

Valoración de cambios hidrológicos en la cuenca del río Bogotá*

Assessment of Hydrologic Changes in the Bogotá River Basin

Mario A. Díaz-Granados Ortiz^{(1)*} y Luis A. Camacho Botero^{(2)*}

⁽¹⁾ MSCE, Profesor Titular, mdiazgra@uniandes.edu.co

⁽²⁾ PhD, Profesor Asociado, la.camacho@uniandes.edu.co

* Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia,

Palabras claves

cuenca del río Bogotá, estacionaridad, diseño hidrológico..

Key words

Bogotá river basin, hydrologic design, stationary.

Resumen

En este trabajo se presentan reflexiones sobre el diseño hidrológico asociado a eventos extremos, algunas consideraciones sobre la suposición de estacionaridad, e implicaciones de la no estacionaridad en el diseño hidrológico. Se muestran algunos análisis que pretenden ilustrar variaciones hidrológicas en la cuenca del río Bogotá, mediante pruebas estadísticas de tendencias y saltos; cambios en el uso del suelo y procesos de urbanización; agradación del fondo del cauce en algunos tramos, e inclusión de fenómenos macroclimáticos en el análisis de frecuencia de caudales máximos. Por último, se presentan algunas consideraciones finales sobre las diferentes influencias naturales y antrópicas que afectan los sistemas hidrológicos. Asimismo, plantea la necesidad de análisis de los registros hidrológicos existentes, junto con información contextual, y la importancia de incrementar los esfuerzos de medición, análisis y modelación en la cuenca del río Bogotá.

Abstract

In this article some reflections are presented about hydrologic design related to extreme events, with some considerations regarding stationarity, and implications of the nonstationarity on hydrologic design. Some analyses are shown to illustrate hydrologic variations in the Bogotá river basin, using statistical tests for trends and step jumps in the mean, changes in soil uses and urbanization processes, sedimentation of streams in some reaches, and inclusion of macroclimatic phenomena in frequency analysis of maximum flows. Finally, some remarks are presented regarding the different natural and anthropogenic influences that affect hydrologic systems. Likewise, it presents the need of historical data analysis with contextual supporting information, and the importance of incrementing hydrologic measurements, analysis and modeling in the Bogotá river basin.

INTRODUCCIÓN

Este artículo tiene por objeto mostrar algunos análisis básicos y simples que pretenden ilustrar lo que puede estar pasando en la cuenca del río Bogotá en relación con la magnitud y frecuencia de eventos hidrológicos, debido no sólo a la variabilidad climática y el cambio climático, sino también a la dinámica de la ocupación del espacio y usos del suelo asociada a las diferentes ac-

tividades antropogénicas que afectan notoriamente el balance hídrico de la cuenca. Antes de estos análisis, y con el objetivo de enfocarlos al contexto del Foro “Hidrología de extremos y cambio climático”, se considera importante recordar algunos conceptos de hidrología relacionados con el riesgo hidrológico que está presente en los diseños de estructuras hidráulicas e infraestructura. Los diseños de estructuras para control de inundaciones, drenaje y control de

contaminación se basan en una magnitud hidrológica de diseño, que permite dimensionar la estructura. Esta magnitud tiene dos características importantes: (1) un valor límite superior, y (2) una estructura probabilista representada por una función de densidad de probabilidad asociada, con base en la cual se pueden definir períodos de retorno a diferentes magnitudes hidrológicas. En algunos casos, se utiliza –como valor de diseño– el valor límite superior,

* Este artículo es el resultado de la ponencia de Mario A. Díaz-Granados y Luis Camacho, que se llevó a cabo en el foro “Hidrología de extremos y cambio climático”, realizado en la Universidad de los Andes el día 28 de junio de 2011.

por ejemplo, en el diseño de vertederos de grandes presas donde éstos se diseñan para la creciente máxima probable (conceptualmente no habría ninguna amenaza residual). Sin embargo, en la mayoría de los casos, los diseños se realizan con base en el concepto de período de retorno de diseño. El período de retorno se define como el número de años que en promedio la magnitud hidrológica es igualada o excedida y, por lo tanto, los diseños hidrológicos basados en períodos de retorno conllevarán intrínsecamente una amenaza hidrológica residual. Reiterando, muchas estructuras hidráulicas se diseñan con base en la definición de un período de retorno de diseño y, consecuentemente, tienen amenaza hidrológica residual expresada como una probabilidad de que la estructura sea hidrológicamente sobrepasada [1]. Así, si una estructura se diseña para un período de retorno de 100 años, se espera que sea sobrepasada en promedio 1 vez cada 100 años, lo cual es equivalente a decir que la probabilidad de que en cualquier año –de la vida útil de la estructura– se presente un evento igual o mayor que el de diseño es de 1/100.

