

ANÁLISIS ENTRE ESCURRIMIENTOS Y SEDIMENTOS HISTÓRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO APATLACO, MOR.

ANALYSIS OF RUNOFF AND HISTORICAL SEDIMENTS IN THE APATLACO RIVER BASIN, MOR.

Preciado, J. M¹, Arganis, J. M. L.^{2,3}, Val, S. R.³ y G. A. Ocón

RESUMEN

El contenido de material en suspensión en los cauces está estrechamente relacionado con los caudales y los aportes de sedimentos arrastrados por los escurrimientos superficiales de las laderas de las cuencas generados durante los períodos de tormentas. En este trabajo y como una línea de investigación, se utilizaron datos anuales y mensuales de las estaciones hidrométricas de la cuenca del Río Apatlaco, ubicado en el estado de Morelos en México para investigar la viabilidad de aplicar técnicas de cómputo evolutivo para obtener modelos de ajuste entre escurrimientos y sedimentos a partir de un análisis de las correlaciones existentes entre ellos. Una vez identificadas las correlaciones se propusieron dos modelos para aproximar los volúmenes de acarreo con los volúmenes de escurrimiento. Se aplicó un algoritmo genético simple para obtener los parámetros de los modelos propuestos de los cuales aquél que tiene una variación de tipo exponencial dio los mejores resultados, tal como se presenta en este artículo.

Palabras clave: Acarreo, Caudales, sedimentos, Río Apatlaco, algoritmos genéticos, correlaciones

ABSTRACT

Suspension material loads in rivers are closely related with flows and the sediments dragged by the open flows of the hillside in basins which are generated during the storm periods. In this paper, and as a research line, annual and monthly data of measuring stations in the Basin of Apatlaco River were used in order to research the viability of applying evolutive computing techniques to get models of adjustment between flows and sediment volumes by means of an analysis between the existing correlations between them. Once identified the correlations two models were purposed to approximate the sediments volumes knowing the flows volumes. A simple genetic algorithm was applied to get the parameters of the purposed models; the one with an exponential variation gave the best results as it is shown in this article.

Keywords: Load Flow, Flows, sediments, Apatlaco River, genetic algorithm, correlations

INTRODUCCIÓN

El contenido de material en suspensión en los cauces están estrechamente relacionado con los caudales y los aportes de sedimentos arrastrados por los escurrimientos superficiales de las laderas de las cuencas generados durante los períodos de tormentas (Bogardi 1978, Simons y Sentürk 1977, Newton de Oliveira, 1994, Obregón y Fragalá, 2002). Sin embargo, los sedimentos transportados por los cauces no sólo provienen de las erosiones en las laderas sino que también de los procesos erosivos en la red de drenaje de las cuencas. Estos materiales, aportados por las erosiones en los propios cauces o desde las laderas adyacentes a los mismos, son transportados principalmente en forma de acarreo, proceso también conocido como transporte de fondo.

La estimación del volumen de acarreo de sedimento ha sido motivo de investigaciones recientes tales como la de Campos-Aranda, 2009 que utiliza técnicas regionales para la estimación de sedimentos en cuencas no aforadas en una región hidrológica de México; Guimaraes et al, 2003 utilizaron algoritmos genéticos modificados con un modelo evolutivo competitivo complejo (CCE) para obtener los parámetros de un modelo físico hidrosedimentológico. Cabrera y Fernández, 2008, los cuales utilizaron la ecuación de Chacón (1982) que es de tipo lineal y propone al volumen de acarreo como una función de características fisiográficas de la Cuenca, de la precipitación, uso de suelo, cobertura vegetal entre otras para la Cuenca de delta de un río en Venezuela. Artigas et al, 2006 propusieron una metodología para estimar el transporte total de sedimentos a partir de ecuaciones obtenidas de la caracterización hidrológica,

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor.,

² Instituto de Ingeniería, UNAM,

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, preciado@tlaloc.imta.mx, MArganisJ@iingen.unam.mx, rvals@iingen.unam.mx ; acocon@tlaloc.imta.mx

*Artículo enviado el 26 de abril de 2010
Artículo aceptado el 15 de agosto de 2010*

hidráulica y física de la cuenca, del análisis de tormentas, de datos de sedimentos y de un análisis de correlaciones. También se han efectuado mediciones en campo en cuencas experimentales y se han contrastado los resultados con aspectos teóricos, un ejemplo es el estudio de Iroumé et al, 1996 en una cuenca de Chile.

