

Análisis de cambios del régimen fluvial bajo influencia de la actividad económica

María Perevochtchikova

Universidad Nacional Autónoma de México

Los problemas relacionados con el uso del agua se han ido evidenciando de manera creciente de múltiples formas, entre ellas, como modificaciones negativas de su calidad y cantidad. En este trabajo se realiza un análisis de la influencia de la actividad económica en los cambios del régimen fluvial que permita plantear algunos problemas de protección al ambiente y contar con elementos adicionales para planear correctamente una estrategia integral de manejo del agua en las regiones desarrolladas industrialmente. El análisis en la cuenca del río Sosva, Rusia, utilizando diferentes métodos de valoración, muestra resultados similares: el caudal máximo en el periodo de 1954 a 1994 aumenta bajo la influencia de factores antropogénicos en sólo un 10% (que representa el doble del error en la medición del escurrimiento), en lugar de un esperado cambio posible de 30-40%; esta diferencia puede deberse a la influencia de algunos factores físico-geográficos que compensan las alteraciones inducidas del caudal.

Palabras clave: actividad económica, escurrimiento, régimen fluvial, métodos estadísticos y matemáticos.

Introducción

En los últimos años se ha prestado más atención al desarrollo de la llamada hidrología ecológica para la toma de mejores decisiones en la gestión del agua, con el fin de conservar los ecosistemas naturales que están bajo la influencia humana. Los investigadores de este tema están de acuerdo con que el cambio del suelo natural por causas antropogénicas provoca modificaciones en la estructura del balance hídrico, del régimen hidrológico y en la calidad del agua de los ríos. De ello surgen dos aspectos por investigar: la variación de la calidad del agua (por su contaminación) y las alteraciones de las características del régimen hidrológico de los ríos, por ejemplo: el aumento del nivel del agua y tiempo de la crecida, que puede provocar inundaciones y daños como la destrucción de presas. Es obvio que en la mayoría de estos casos, la influencia humana en el régimen hidrológico puede originar cambios negativos en los ecosistemas (Orlov y Trushevsky, 1999).

Estos cambios del ciclo hídrico se han estudiado ampliamente en países de Europa, en Estados Unidos de América y Japón. En Rusia, este problema es de gran importancia para las ciudades grandes y zonas industriales. El análisis de la influencia de la actividad eco-

nómica en los cambios del régimen fluvial es sumamente útil para resolver algunos problemas de protección al medio ambiente y planear una estrategia integral de manejo del agua en regiones industriales (Vladimirov, 1991).

De ahí que el objetivo de este trabajo consistió en realizar un análisis de la influencia de la actividad económica en el cambio del régimen fluvial en el caso particular de una pequeña cuenca industrializada del río Sosva, Rusia, y en elaborar un método de pronóstico hidrológico de tiempos cortos. Los datos utilizados para los cálculos fueron la precipitación media diaria en mm, la capa máxima de nieve acumulada (en centímetros) de seis estaciones climatológicas y el caudal medio diario, (en m³/s), de seis estaciones hidrométricas, para el periodo 1954 a 1994. Para el análisis económico se revisaron varias fuentes especializadas con información sobre actividades antropogénicas en la zona de estudio.

Descripción del área de estudio

La cuenca del río Sosva tiene un área de 24 mil km² y está ubicada al norte de los Montes Urales, en la provincia de Sverdlovskaya de la Federación de Rusia. En la cuenca, se encuentran seis estaciones hidrométricas y

seis estaciones climatológicas, distribuidas en forma irregular (ilustración 1). En esta zona existen cinco ciudades con más de cien mil habitantes. Las industrias más desarrolladas de la región son metalurgia, minera, maderera y papelera; el uso del recurso hídrico (superficial y subterráneo) está distribuido de la siguiente manera: 59% es de tipo industrial, 26% es de tipo doméstico y sólo 4% es de tipo agrícola.

El río Sosva es afluente de la margen derecha del río Tavda y pertenece al sistema hídrico del río Tobol (cuenca del océano Ártico). Casi todos los afluentes del río Sosva están ubicados en su margen derecha y tienen su inicio en montañas con altura de 900 a 1,500 msnm; sus aguas provienen del deshielo, la lluvia y los acuíferos.

La temperatura promedio en la zona durante el verano es de +18°C y en el invierno de -18°C. La precipitación promedio anual es de 500 a 600 mm; en las montañas es de 800 a 900 mm al año y hacia las partes bajas es de 400 mm al año; de 60 a 70% de la precipitación ocurre durante el periodo "caliente" del año.

La cuenca se caracteriza por la gran cantidad de bosques en su extensión y por pantanos en la parte baja

del río principal. Su régimen hidrológico presenta grandes crecidas provocadas en la primavera por el deshielo y múltiples inundaciones en el periodo verano-otoño por las lluvias intensas; existe un estiaje severo en el invierno. En la ilustración 2 se muestran los diagramas conjuntos de la precipitación media diaria (P) en mm, de la estación climatológica Serov (ubicada en el centro de la cuenca), y del caudal medio diario (Q) en m^3/s , de la estación hidrométrica Sosva-Sosva (estación final de la red hidrométrica de la cuenca del río Sosva). El hidrograma del año 1988 fue escogido como el representativo para la zona de estudio y para la mayor parte de Rusia (Perevochtchikova, 2003).

Metodología

Afirma Shiklomanov (1989) que según sea la influencia que tengan en las características del régimen fluvial, los factores de la actividad económica pueden dividirse en cinco grupos:

- Extracción directa de agua del cauce del río (lago o almacenamiento).

