temperatura máxima simulada del agua por el modelo SSTemp y WTS y la temperatura máxima observada del agua, para comparar la eficiencia de ambos modelos para Turnpike y Turnpike-Meadows en 2004 y Meadows en 2005.

Tabla 2. R-cuadrado en Turnpike and Turnpike-Meadows in 2004 y Meadows en 2005.

	Turnpike 2004	Turnpike- Meadows 2004	Meadows 2005
SSTemp	0.996	0.917	0.935
WTS	0.996	0.932	0.913

La simulación realizada en el sitio Turnpike en 2004 es para una zona boscosa de alta densidad de vegetación. El R-cuadrado es sobre 0.97, y el coeficiente de Nash-Sutcliffe es sobre 0.97. La línea de tendencia para estas simulaciones muestra que ambos modelos subestiman los picos de temperatura del agua; para SSTemp la pendiente fue 0.994 y para WTS de 0.988. Para la temperatura máxima diaria del agua, ambos modelos produjeron un R-cuadrado de 0.99 con una pendiente de línea de tendencia de 1.0 para SSTemp y 0.994 para WTS. La simulación realizada en Turnpike-Meadows en 2004 indica que la zona tiene una alta densidad de vegetación entre Old Turnpike Bridge y Meadows aguas arriba, y de baja densidad de vegetación entre Meadows aguas arriba y Meadows aguas abajo. El R-cuadrado fue de más de 0.91 y el Nash-Sutcliffe coeficiente sobre 0.83. La línea de tendencia para estas simulaciones muestra que ambos modelos subestiman los picos de temperatura del agua; para SSTemp, la

pendiente fue 0.893 y para WTS 0.88. Para la temperatura máxima diaria del agua, ambos modelos produjeron un R-cuadrado superior a 0.91 con una pendiente de línea de tendencia de 0.89 para SSTemp y 0.88 para WTS. Para la simulación realizada en Meadows en 2005, la zona tenía una baja densidad de vegetación. El R-cuadrado era sobre 0.89 y el coeficiente de Nash-Sutcliffe era sobre 0.89. La línea de tendencia para estas simulaciones muestra que ambos modelos subestiman los picos de temperatura del agua; para SSTemp, la pendiente fue 0.947 y para WTS 0.89. Para la temperatura máxima diaria de agua realizada en Turnpike, Turnpike-Meadows en 2004 y Meadows en 2005, ambos modelos produjeron un R-cuadrado sobre 0.91 con una pendiente de línea de tendencia de 0.79 para SSTemp y 0.69 para WTS.

Conclusiones

1. Ambos modelos de simulación de temperatura del agua, SSTemp y WTS, simularon con alta precisión la temperatura del agua por hora en el río Fenton para condiciones de cubierta vegetal baja, alta y mixta con un R-cuadrado mayor que 0.895.
2. SSTemp funciona bien como modelo de simulación por hora, aunque se diseñó para pasos de tiempo diarios.
3. Ambos modelos de simulación de agua, SSTemp y WTS, simularon la temperatura máxima diaria del agua en el río Fenton con alta precisión con un R-cuadrado mayor que 0.91 para condiciones de baja, alta y mixta vegetación.
4. Ambos modelos de simulación de temperatura del agua, SSTemp y WTS, subestimaron la temperatura máxima diaria del agua. Excepto para el sitio Turnpike en 2004, el modelo SSTemp coincide con la temperatura máxima diaria del agua.
5. A pesar de que WTS se desempeñó mejor que SSTemp en dos de las tres simulaciones, SSTemp es un modelo de temperatura del agua con un largo registro de aplicaciones. El modelo SSTemp en las tres aplicaciones en este estudio se mostró como un modelo de temperatura de agua de flujo horario confiable.

Agradecimientos

Agradezco la ayuda a los profesores Glenn S. Warner, John Clausen y David Miller de la Universidad de Connecticut por el consejo y su aliento durante esta investigación.

Referencias

- Bartholow, J. M. (2002). *Stream Segment Temperature Model (SSTemp)* (version 2.0) [Software]. Revised US Geological Survey computer model and documentation]. Recovered from <http://www.fort.usgs.gov/>.
- Poole, G. C., & Berman, C. H. (2001). An ecological perspective on in-stream temperature: Natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. *Environmental Management*, 27(6), 787-802.
- Sansone, A. L., & Lettenmaier, D. P. (2001). *A GIS-Based Temperature Model for the prediction of maximum stream temperatures in the cascade Mountain Region*. Water Resources Series (Technical Report No 168). Seattle, USA: University of Washington.
- Stella, J. M. (2007). *Modeling temperature, recession curves and event response for two third-order eastern Connecticut streams* (Doctoral Dissertation). University of Connecticut, Storrs, USA.
- Theurer, F. D., Voos, K. A., & Miller, W. J. (1984). *Instream Water Temperature Model* (Instreamflow Inf. Pap. 16 Coop.). Fort Collins, USA: Instreamflow and Aquatic System Group, U.S. Fish & Wildlife Service.
- Surface Water Quality Bureau (2003). *Upper Chama River Report*. Recovered from www.nmenv.state.nm.us/swqb/Chama/
- United States Geological Survey, USGS. (1998). *National Water Information System: Web Interface*. Recovered from <http://waterdata.usgs.gov/nwis/uv?01121000>
- Warner, G. S, Ogden, F. L., Bagtzoglou, A. C., & Parasiewicz, P. (2006). *Long term impact analysis of the University of Connecticut's Fenton River Water Supply Wells on the Habitat of the Fenton River. Final Report* (Special Report # 39). Storrs, USA: Connecticut Institute of Water Resources.