Este trabajo tiene por objetivo presentar los resultados preliminares que pretenden seguir esta línea de investigación sobre sedimentos, en la que se analiza la viabilidad de aplicar técnicas de cómputo evolutivo para obtener modelos de ajuste entre escurrimientos y sedimentos con propósitos de pronóstico. Para ello se utilizaron los datos de las estaciones hidrométricas de la cuenca del Río Apatlaco, Morelos.

SITIO DE ESTUDIO

La cuenca del río Apatlaco se ubica en la porción noroeste del estado de Morelos, limita al norte con el Distrito Federal, al norte y noroeste con el Estado de México, al oeste con la cuenca del río Tembembe, y al este y al sur con la cuenca del río Yautepec. El Río Apatlaco nace en el arroyo o barranca denominada Chalchihuapan, al noroeste de Cuernavaca y suroeste del Municipio de Huitzilac, y desemboca en el río Yautepec, afluente del río Amacuzac que finalmente descarga al río Balsas. Dentro de la cuenca se ubican tres grandes ciudades: Cuernavaca, Jiutepec y Temixco, y se localizan los municipios con el mayor ritmo de crecimiento en el Estado, los cuales se pueden agrupar en dos núcleos: Cuernavaca, Jiutepec, Temixco y Xochitepec, por un lado, y Jojutla, Zacatepec y Tlaltizapán, por el otro. El área de la cuenca es de 750.66 km², la cuenca cuenta con 3 estaciones hidrométricas con datos de sedimentos estas son: Temixco (18271), Tetlama (18323) y Zacatepec (18264). En las Figuras 1 y 2 se indican los cambios en el uso de suelo que ha tenido esta cuenca, al comparar los años 1973 y 2000. En la Figura 3 se presenta el modelo digital de elevaciones, los distintos tipos de suelo así como la pendiente del cauce principal.