Ilustración 1. La ubicación de la cuenca del río Sosva.

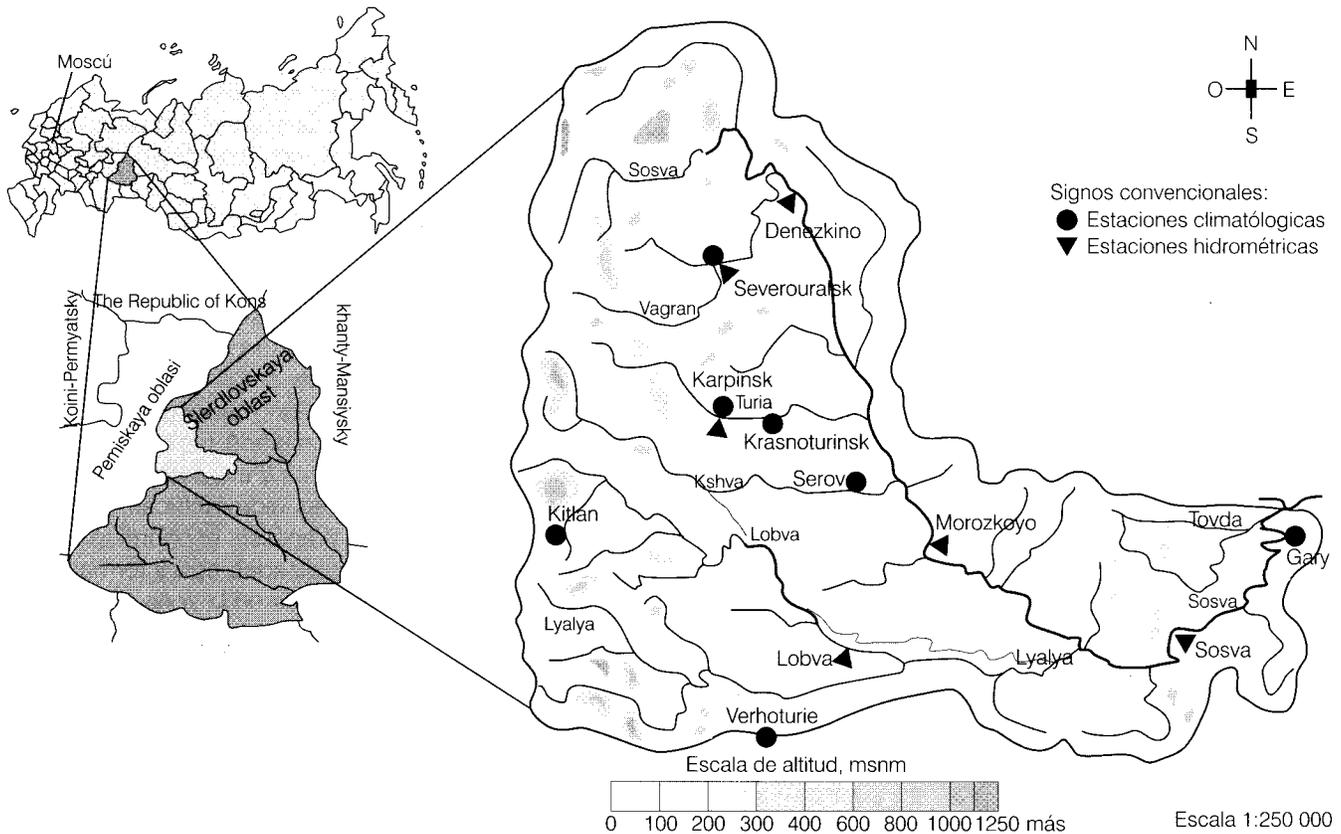
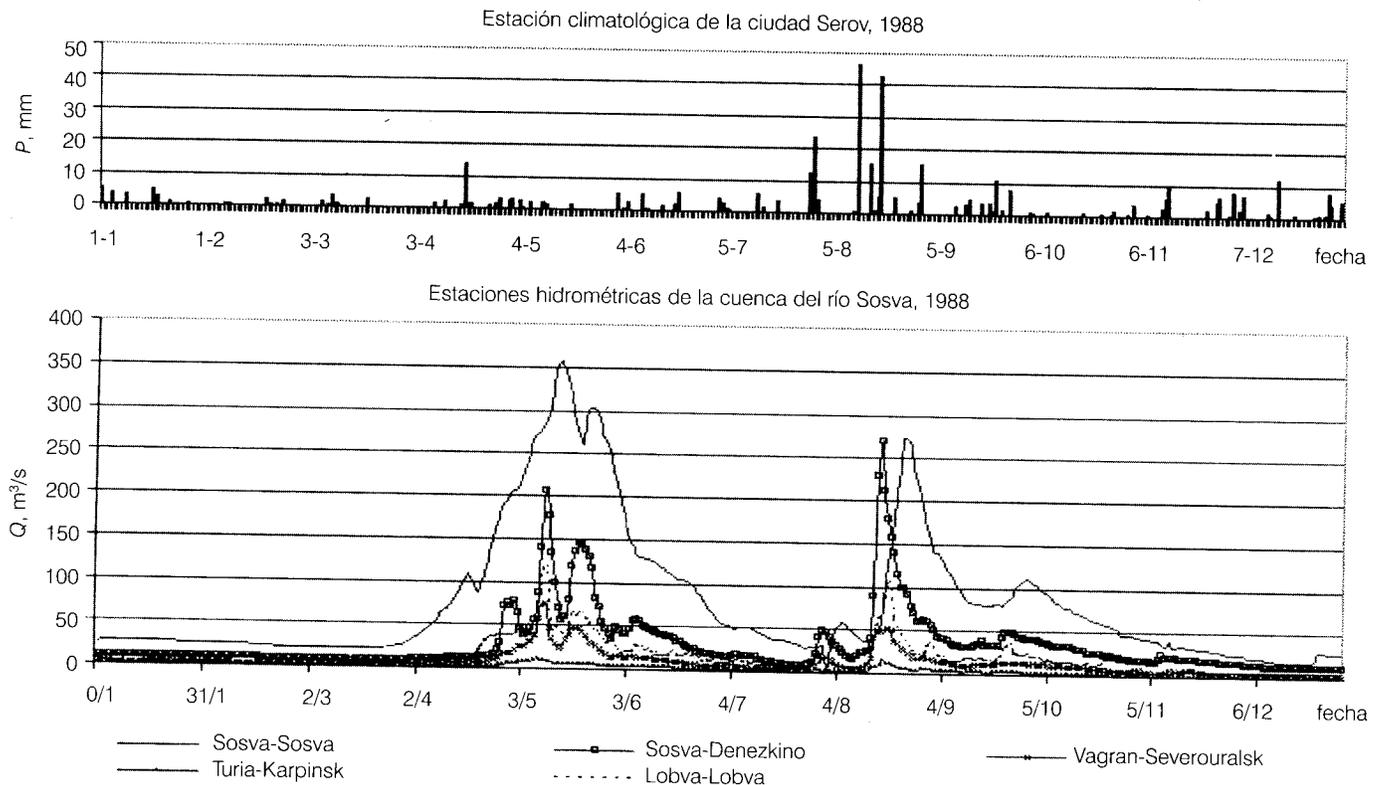