SELECCIÓN DEL PERÍODO DE RETORNO DE DISEÑO

Existen varias maneras de escoger el valor del período de retorno [1]. La primera y más fácil es la que se puede denominar por prescripción, en la cual la agencia responsable define el valor del período de retorno a utilizar. En el caso de diques de protección de zonas urbanas, por ejemplo, en los Estados Unidos, se diseñan para 50 a 200 años de período de retorno (el diseño estándar del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) es de 200 años con borde libre mínimo de 0.9 m) [2]. Pero, debido a que el Programa Nacional de Seguros de Inundaciones cubre daños dentro de las planicies de inundación que, estén protegidas con diques diseñados para períodos de retorno de al menos 100 años [3], este valor es ampliamente adoptado. En Holanda, los diques costeros se

Tabla 1. Períodos de retorno de diseño en función del riesgo asumido y de la vida útil esperada de la estructura Fuente. Tomado de [1]

Riesgo	Vida útil esperada (años)					
	5	10	25	50	75	100
0.01	498	995	2488	4975	7463	9950
0.05	98	195	488	975	1463	1950
0.1	48	95	238	475	712	950
0.2	23	45	113	225	337	449
0.3	15	29	71	141	211	281
0.4	10	20	49	98	147	196
0.5	8	15	37	73	109	145
0.6	6	11	28	55	82	110
0.7	5	9	21	42	63	84
0.8	4	7	16	32	47	63
0.9	3	5	11	22	33	44
0.95	2	4	9	17	26	34

diseñan hasta para 10.000 años [4], y los diques de primer nivel entre 1250 y 10.000 años [2]. En hidrología urbana los períodos de retorno de diseño pueden ser tan bajos como 2 o 3 años. El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) [5] prescribe períodos de retorno de diseño de alcantarillado pluvial o combinado según características del área de drenaje (área, uso y pendiente) y nivel de complejidad del sistema, con valores que varían entre 2 y 50 años. El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) [6] prescribe períodos de retorno de diseño de acuerdo con el tipo de obra de drenaje de carreteras así: 5 años para cunetas; 10 años para alcantarillas de 0.9 m de diámetro y 20 años para diámetros mayores; 50 años para puentes con luz entre 10 y 50 m; y 100 años para luces mayores que 50 m.

La segunda forma es definir el valor del período de retorno adoptando un nivel de riesgo hidrológico aceptable durante la vida útil de la estructura. El riesgo hidrológico se define como [7, 8, 9]:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_D}\right)^N \quad (1)$$

Con la suposición de que los eventos extremos anuales son independientes, y

donde R representa la probabilidad de que ocurra al menos un evento mayor o igual que el de diseño (el cual tiene un período de retorno T_D) durante la vida útil esperada N de la estructura. A partir de la Ecuación 1, la expresión para el período de retorno de diseño es:

$$T_D = \frac{1}{1 - (1 - R)^{1/N}} \quad (2)$$

De acuerdo con la Ecuación 2, en la Tabla 1 se presentan valores de T_D para diferentes niveles de adopción de riesgo y valores de vida útil esperada. Se observa que entre menor sea el riesgo asumido, T_D debe ser mayor, y que a mayor vida útil esperada (es decir mayor exposición) T_D debe ser mayor para un mismo nivel de riesgo hidrológico. Nótese que diseños con T_D igual a N implican un riesgo de 63%. En el diseño del sistema ataguía-túnel de desviación para la construcción de presas es usual adoptar un caudal de diseño con T_D de 50 años, el cual junto con un período de exposición de 5 años (equivalente a su vida útil), implica un riesgo hidrológico de 9.6%. El sismo de diseño en las normas colombianas de construcción sismorresistente es de T_D igual a 475 años, obtenido al asumir un nivel de riesgo sísmico del 10% en

un lapso de 50 años [10]. Para el caso de los diques holandeses con período de retorno de diseño de 10.000 años, la Tabla 1 podría indicar un riesgo asumido de tan sólo 1% para una vida útil esperada de 100 años. En contraste, un dique diseñado para 100 años de período de retorno, con una vida útil de 50 años, conllevaría un riesgo de 0.4, equivalente a decir que la probabilidad, durante su vida útil, sea sobrepasado al menos una vez es del 40%. En el contexto urbano, donde se diseñan componentes del alcantarillado con períodos de retorno del orden de 5 años, el riesgo es total, aunque las consecuencias negativas asociadas son en promedio significativamente menores.