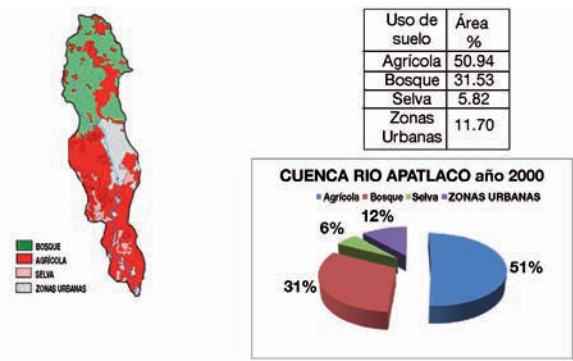


Figura 2. Uso de suelo año 2000. Cuenca río Apatlaco, Mor

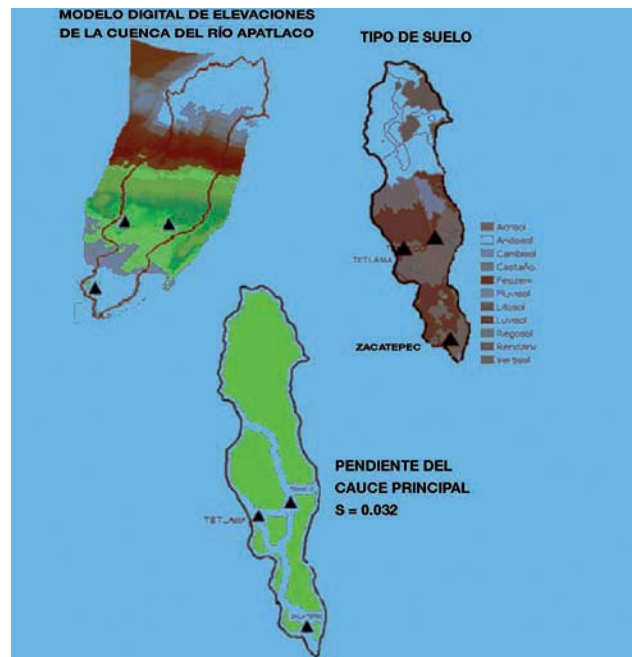


Figura 3. Modelo digital de elevaciones, tipo de suelo y pendiente del cauce principal, Cuenca río Apatlaco, Mor.

METODOLOGÍA

Algoritmos genéticos

Dentro del cómputo evolutivo destacan los algoritmos genéticos (Goldberg, 1989) que son de búsqueda de propósito general que se basan en el modo en que la naturaleza consigue hacer que sus especies estén cada vez más adaptadas a su entorno, es decir, en la evolución. El año 1975 se toma como punto de referencia del origen de los estudios sobre algoritmos genéticos y, desde entonces hasta hoy en día, han ido mejorando y han sido utilizados en los últimos años para resolver problemas dentro de la hidrología y de la hidráulica. En la Figura 4 se indica la secuencia de un algoritmo genético simple.

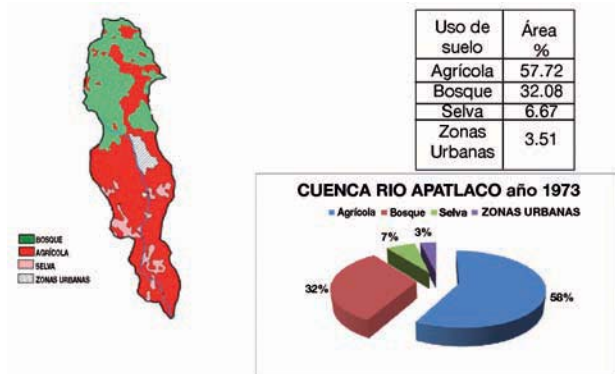


Figura 1. Uso de suelo año 1973. Cuenca río Apatlaco, Mor.

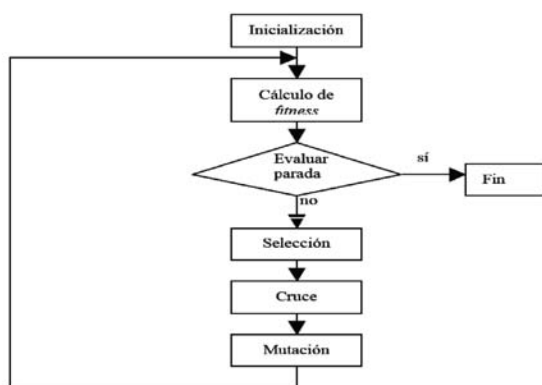


Figura 4. Algoritmo genético simple

Coefficiente de autocorrelación

El coeficiente de autocorrelación permite identificar la relación existente entre series de tiempo; en el presente estudio se utilizó para evidenciar la posible dependencia existente entre el acarreo de sedimentos y los volúmenes de escurrimiento; el coeficiente se estima de acuerdo con la ecuación 1.

$$r_{V,A} = \frac{Cov(V,A)}{\sigma_V \sigma_A} \quad (1)$$

Donde:

V, volumen escurrido anual o mensual, hm³

A, acarreo de sedimentos anual o mensual, miles de m³

Procedimiento de análisis

Los pasos que se proponen para realizar el estudio son:

Recopilación y análisis de los datos disponibles de los transportes de sedimentos y del volumen de escurrimiento líquido registrado en las estaciones hidrométricas de la cuenca analizada, tanto a nivel anual como a nivel mensual.