Ilustración 2. El régimen hidrológico de los ríos en la cuenca del río Sosva.



- Transformación del cauce del río (construcción de presas, estanques y/o encauzamientos, así como por dragado).
- Cambio de uso del suelo en la cuenca (que se refleja en alteraciones en la evaporación y en las condiciones en que se forma la escorrentía; implica procesos de labranza, agrotécnica, drenado del terreno, urbanización, tala de bosques y reforestación).
- Extracción de agua del cauce del río y transformación de la superficie de la cuenca: irrigación y extracción de agua subterránea.
- Cambio climático global.

Las principales (y más probables) causas del aumento del caudal de escorrentía son: drenaje, secado del terreno, deforestación, flujo de trasbase (importación), urbanización, almacenamiento de presas y dragado. La disminución del caudal se debe al incremento de la extracción de agua, uso consumativo, flujo de trasbase (exportación), reforestación, extracción de agua subterránea y la actividad industrial. Estos mismos factores pueden provocar tanto el aumento del caudal como su disminución en cada subcuenca, de acuerdo con sus características físico-geográficas.

Existen varios métodos para valorar la influencia de la actividad económica en el régimen fluvial, pero dicha valoración, así como el pronóstico de la injerencia de la actividad económica en los cambios del régimen hidrológico, es una tarea difícil, porque en una sola cuenca actúan distintos factores económicos. Además, la urbanización impone modificaciones en el caudal. En todos los casos, el análisis tiene como fin abarcar los siguientes aspectos:

1. Estudio de alteraciones del caudal observado en el pasado.
2. Restablecimiento de las características naturales del caudal.
3. Valoración de los cambios en el caudal (con métodos existentes o nuevos).

Actualmente existe una gran variedad de métodos de valoración de la influencia de la actividad económica en el régimen fluvial. De acuerdo con la clasificación de Shiklomanov (1979, 1989), estos métodos pueden agruparse en cinco grupos, dependiendo de lo siguiente: datos iniciales obtenidos, características físico-geográficas de la cuenca, tipos de actividad económica y grado de desarrollo:

1. Métodos estadísticos.
2. Métodos de simulación matemática.
3. Métodos de balance hidrológico.
4. Métodos de simulación física.
5. Métodos de experimento activo.

Los primeros dos métodos son los más usados en la práctica porque se basan en datos hidrometeorológicos estándar y no se necesita otro tipo de experimento ni de erogación económica externa. Los métodos de balance hidrológico se fundamentan en la comparación de cambios de cada elemento del balance hídrico separadamente y para cada cuenca en particular; estas modificaciones se valoran por la diferencia de elementos en condiciones naturales y bajo influencia antropogénica. Este método no es muy confiable, ya que los errores en la medición de las características hidrometeorológicas son mayores a los errores de cálculo de las ecuaciones finales. Los métodos de simulación física y los de experimentación activa muestran la esencia física del proceso hídrico, pero se usan pocas veces por ser de elevado costo.

Aplicación de métodos estadísticos

Los métodos estadísticos se basan en el análisis conjunto de las fluctuaciones de las características hídricas observadas durante muchos años en la estación final de la red hidrométrica, en relación con los factores naturales hidrometeorológicos y la dinámica de desarrollo de la actividad económica en la región del estudio.

Dependiendo de la información asequible y de los objetivos del trabajo, se utilizan varias formas de valoración estadística, por ejemplo:

Solamente con una fila de los datos observados del caudal

Para obtener la fecha de inicio y la tendencia del cambio de desarrollo del proceso de escorrenría en el tiempo bajo influencia urbana se utiliza el método de integración, el cual consiste en:

$$W_j = \sum_{i=1}^j y_i = f(j) \quad (1)$$

donde:

W_j = sucesión del caudal.

y = caudal.

j = 1, 2, 3, ..., n .

i = número continuo del elemento en la serie del caudal.

j = número continuo de la suma.