La tercera manera de definir el período de retorno es mediante análisis económico, por ejemplo, con base en lo siguiente: la Figura 1a muestra la relación entre período de retorno de diseño y costo de construcción C_C , indicando que entre mayor sea T_D mayor será este último; la Figura 1b representa la relación entre T_D y el valor esperado de los daños a lo largo de su vida útil D_E , el cual disminuye con T_D ; la suma de las dos curvas anteriores resulta en el costo total C_T (ver Figura 1c), el cual se quiere sea mínimo. Por lo tanto, el T_D óptimo debe cumplir con la siguiente ecuación:

$$\frac{dC_T}{dT_D} = \frac{dC_C}{dT_D} + \frac{dD_E}{dT_D} = 0 \quad (3)$$

Otra forma, con bases económicas, de establecer el período de retorno óptimo de diseño es maximizando los beneficios netos, donde además de los costos se deben considerar los beneficios ver [1].

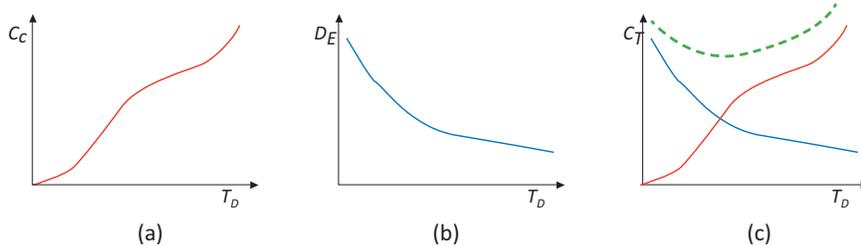
Lo anterior, nos deja una lección importante: pocas estructuras hidráulicas se diseñan para soportar el peor evento hidrológico posible. Por el contrario, la mayoría se diseñan para un determinado período de retorno y, por lo tanto, existe una probabilidad de que sean sobrepasadas hidrológicamente en uno o más momentos de su vida útil, trayendo afectaciones a personas y bienes. Entre mayor sea el período de retorno de diseño, menor es esta probabilidad. Esto es válido tanto para los diques holandeses como para los del río Bogotá, o los del canal del Dique, aunque, esa probabilidad es mayor en estos dos últimos, pues sus períodos de retorno de diseño han sido de algunas decenas de años. Desde el punto de vista económico, cada estructura tiene un contexto particular de costos y beneficios (o reducción de daños), por lo cual debería tener un análisis específico de optimización de éstos, dentro de soluciones integrarles regionales de problemáticas específicas (por ejemplo de inundaciones). En ocasiones lo que fue diseñado bajo un determinado contexto de costos y beneficios –asociado a un determinado uso del suelo– puede volverse progresivamente inapropiado debido a condiciones cambiantes de tipo climático. También de ocupación del espacio y de cambio en el uso del suelo.

ESTACIONARIDAD Y NO ESTACIONARIDAD

Las formas descritas de definición de períodos de retorno tienen la suposición de estacionaridad. Ésta acepta que el pasado represente la mejor información disponible para estimar lo esperable en

el futuro, e implica que cualquier variable hidrológica (por ejemplo caudal) tiene una función de densidad de probabilidad invariante en el tiempo, cuyas propiedades pueden ser estimadas de registros históricos [11]. Esta condición implica que no hay tendencias, ni saltos en la media, y la varianza es constante a lo largo del tiempo. Esta suposición puede ser inapropiada por [12,13]:

1. Alteraciones antropogénicas en el sistema hidrológico (por ejemplo en una cuenca) debido a procesos de urbanización (aumento de superficies impermeables); cambios en el uso del suelo (expansión de la frontera agrícola, deforestación, minería); explotación de aguas subterráneas (cambios en el flujo base); construcción de infraestructura hídrica y vial (presas y embalses, diques, carreteras, puentes, etc.), entre otros, que afectan las relaciones en el ciclo hidrológico (por ejemplo la relación lluvia-escorrentía).
2. Variabilidad climática natural; el sistema climático terrestre es altamente complejo y no lineal [14]. Cambios en un factor cualquiera (por ejemplo la actividad volcánica) pueden ser amplificadas o amortiguadas mediante retroalimentaciones en algunas variables climáticas afectables. La variabilidad climática natural puede deberse a factores externos o internos a lo largo de diferentes escalas de tiempo (por ejemplo, los ciclos de Milankovic, la actividad solar, la actividad volcánica, los fenómenos macroclimáticos como el calentamiento del océano Pacífico tropical, la zona de convergencia intertropical, las oscilaciones intra estacionales, etc.), que pueden en algunos casos mostrar cuasi-periodicidad y persistencia hidrológica.
3. Variaciones climáticas inducidas por acción antrópica (cambio climático antropogénico), asociadas, principalmente, a emisión de gases de invernadero. En los últimos 100 años el planeta ha mostrado un incremento de 0.7°C en su temperatura media. De acuerdo con los modelos climáticos



Fuente. Tomado de [1]
Figura 1. Análisis de costo mínimo

globales, un incremento de 1°C en la temperatura incrementaría el agua precipitable en aproximadamente 7% y el promedio de lluvia en 2% [13], con tendencia en las regiones húmedas a ser más húmedas y en las secas a ser más secas [14]. Hoy en día las discusiones sobre los impactos en los extremos hidrológicos indicarían en general mayor variabilidad hidrológica (lluvias intensas más frecuentes, crecientes más grandes y sequías más fuertes y prolongadas).

Consecuentemente, si se considera que el caudal producido por una cuenca corresponde a un proceso estacionario, implicaría que la cuenca misma debe ser un sistema estacionario (ante una misma entrada produce siempre la misma salida), lo cual no sería cierto dadas las no linealidades presentes en ésta, además de la eventual presencia de cambios en el uso del suelo, urbanización, regulación de caudales, trasvases, control fluvial, procesos de agradación y degradación fluvial, vertimientos antrópicos, explotación de agua subterránea, etc. Adicionalmente, para que el caudal sea estacionario es necesario que la precipitación sobre la cuenca también lo sea, y consideraciones como variabilidad y cambio climático contribuirían a que no lo fuera.

Si el caudal producido por una cuenca no es estacionario, debe ser posible detectar cambios en la frecuencia de eventos extremos analizando los registros históricos [15]. En 1998, Bradley planteaba los siguientes interrogantes con respecto a los registros históricos de eventos extremos disponibles [16]: ¿Hasta dónde hay una señal climática en los registros de eventos extremos hidrológicos?; ¿son las variaciones en los eventos extremos lo suficientemente no aleatorias para poder distinguir de un proceso aleatorio estacionario?; ¿son los registros históricos disponibles lo suficientemente largos para intentar identificar lo anterior? Estas preguntas se enmarcan dentro de los análisis de no estacionaridad que buscan detectar saltos y tendencias en las series de datos hidrológicos [17]. Lo fundamental

es que en su identificación, estos saltos y tendencias, deberían tener causas conocidas y predecibles para estimar condiciones futuras. Pese a que los saltos y tendencias son usualmente detectados estadísticamente, esto no representa bases sólidas para su extrapolación hacia el futuro [18]. Indudablemente, los análisis pueden ser más robustos si se utiliza un enfoque regional [19].