Estimación del coeficiente de correlación entre el volumen de acarreo sólido y del volumen de agua trasportado por la corriente, de observarse altas correlaciones (superiores a un umbral de 0.7) se continuará con el estudio, en caso contrario, se planteará, en una segunda etapa incluir las características fisiográficas de la Cuenca así como términos hidráulicos como la pendiente de plantilla, el área hidráulica y el coeficiente de rugosidad que permitan incluir de manera indirecta a la velocidad del cauce para incluirla en la posible ecuación de ajuste.

Una vez identificadas las correlaciones se proponen distintos modelos de ajuste (lineal, exponencial, potencial) en los que se pone como variable independiente al volumen de acarreo líquido y como la dependiente al volumen de acarreo sólido y con ayuda de un algoritmo genético se estiman los parámetros

del modelo obtenido. La función objetivo utilizada en el algoritmo genético es la que minimiza el error medio cuadrático entre los datos medidos y los calculados con el modelo propuesto.

Los distintos modelos se dibujan y se comparan, considerando como mejor modelo aquél que proporcione el menor error medio cuadrático.

Datos disponibles

La Comisión Nacional del Agua (Conagua) cuenta con una red de estaciones hidrométricas instaladas de 2339, actualmente operan 865 estaciones. El número de estaciones hidrométricas en su base de datos sedimentos es de 415. La estación 26424 cuenta con un registro de 71620 días. La estación 19016 cuenta con un registro histórico de su base de datos del 01/01/1975 al 01/04/2008 (Tabla 1).

APLICACIÓN Y RESULTADOS

A partir de los registros del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) se determinaron los volúmenes y acarros anuales; se determinó el coeficiente de autocorrelación para las estaciones Temixco, Tetlama y Zacatepec que mide las aportaciones de ambas; en las Figuras 5 a 10 se presentan los resultados obtenidos.

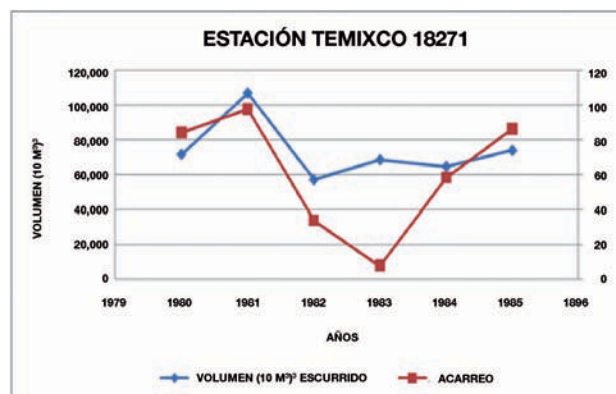


Figura 5. Registro histórico de Volumen y Acarros. Estación Temixco

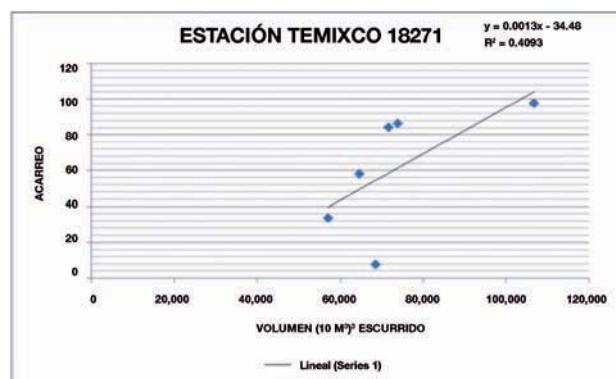


Figura 6. Volumen Escurrido vs Acarreo. Estación Temixco

Tabla 1. Evolución de las estaciones hidrométricas operadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