Este tipo de gráfica fue utilizado en Rusia para los cálculos hidrológicos desde los años sesenta del siglo pasado (Linsley *et al.*, 1962), y en los ochenta se le usó para establecer la influencia antropogénica en el cambio del régimen fluvial (Shiklomanov, 1979, 1989; Shelutko 1983, 1984). La teoría del método se basa en la dependencia uno esquematizada en la ilustración 3. En este caso, la desviación de la inclinación de la línea recta de la gráfica significa un cambio del caudal (su aumento o disminución) como consecuencia de la actividad humana (como la construcción de presas, deforestación, etcétera) en la zona (bajo la hipótesis de que no han sido alteradas las condiciones climáticas globales que, para el caso de las cuencas pequeñas y medianas, es aceptable.)

Métodos de analogía hidrológica

Este método se basa en la recuperación de las características hidrológicas naturales de una cuenca –cuyo régimen ha cambiado por la influencia de la actividad económica– a partir de los datos pertenecientes a una o varias cuencas “análogas”. En este caso se busca una o varias cuencas que tengan condiciones físico-geográficas en la formación de escurrimientos similares a los ríos de la cuenca en estudio, pero cuyo régimen hidrológico es natural (no sufre la influencia de la actividad económica). Así, con sólo una cuenca “análogo”, la influencia antropogénica en el caudal puede ser representada por las dependencias de las sumas de los caudales de los ríos ubicados en estas dos cuencas:

$$\sum_{i=1}^j Y_i = f\left(\sum_{i=1}^j Y_{ai}\right) \quad (2)$$

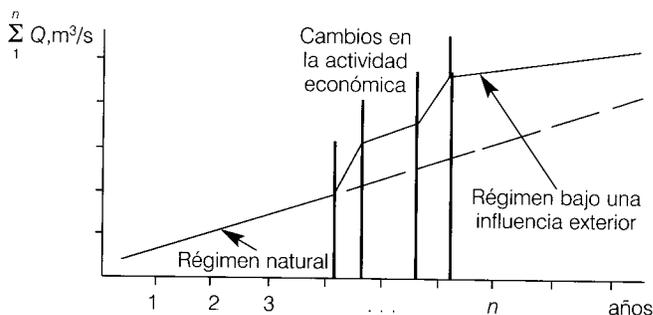
donde:

Y_i = escurrimiento anual (mensual o del periodo) del río del estudio.

Y_{ai} = lo mismo para el río “análogo”.

j = 1, 2, 3, ..., n .

Ilustración 3. Dependencia del caudal sumatorio en el tiempo.



Igual que para el método anterior, el punto de inclinación de la línea de los datos, con respecto a la línea teórica (recta), determina la fecha del inicio de la modificación del caudal bajo influencia antropogénica y la cantidad de cambio promedio en el periodo observado.

Valoración por factores meteorológicos

Aquí se sobreentiende que los factores hidrometeorológicos (precipitación, temperatura del aire, humedad) sufren pequeños cambios por la actividad económica. El método más popular para determinar dicho efecto es la dependencia de las sumas de los caudales anuales, o de otro periodo, con la precipitación del mismo periodo o, como es el caso de Rusia, por la cantidad máxima acumulada de nieve durante el mismo periodo:

$$\sum_{i=1}^j Y_i = f\left(\sum_{i=1}^j P_i\right) \quad (3)$$

$$\sum Y_{prim_i} = f\left(\sum S_{máx_i}, \sum (S_{máx_i} + P_{prim_i})\right) \quad (4)$$

donde:

Y_i = escurrimiento anual (mensual o del periodo).

P_i = precipitación del mismo periodo.

Y_{prim_i} y P_{prim_i} = lo mismo para la primavera.

$S_{máx_i}$ = cantidad máxima acumulada de nieve durante el mismo periodo.

Valoración por características de la corriente fluvial en la zona de su formación

En la Federación de Rusia, este método se usa para el análisis de las cuencas en las que no es difícil distinguir las zonas en las que se forma el escurrimiento de las zonas en que se utiliza; normalmente son las cuencas grandes con área drenada mayor a 50 mil km² y están ubicadas en el sur del país. A este tipo de cuencas pertenecen los ríos de las regiones montañosas, en las que se originan los ríos y donde no hay mucha influencia de la actividad económica. Los ríos que corren por las planicies extensas (como el Volga y el Dnepr) tienen su origen en las partes boscosas; sus aguas son usadas en la parte esteparia de la cuenca.

Dependencia territorial del caudal de factores físico-geográficos, meteorológicos y económicos

Este método se basa en la aplicación del proceso de la correlación lineal múltiple para investigar los cambios