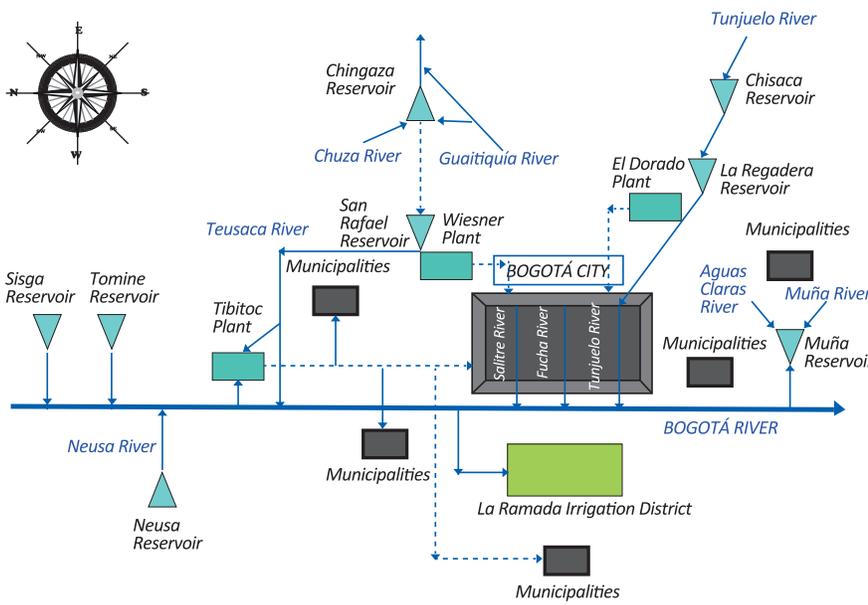
En relación con la posibilidad y pertinencia de involucrar la no estacionaridad en los análisis de frecuencia para diseño hidrológico, existen variadas posiciones al respecto. En general se acepta que matemáticamente se pueda desarrollar análisis de frecuencia considerando la no estacionaridad. Un ejemplo de esto es la propuesta de Stedinger y Griffis [20] que plantea extender el modelo log-Pearson tipo 3 del Boletín 17B de los EE.UU (que reglamenta los análisis de frecuencia de extremos hidrológicos en ese país) haciendo que la media y/o la desviación estándar y/o el coeficiente de asimetría sean función del tiempo, con soporte en bases causales físicas. La mayor dificultad de este tipo de procedimientos radica en la modelación de la no estacionaridad. En el caso de que ésta esté relacionada con cambios en el uso del suelo, por ejemplo, Clarke, [12] describe la siguiente aproximación: si (a) hay registros disponibles que muestren cómo la deforestación y las áreas urbanas se han incrementado progresivamente en el tiempo; si (b) se logra establecer cómo los caudales máximos cambian con las tasas de cambio del uso del suelo; si (c) hay límites superiores a la extensión espacial de la deforestación y áreas urbanas impermeables que se puedan especificar razonablemente, entonces, (d) se pueden hacer análisis de frecuencia año tras año y, asimismo, predecir frecuencia de ocurrencia de máximos, luego de que se llegue al estado estable. El efecto en la frecuencia de extremos hidrológicos de la variabilidad climática, asociada, por ejemplo, a fenómenos macroclimáticos puede ser incorporada mediante análisis de frecuencia con distribuciones mixtas

[21], o análisis de frecuencia discriminados, según extremos anuales asociados a eventos Niño, Niña y períodos normales [22, 23].

Es evidente que la variabilidad y cambio climático pueden opacar la suposición de estacionaridad —o hasta matarla, ver [11]— pero ésta para muchos problemas de recursos hidráulicos permanece como un modelo operacional útil [16], pues aún hoy en día no es claro qué métodos alternativos deberían usarse en su reemplazo para ser involucrados en normas de diseño [16]. Dada la precisión actual de las mediciones hidrológicas, especialmente de caudal, puede hacer que la no estacionaridad esté enmascarada y que por lo tanto no pueda ser detectada, haciendo que el uso de modelos estacionarios sea la alternativa a pesar de ser consientes de aquella. Clarke, [12] argumenta que, mientras que la tasa de cambio climático sea baja y nuestra atención se centre en la predicción de eventos extremos en los próximos 100 años o similar, los métodos existentes basados en la suposición de estacionaridad no estarían en gran error, particularmente, si el horizonte de planeamiento no es mayor que 50 años.

ALGUNOS ANÁLISIS EN LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ

Dados los elementos previamente presentados, en este numeral se muestran algunos análisis y consideraciones para el caso de la cuenca del río Bogotá. En la Figura 2 se presenta un diagrama de la cuenca que resalta los principales elementos que la componen en sus partes alta y media, destacándose los embalses existentes de Sisga, Tominé, Neusa, Chingaza, San Rafael, Chisacá, La Regadera y Muña, los municipios de aguas arriba y aguas abajo de la ciudad de Bogotá, las plantas de potabilización de Tibitoc, Wiesner y El Dorado, y el distrito de riego de La Ramada. Tibitoc aprovecha el agua del río Bogotá, mientras que Wiesner, trata el agua proveniente del páramo de Chingaza constituyéndose en un trasvase que surte de agua potable al 70% de la ciudad. Las poblaciones ribe-