AÑO	ESTACIONES EN OPERACIÓN	AÑO	ESTACIONES EN OPERACIÓN	AÑO	ESTACIONES EN OPERACIÓN
1926	41	1955	622	1984	1239
1927	63	1956	669	1985	1240
1928	87	1957	708	1986	1152
1929	82	1958	716	1987	1150
1930	100	1959	769	1988	1148
1931	113	1960	788	1989	1145
1932	135	1961	07	1990	1142
1933	141	1962	832	1991	1067
1934	141	1963	866	1992	1068
1935	169	1964	915	1993	1067
1936	199	1965	1024	1994	1077
1937	175	1966	1068	1995	1055
1938	183	1967	1085	1996	960
1939	194	1968	1096	1997	844
1940	205	1969	1113	1998	774
1941	219	1970	1129	1999	779
1942	230	1971	1141	2000	780
1943	235	1972	1149	2001	780
1944	244	1973	1157	2002	811
1945	275	1974	1164	2003	865
1946	316	1975	1164	2004	862
1947	389	1976	1180	2005	864
1948	410	1977	1207	2006	863
1949	454	1978	1224	2007	865
1950	475	1979	1241	2008	865
1951	500	1980	1257		
1952	507	1981	1147		
1953	541	1982	1176		
1954	612	1983	1214		