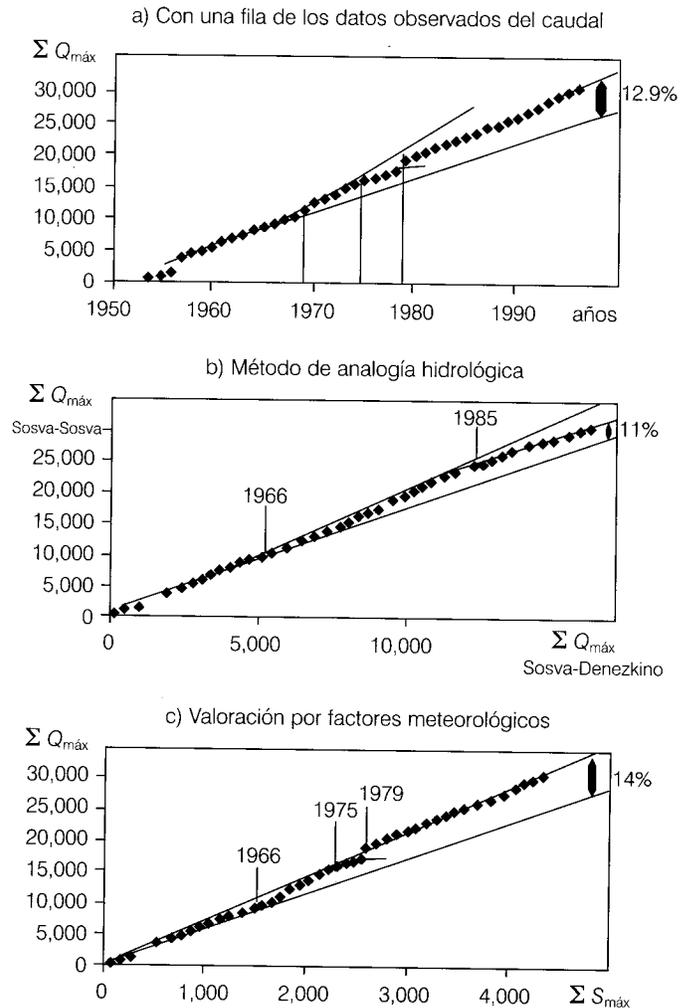
espaciales de las características hidrográficas de los ríos bajo influencia de los factores naturales y antropogénicos.

Para estudiar el comportamiento de la cuenca del río Sosva, y dada la información obtenida, se seleccionaron los tres primeros métodos estadísticos. Se hizo un análisis para todas las estaciones hidrométricas de la cuenca (Perevochtchikova, 2003); los resultados de aplicación de estos métodos para la estación hidrométrica Sosva-Sosva de la cuenca del río Sosva se presentan en la ilustración 4.

Se nota que los cambios más perceptibles del caudal máximo medio anual de los ríos de la cuenca del río Sosva ocurrieron en los años 1966 y 1975; con un aumento de casi el 10% hasta el año 1994.

Tras analizar la situación económica de la zona en el periodo de 1954-1994, se establecieron algunas posibles causas antropogénicas del cambio de régimen flu-

Ilustración 4. Resultados de aplicación de métodos estadísticos.



vial natural en la cuenca y que coinciden con la construcción constante de bodegas de almacenamiento en afluentes del río Sosva para uso industrial y extracción de minerales, aumento constante de la agrotécnica en zonas boscosas del norte y oeste de la región, establecimiento de fábricas madereras, aumento de la deforestación, aumento de los campos de labranza, crecimiento de ciudades (décadas 1960-1980), disminución de extracción del agua para uso industrial del río Vagrán en 1965-1966 y el aumento de nuevo en los años setenta (Perevochtchikova, 2000).

Aplicación de métodos matemáticos

En la actualidad, el uso de los métodos matemáticos es amplio, ya que con ellos el tiempo de cálculo es menos largo y dan la posibilidad de pronosticar cambios del régimen hidrológico y del estado de los ecosistemas en la cuenca que se encuentra bajo influencia de urbanización. La aplicación de estos métodos consta de las siguientes etapas: 1) investigación de los procesos en la naturaleza y formación de las ecuaciones que describen los procesos en el tiempo y en el espacio; 2) elaboración de algoritmos de decisión y programas de cálculo para una computadora personal; 3) aplicación.

Estos métodos tienen un lado positivo y otro negativo. Existen múltiples clasificaciones de los modelos matemáticos que se usan para este tipo de análisis y que describen el proceso de la formación del escurrimiento fluvial (Shiklomanov, 1989).

Para el análisis de la influencia de la actividad económica en el régimen hidrológico de la cuenca del río Sosva, después de varias pruebas con diferentes modelos matemáticos, se seleccionó el método de pronóstico hidrológico de niveles (caudales) correspondientes (MNC). Este método de pronóstico de la escorrentía es para tiempos cortos y su ecuación principal se escribe de la siguiente forma (Georgievsky, 1982):

$$Q_{f,t} = Q_{in,t-\tau} + \int_0^l q dl \quad (5)$$

donde:

$Q_{f,t}$ = el caudal de la estación final en el momento del tiempo t .

$Q_{in,t-\tau}$ = caudal de la estación inicial en el momento del tiempo $t-\tau$.

t = tiempo de retraso del agua de la estación inicial hasta la estación final.

q = afluencia lateral en la sección entre las estaciones inicial y final.

l = longitud de la sección del río.

El pronóstico del caudal se hace teóricamente para las secciones del río *sin* y *con* afluentes entre las estaciones hidrométricas inicial y final.

a) Para el cálculo de escorrentía de la sección del río *sin* afluentes se toma en cuenta que el valor de la afluencia lateral es:

$$\Delta q : \int_0^l q dl \approx \Delta q \approx \alpha Q_{in,t-\tau} \quad (6)$$

donde:

α = el coeficiente de la afluencia lateral.

$Q_{in,t-\tau}$ = el caudal en la estación inicial en el momento del tiempo $t-\tau$.