Fuente. Tomado de [24]
Figura 2. Cuenca media río Bogotá

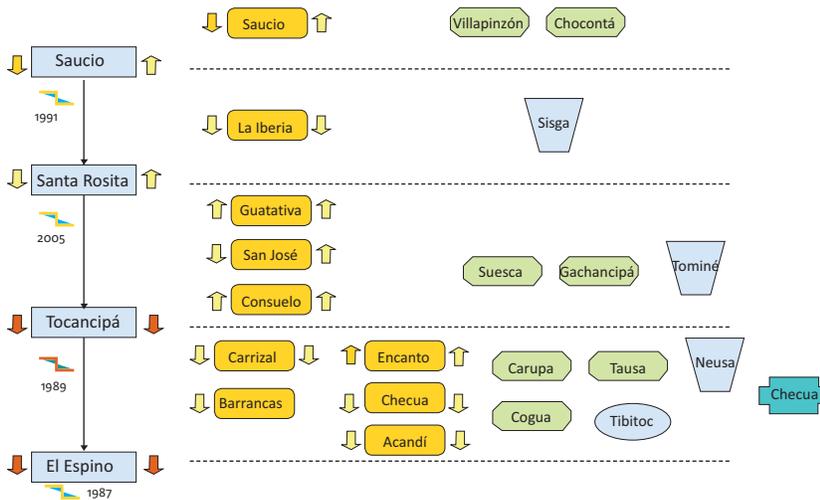


Figura 3a. Esquematzación cuenca alta y media del río Bogotá

reñas aprovechan el agua del río Bogotá para diferentes usos y generan vertimientos que afectan su calidad de agua, destacándose las aguas residuales de la capital. Además, están la cadena de generación hidroeléctrica Pagua con 600 MW instalados y otras plantas menores que aprovechan el caudal del río Bogotá y 2000 m de diferencia de elevación entre la Sabana de Bogotá y la población de Mesitas del Colegio.

Existen varias pruebas estadísticas que permiten identificar la presencia de tendencias y saltos aplicables a series de tiempo de variables hidrológicas, en particular, pruebas de tendencia como las de Mann-Kendall, Ro de Sperman y pendiente Sen, y de saltos como la de Suma Acumulada, Desviación Acumulada y Verosimilitud de Worsley [25, 26, 27]. Estas pruebas se aplicaron a varias estaciones de medición de pre-

cipitación y caudales en la cuenca del río Bogotá. En las Figuras 3 (a, b y c) se muestra un esquema de la cuenca alta y media, sectorizada con base en las estaciones hidrométricas seleccionadas del río Bogotá, y donde además están las estaciones de medición de precipitación, las poblaciones, los embalses, las plantas de tratamiento, los afluentes principales, el trasvase, el distrito de riego y los caudales de retorno principales. Las flechas que aparecen tanto a la izquierda como a la derecha de cada estación hidrométrica y de lluvia indican la tendencia observada en la correspondiente serie de tiempo de valores anuales (izquierda) y de valores máximos mensuales anuales (derecha). Flechas ascendentes indican presencia de tendencia monótona creciente con el tiempo (lo contrario para las descendentes), y la intensidad del color de éstas indican el grado de significancia de la prueba estadística (blanco → amarillo claro → amarillo → ocre → bermellón), incrementándose la significancia según esta secuencia.

Además, en el caso de las estaciones de caudal se muestra si la serie correspondiente mostró significancia en relación con saltos (indicándose salto ascendente o descendente con colores similares a los descritos para el grado de significancia, y donde además se anota el año de detección del salto). En la estación hidrométrica de Saucio se observa que hay una tendencia de disminución de los caudales anuales al igual que del caudal máximo mensual del año. Esta tendencia se mantiene hacia aguas abajo hasta Puente Vargas, con mayor significancia estadística en las estaciones de Tocancipá y El Espino. De El Espino hacia aguas abajo, los valores anuales muestran tendencias decrecientes con excepción notoria en la estación Las Huertas, ubicada aguas abajo de la ciudad de Bogotá. Esta tendencia decreciente, ¿se debe a una disminución de la lluvia? La respuesta no es evidente, pues en las estaciones de lluvia en estas sub-áreas se observan tendencias tanto decrecientes como crecientes con niveles de significancia no