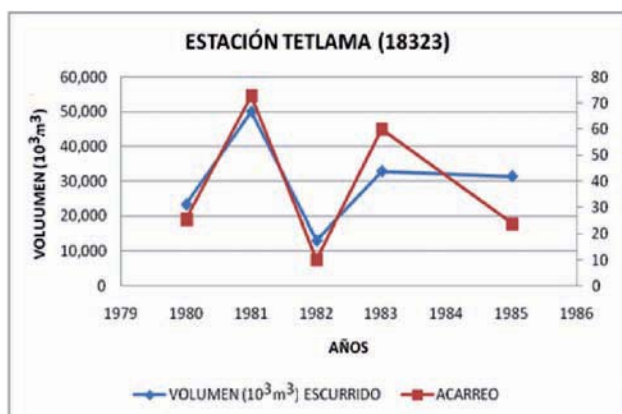


Figura 7. Registro histórico de Volumen y Acarreos. Estación Tetlama

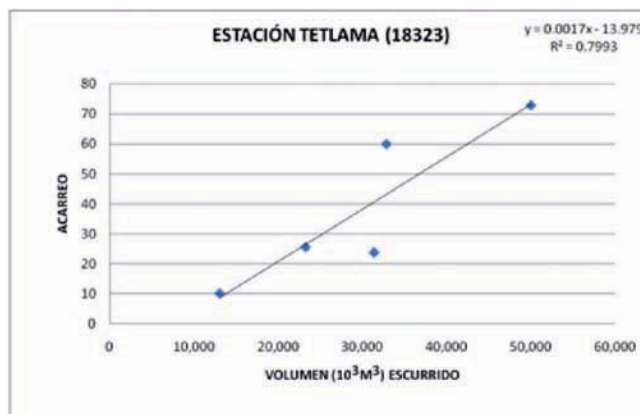


Figura 8. Volumen Escurrido vs Acarreo. Estación Tetlama



Figura 9. Registro histórico de Volumen y Acarreos. Estación Zacatepec

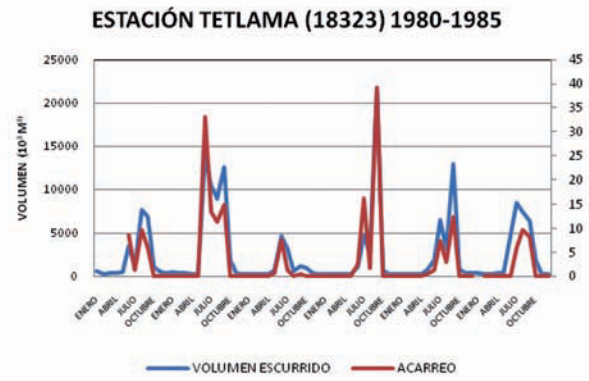


Figura 11. Volumen Escurrido y Acarreos. Datos mensuales Estación Tetlama

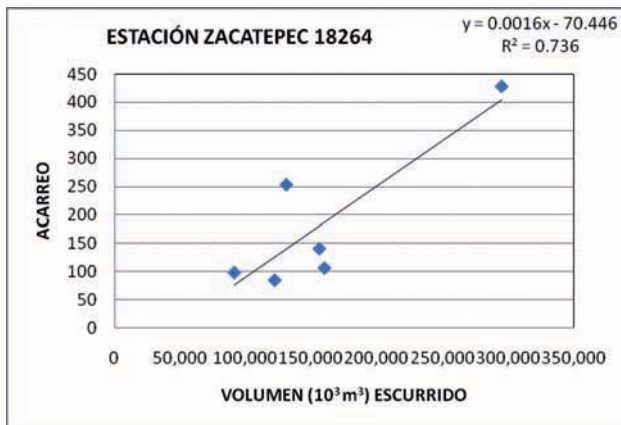


Figura 10. Volumen Escurrido vs Acarreos. Estación Zacatepec

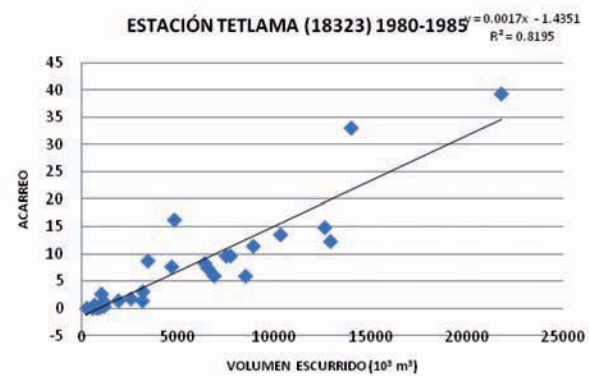


Figura 12. Volumen Escurrido vs Acarreos. Datos mensuales Estación Tetlama

Al observar la Figura 6 no se ve una clara autocorrelación entre el escurrimiento y el acarreo para la estación Temixco; posiblemente atribuible a una variación importante en la pendiente del cauce al estar el afluente en cañada o por la variación en el tipo de terreno, etc; en este caso la autocorrelación es de 0.639. Para la estación Tetlama (Figura 8) sucede lo contrario, este valor fue de 0.89. Algo similar sucede con la estación Zacatepec (Figura 10), con una autocorrelación de 0.86.

Debido a la variabilidad importante en el escurrimiento en las distintas épocas del año, se decidió investigar el comportamiento del escurrimiento y del acarreo a nivel mensual, para el caso de la estación Tetlama en la que encontró la más alta autocorrelación a nivel anual, en las Figuras 11 y 12 se presentan las gráficas del comportamiento del escurrimiento y del acarreo en el tiempo y respecto a la función identidad, para identificar sus correlaciones.

Al disminuir el periodo de tiempo a nivel mensual, se observan fuertes correlaciones entre el acarreo y el volumen de escurrimiento, la auto correlación da en este caso de 0.91.

Para el caso de la estación Tetlama, que tenía más información a nivel mensual, se aplicó propusieron dos modelos uno con variación no lineal con operadores algebraicos y otro con una variación exponencial del acarreo con respecto al volumen y se determinaron los parámetros de dichos modelos usando un algoritmo genético simple; los modelos corresponden a las ecuaciones 1 y 2.

Se determinaron los parámetros de dichos modelos usando un algoritmo genético simple; los modelos corresponden a las ecuaciones 2 y 3.

$$A = -6863.918V^{1.600.5269} - 1537.2173V^{0.9156} + 8.2340$$

$$A = 183.4162e^{(V/7738.5784)} - 233.4666e^{(V/10000)} + 50.3555$$

(3)

En la Figura 13 se comparan estos resultados.