Así, sin considerar la afluencia lateral, la ecuación del cálculo será:

$$Q_{f,t} = (1 + \alpha) Q_{in,t-\tau} \quad (7)$$

y si α es constante:

$$Q_{f,t} = f(Q_{in,t-\tau}) \quad (8)$$

Tras aplicar este método en el pronóstico del escurrimiento en los cauces de la cuenca del río Sosva, se obtuvieron errores de alrededor de 25 a 30% en la estación hidrométrica final, por lo que el método no puede ser aceptable.

b) El cálculo de escorrentía de la parte del río *con* afluentes se hace por medio de la siguiente fórmula:

$$Q_{f,t} = f(Q_{in,t-\tau} + \sum_{i=2}^{i=n} k_i Q_{in,t-\tau_i}) \quad (9)$$

donde:

k_i = el coeficiente de afluencia lateral relativa $k_i = \frac{1 + \alpha_i}{1 + \alpha_1}$.

i = número de afluente.

t = tiempo.

τ = el tiempo de retraso.

Cuando $n=1$, se tiene la ecuación para la sección del río *sin* afluentes.

Las dependencias del método de los niveles (caudales) correspondientes a la sección del río *con* afluente pueden ser presentadas en forma analítica, gráfica y gráfico-analítica.

Las dependencias analíticas se escriben de la siguiente manera:

$$Q_{f,t} = aQ_{in,t-\tau_1} + bQ_{in,t-\tau_2} + \dots + d \quad (10)$$

donde:

a, b, \dots, d = coeficientes de la ecuación de regresión, que se determinan por el método de la correlación múltiple.
 t = el momento del tiempo.

Las dependencias gráficas tienen la forma:

$$Q_{f,t} = f(Q_{in,t-\tau_1}, Q_{in,t-\tau_2}) \quad (11)$$

y casi siempre se utilizan para las secciones de los ríos con un afluente.

En el presente estudio, para calcular el pronóstico hidrológico de tiempo corto se usa la ecuación (10) en la forma transformada:

$$Q_{f,t} = a_1\delta Q_{1,t-\tau_1} + a_2\delta Q_{2,t-\tau_2} \quad (12)$$

donde:

$Q_{f,t}$ = caudal en la estación final en el momento del tiempo t .

a_1, a_2 = parámetros de la ecuación de la regresión.

Q_1 = caudal en la estación inicial del río principal.

Q_2 = caudal en la estación inicial del río afluente.

$\delta Q = Q_i - \bar{Q}_i$.

En el caso particular de la cuenca del río Sosva, se usaron datos de los caudales registrados en las estaciones hidrométricas Sosva-Denezkino (estación inicial), Sosva-Sosva (estación final) y Lobva-Lobva (estación afluente). Los parámetros de la ecuación (10) se calcularon para los años 1966 y 1967, que son los primeros años del periodo de estudio, cuando se supone que no había tanta influencia antropogénica en el régimen fluvial. Los pronósticos hidrológicos se hicieron para los últimos años de la serie de datos observados (1988-1994), pero la aplicación de este método tampoco dio resultados aceptables para el pronóstico del caudal en la estación final Sosva-Sosva: los hidrogramas pronosticados tuvieron errores de hasta 30% (ilustración 5a). Los cálculos obtenidos indican que en el periodo verano-otoño se observan errores menores de 5 a 15%, pero las fechas de llegada de los picos de las crecidas en estas temporadas no coinciden por tres a cinco días con las reales. Así, se decidió que este método no era suficiente y que sería necesario tomar en cuenta el efecto de transformación del hidrograma de crecida en los cálculos.

c) El cálculo de la influencia de transformación del hidrograma para la sección del río con un afluente se hace con la siguiente dependencia:

$$Q_{f,t+\tau} = f(Q_{in,t} + Q_{aff}) \quad (13)$$

donde:

Q_{aff} = caudal del afluente lateral.

Si se supone que el caudal se transforma en el cauce del río en una magnitud ΔQ_r , se tiene:

$$Q_{f,t+\tau} = f(Q_{in,t} + Q_{aff} + \Delta Q_r) \quad (14)$$

donde:

$Q_{in,t}$ = caudal en la estación inicial en el instante t .

Q_{aff} = caudal del afluente lateral.

La magnitud ΔQ_r depende del caudal en la estación final y del grado de llenado del cauce en la sección del río en el momento en que en la estación inicial se observe el caudal $Q_{in,t}$. Por eso, el valor de ΔQ_r se puede recalcular aproximadamente por la diferencia de los caudales que caracteriza el ascenso de la crecida. Por ejemplo:

$$\Delta Q_r = f(Q_{in,t}, Q_{f,t}) \quad (15)$$

Sumando el caudal de las estaciones hídricas iniciales y contando el tiempo de retraso, se tiene: ($\sum Q_{t-\tau}$) y

$$Q_{f,t} = f[Q_{in,t-\tau} + Q_{aff}, F] \quad (16)$$

donde:

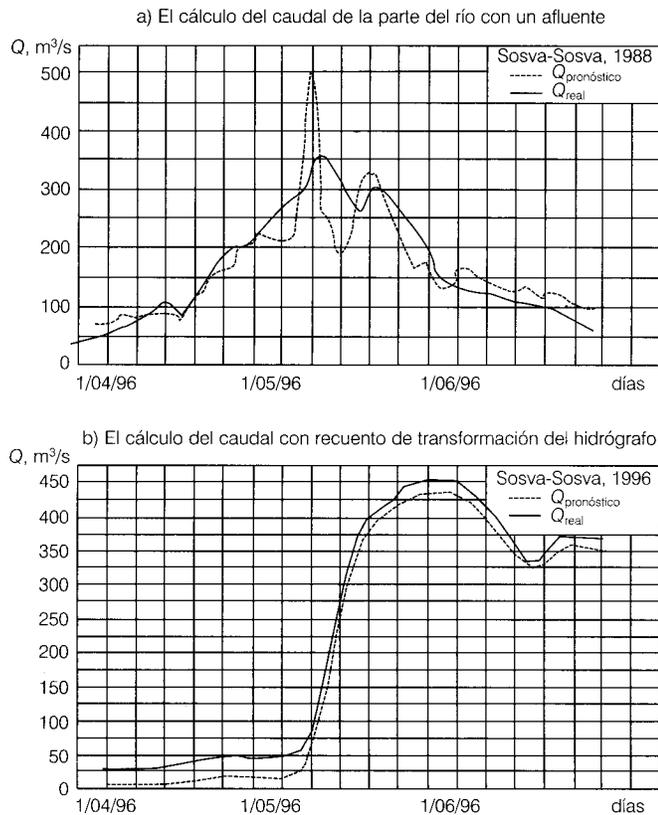
F = características de la forma de la crecida.