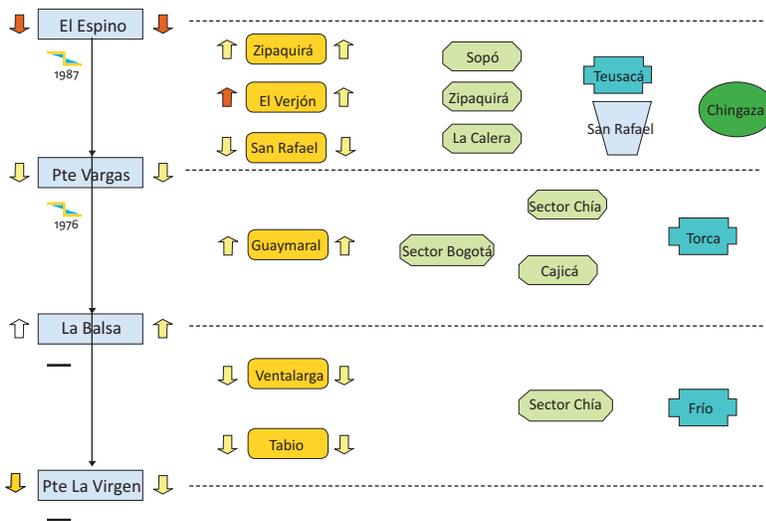


Figura 3b. Esquematación cuenca alta y media del río Bogotá

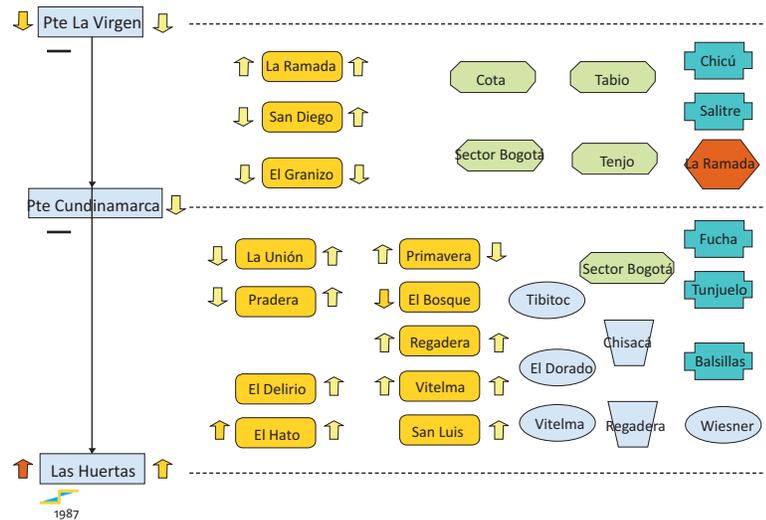


Figura 3c. Esquematación cuenca alta y media del río Bogotá

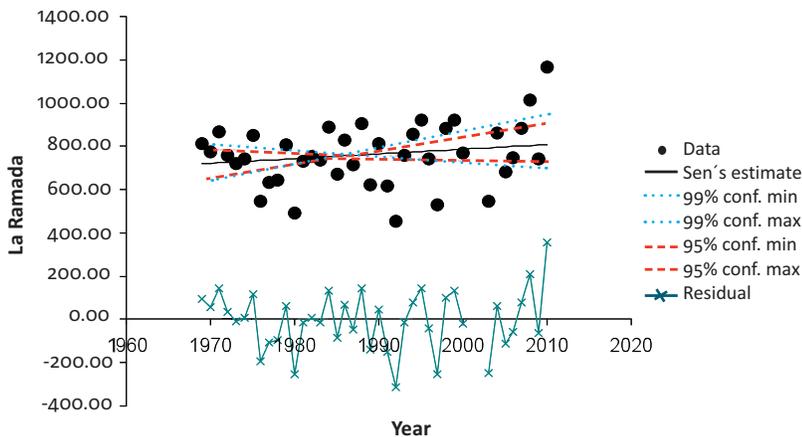


Figura 4. Pendiente Sen, estación La Ramada

muy altos en general. Es posible pensar que, en el comportamiento descrito, el uso del suelo y del agua pueda estar contribuyendo a lo observado. Así, la tendencia ascendente que muestran los caudales anuales en las estaciones La Balsa y Las Huertas podría estar asociada al incremento gradual de los aportes de agua residual provenientes de la cuenca del río Torca y las cuencas de los ríos Fucha y Tunjuelo, respectivamente.

La Figura 4 muestra el análisis de tendencia mediante la pendiente Sen para la estación de lluvia de La Ramada, representada por la línea continua. Puede observarse una tendencia creciente, enmarcada dentro de bandas de confiabilidad de 95 y 99%. En algunos casos es posible observar tendencia opuesta a la pendiente Sen en alguna de estas bandas límite, indicando la incertidumbre que podría estar presente en la prueba estadística correspondiente.