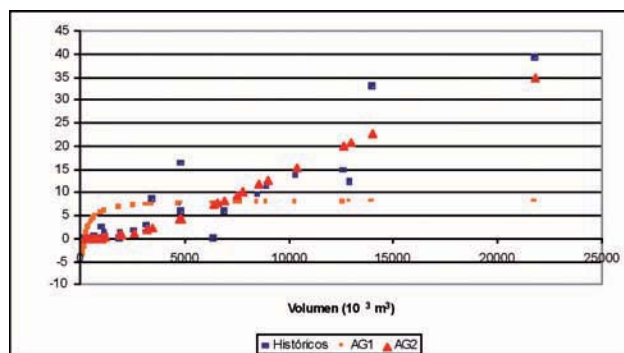


Figura 13. Comparación de datos medidos y calculados. Estación Tetlama

De acuerdo con la Figura 13 el modelo dado por la ecuación 2 da el mejor ajuste; el error medio cuadrático da de 27.3, mientras que con el primer modelo el error resulta de 33.24.

CONCLUSIONES

Debido a las fuertes correlaciones que se encontraron entre los datos históricos medidos es factible pensar en modelos que asocien al escurrimiento con los sedimentos; una alternativa son las técnicas de cómputo evolutivo como son los algoritmos genéticos para estimar los parámetros de un modelo propuesto o la programación genética que permite la obtención del modelo matemático, para datos a nivel anual o en periodos de tiempo más corto como datos mensuales o agrupando meses según la época del año (estiaje, avenidas o por estaciones del año).

Las gráficas del volumen escurrido en el tiempo y de los sedimentos en el tiempo en una misma para las tres estaciones y para la suma y permiten ver que el comportamiento de cada una con el tiempo es aleatorio, dada la escasa autocorrelación por lo que es posible también un análisis con modelos para series de tiempo anuales.

La aplicación de algoritmos genéticos a los datos mensuales de la estación Tetlama permitió obtener una curva de tipo exponencial que logra estimar el valor del acarreo en función de los volúmenes escurridos. Es conveniente aplicar dicha curva a otro grupo de datos medidos para verificar su aplicabilidad para el caso de meses sin información del acarreo.

Adicionalmente se contempla en una segunda etapa de análisis incluir las características fisiográficas de la cuenca en el modelo, en particular de aquellas rel-

acionadas con la velocidad del cauce y su rugosidad, pretendiendo con ello obtener una mejor estimación del volumen de acarreo sólido.

REFERENCIAS

- ARTIGAS, J., LOPEZ, J. Y CORDOVA, J. R. (2006). Methodology to estimate the total sediment transport in mountainous river basins. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, vol.29, no.3, p.221-234.
- BOGARDI, J. (1978). *Sediment transport in alluvial streams*. Akadémiai Kiadó, Budapest. 825p
- CABRERA, O., FERNÁNDEZ, L. (2008). Transporte y sedimentación en el delta de San Ignacio, Laguna de Tacarigua, Estado Miranda, Venezuela. *Terra Nueva Etapa*, Enero-Junio, año/vol. XXIV, número 035pp 141-166.
- CAMPOS-ARANDA, D. (2009). Estimación probabilística de volúmenes de acarreos en suspensión en cuencas sin aforos en la Región Hidrológica No. 10. *Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Vol X No. 3. Pp 227-236
- CONAGUA (2000), Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas). CD Software.
- GOLBERG, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, USA.
- GUIMARAES S., C. A., SUZULI K., WATANABE M. (2003) Modificacao no Algoritmo Genético SCE-UA e sua aplicacao a um modelo Hidrossedimentológico, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Vol. 8. Ene-Mar 2003. P. 137-146
- IROUMÉ, A., HUBER, A., ARRIAGADA A. (1996). Monitoreo y cuantificación de los procesos hídricos en una Cuenca andina en la IX Región de Chile. VI Jornadas del CONAPHI, Chile. Pp 14
- NEWTON DE OLIVEIRA, C. (1994). *Hidrossedimentologia*. Rio de Janeiro Brasil, cprm, 372 p
- OBREGÓN N. y FRAGALÁ F (2002). Predicción de caudales medio mensuales en la Estación La Pradera mediante RNA, 11 Congreso Colombiano y I Encuentro Andino de Inv. de Operaciones, Bogotá, septiembre 12-14.
- SIMONS, D. B. Y SENTÜRK F. (1977). *Sediment transport technology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA. 807 p.