Con lo anterior, la ecuación 15 se escribe finalmente como $\Delta Q = (Q_{in,t} - Q_{f,t})$. Así, la ecuación final para el pronóstico tendrá la forma:

$$Q_{f,t} = a_1\delta Q_{1,t-\tau_1} + a_2\delta Q_{2,t-\tau_2} + a_3(Q_{f,t} - Q_{in,t}) \quad (17)$$

El algoritmo del pronóstico por este método (ecuación 17) fue elaborado en formato de *Norton Commander*, sistema DOS, y resuelto con un archivo ejecutable de *Windows*. Los resultados de pronóstico del caudal con cinco días de anticipación se presentan en la ilustración 5b.

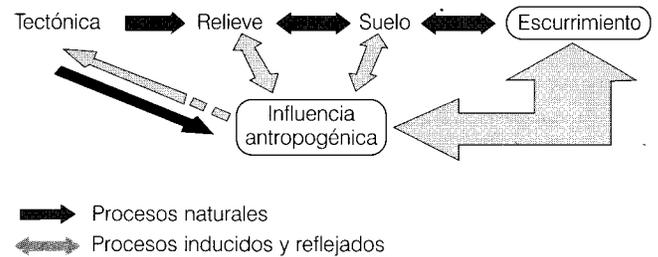
Ilustración 5. Resultados de aplicación de métodos matemáticos.



Es importante notar que en este caso existe coincidencia entre hidrogramas reales y pronosticados, y que este método sirve para reproducir el comportamiento del caudal tanto en los periodos de primavera como en los de verano-otoño. Los mejores resultados se obtuvieron calculando los parámetros de la ecuación de la regresión para los años 1966 y 1967 (igual que en el punto anterior). Sin embargo, hay que decir que este método no es recomendable para hacer pronósticos en la estación hidrométrica media Sosva-Morozkovo.

Se observa el aumento del caudal en los hidrogramas reales sobre los pronosticados entre un 2 y 12%, lo que reafirma el resultado obtenido por métodos estadísticos. De lo anterior, se puede decir que en el área de la cuenca del río Sosva casi no han cambiado los parámetros de las ecuaciones de regresión y de igual forma no se han alterado las condiciones originales del escurrimiento. Esto puede interpretarse como que en el periodo de 1954 a 1994 la actividad económica influyó muy poco en la modificación de las características cuantitativas del escurrimiento del río Sosva y, en consecuencia, no se alteraron los ecosistemas acuáticos y territoriales

Ilustración 6. Esquema de interacción de procesos.



que dependen de dichas características fluviales. Este cambio del caudal tan insignificante (sólo cerca de 10%, que consiste en el doble del error en la medición de escurrimiento y no en 30 a 40% de lo esperado, según fuentes bibliográficas) puede explicarse por el funcionamiento de los factores naturales de compensación que disminuyen el efecto de los inducidos (Perevochtchikova, 2003).

En la ilustración 6 se muestran procesos inducidos que influyen en los cambios del escurrimiento, que tienen su propia acción natural por parte tectónica, relieve y suelo; en estos procesos interactúan muchos factores que pueden compensarse entre sí (disminuyendo o aumentando su influencia); pero en la práctica sólo a los factores naturales se les llama factores de compensación. Para el caso de la cuenca del río Sosva, éstos son pendiente del terreno entre 3 y 7%, presencia del suelo cárstico en su territorio, alta explotación de agua subterránea, tala de bosques en zonas montañosas y ancha planicie de inundación por el río principal, entre otros.

Resultados

Los principales resultados se pueden formular de la siguiente manera:

- El análisis por métodos estadísticos mostró los cambios más perceptibles del caudal máximo medio anual del río Sosva, ocurridos en los años 1966 y 1975, con un promedio de aumento cercano al 10%.
- Se pudieron establecer algunas de las posibles causas del cambio de régimen fluvial natural en la cuenca bajo influencia antropogénica.
- El análisis por el método de simulación matemática mostró la utilidad del método de niveles correspondientes para pronóstico del caudal del río Sosva (a tiempo corto) con un resultado de aumento del caudal de 4 a 12%, en comparación con los hidrogramas actuales (medidos).
- En total, el aumento del caudal máximo medio anual en la cuenca del río Sosva resultó sólo de casi

10%, que consiste en el doble del error de la medición de escurrimiento y no de 30 a 40% de lo esperado, de acuerdo con fuentes bibliográficas; esto puede significar que el 20 a 30% pertenece al comportamiento de los factores naturales de compensación (características particulares del suelo, relieve y tectónica de la zona) que disminuyen el cambio del caudal bajo la influencia humana en la estación hidrométrica final.

Discusión

En el análisis de la influencia de la actividad económica en el régimen fluvial hay dos puntos importantes: primero, cuando se menciona el régimen fluvial, normalmente se refiere a escurrimiento superficial (con la justificación de que cualquier cambio en el escurrimiento se ve a simple vista y su efecto es inmediato), y segundo, la modificación del escurrimiento está influida por procesos inducidos (antropogénicos) y naturales (ilustración 6).

Así, se considera importante incorporar en la discusión el comportamiento preciso de los factores de compensación, porque desde el punto de vista de los sistemas del flujo de agua subterránea (Toth, 1995) sería interesante incluir la relación entre agua superficial y subterránea, con el fin de distinguir algunos factores físico-geográficos de la cuenca que podrían corregir o ratificar los resultados obtenidos.

Los métodos matemáticos usados, aunque describen de alguna manera el comportamiento hidrológico del río, no describen el funcionamiento del proceso como tal y no indican el marco físico-geográfico particular. Por ejemplo, en cuanto al tipo de material geológico, se ignora que en la zona se tiene la presencia de rocas caliza-cárstica en una extensión de 200 km de longitud y un ancho de 10 a 30 km, que cruza en dirección meridional a la cuenca en su parte montañosa; también que la distribución de agua subterránea por el subsuelo es a través de materiales con fisuras y de tipo cárstico (muy permeable) y que los manantiales producen de 5 a 10 l/s, y los pozos 10 a 30 l/s, ambos explotados intensamente para actividades industriales y domésticas. Es evidente que, si bien se hace un análisis considerando la cuenca del río Sosva, la influencia extra-cuenca de agua subterránea debe incorporarse como una variable determinada, ya que en unidades geológicas de grandes dimensiones (Carrillo-Rivera, 2000) como este caso, es factible

que cuencas superficiales estén comunicadas hidrológicamente en el nivel de subsuelo.

Recibido: 26/11/2004

Aprobado: 23/05/2005

Referencias

- CARRILLO-RIVERA, J.J. Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in tow semi-arid drainage basins, Mexico. *Hydrogeology Journal*. Núm. 8, 2000, 503-520 pp.
- GEORGIEVSKY, Y.M. *Pronósticos hidrológicos de tiempos cortos*. Leningrado: LPI, 1982, 100 pp. (en ruso).
- LINSLEY, R. K., PAULHUS, J. L. H. y KOHLER, M. A. *Hidrología Aplicada*. Leningrado: Gidrometeoizdat, 1962, 759 pp. (en ruso).
- ORLOV, V.G. y TRUSHEVSKY, V.L. *Aspectos ecológicos de la gestión del agua*. San Petersburgo: Gidrometeoizdat, 1999, 183 pp. (en ruso, traducción al inglés).
- PEREVOCHTCHIKOVA, M. *Análisis de la influencia de la actividad económica en los cambios del caudal máximo en la cuenca del río Sosva*. Memorias de la Conferencia Internacional "Los problemas ecológicos y hidrometeorológicos de las ciudades grandes y zonas industrializadas". San Petersburgo, 2000 (en ruso).
- PEREVOCHTCHIKOVA, M. *Análisis de la influencia de la actividad económica en los cambios del caudal máximo de los ríos en la cuenca del río Sosva*. Tesis de doctorado. San Petersburgo, 2003 (en ruso).
- SHELUTKO, V.A. *Métodos numéricos en hidrología*. Leningrado: LPI, 1983, 155 pp. (en ruso).
- SHELUTKO, V.A. *Modelos estadísticos y métodos de investigación de variaciones de muchos años del caudal*. Leningrado: Gidrometeoizdat, 1984, 160 pp. (en ruso).
- SHIKLOMANOV, I.A. *Cambios antropogénicos del escurrimiento de los ríos*, Leningrado: Gidrometeoizdat, 1979, 304 pp. (en ruso).
- SHIKLOMANOV, I.A. *Influencia de la actividad económica en escurrimiento fluvial*. Leningrado: Gidrometeoizdat, 1989, 335 pp. (en ruso).
- TOTH, J. Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeology Journal*. Vol. 3, núm. 4, 1995.
- VLADIMIROV, A.M., LIAJIN Y.I., MATVEEV L.T. y ORLOV V.G. *Protección del medio ambiente*. Leningrado: Gidrometeoizdat, 1991, 423 pp. (en ruso).

Abstract

Perevochtchikova, M. Analysis of the hydrological regime under the influence of economic activity. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXI, no. 2, April-June, 2006, pp. 83-92.

Nowadays, problems related with the use of water are, each day, more noticeable in the world, they are reflected in negative changes in water quality and quantity. Particularly, in this paper, was carried out an analysis of influence of the economic activities on the hydrological regime changes to pose some problems on the protection of the environment, findings are useful as additional elements to property design, an integral strategy of water management on the industrially developed regions. In this case, the analysis in the Sosva river basin, Russia, shows similar results for different methods of evaluations. The greatest flow from 1954 to 1994 increase, was due to the influence of anthropics factors, just 10% (this represents double the error in run-off measurement) instead of a possible expected change of 30-40%, this difference is interpreted as the influence of some physical and geographical factors that compensate changes in the induced flow.

Keywords: *economic activity, run-off, hydrological regime, statistical and mathematical methods.*

Dirección institucional de la autora:

María Perevochtchikova

Doctora en Geografía

Estancia posdoctoral en el Instituto de Geografía, UNAM, en el Departamento de Geografía Física, Cd. Universitaria, C.P. 04510, Coyoacán, México, D.F., teléfono: + (52) (55) 5622 4335, extensión 45509, maria_perev@yahoo.com.mx