La Figura 5 (a y b) busca ejemplificar el cambio en el suelo urbano en la ciudad de Bogotá. Lo anterior, corresponde a las imágenes Landsat de 1991 y 2002 procesadas para resaltar las áreas verdes urbanas. Para el mismo perímetro de análisis, en 1991 había 31% de áreas verdes mientras que para 2002 éstas se redujeron al 19%, equivalente, a 380 hectáreas por año. El efecto de urbanización en los caudales es claramente un factor de relevancia en los análisis del comportamiento de sus series de tiempo.

En la Figura 6 (a, b, c y d) se muestran las condiciones reportadas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá de nivel de agua en el río Bogotá para el día 5 de octubre de 2011 (en plena ola invernal reciente) en las estaciones Puente La Virgen, La Alameda, La Isla y Las Huertas. En cada uno de los tres tramos definidos por estas estaciones entran los ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo, respectivamente. En Puente La Virgen, con un caudal estimado de 45 m³/s, hubo desbordamientos hacia la margen izquierda e inundaciones. En La Alameda (luego del ingreso del río Salitre) el caudal estimado fue de 66 m³/s, y en La Isla (luego de la entrada

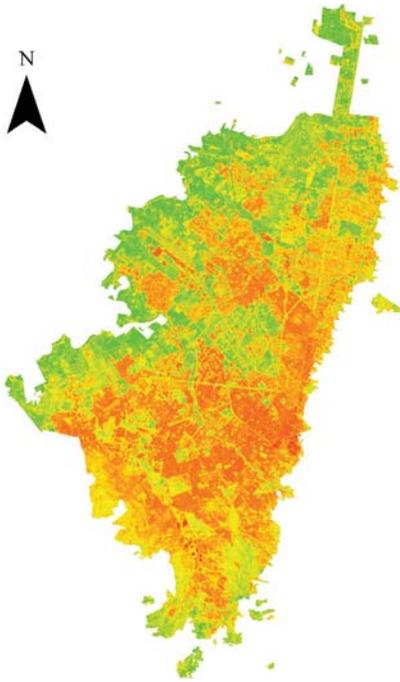


Figura 5a. Áreas verdes, 1991

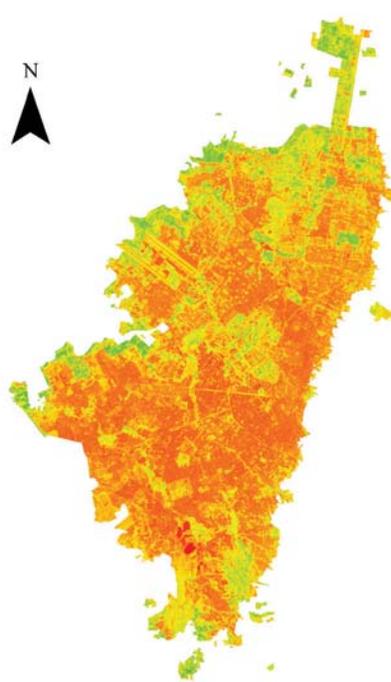


Figura 5b. Áreas verdes, 2002



Figura 6a. Sección transversal estación Puente La Virgen (5/10/2011)



Figura 6d. Sección transversal estación Las Huertas (5/10/2011)

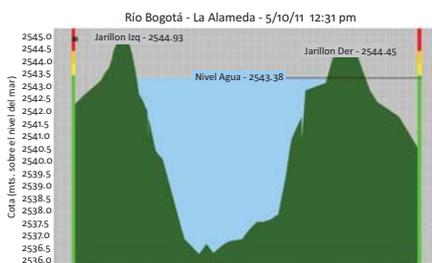


Figura 6b. Sección transversal estación La Alameda (5/10/2011)

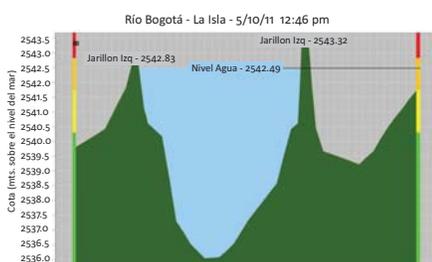


Figura 6c. Sección transversal estación La Isla (5/10/2011)

del río Fucha) el nivel estuvo cercano a desborde (nótese el caudal contenido en el cauce restringido por los jarillones). En Las Huertas (luego del ingreso del río Tunjuelo) el caudal estimado fue de 100 m³/s. Estos valores claramente indican los aportes por escorrentía que la ciudad de Bogotá entrega al río, y que contribuye progresivamente con su crecimiento a la observación de tendencias crecientes en las series de tiempo de caudales.

En la Figura 7 (a y b) se presentan curvas de calibración hidrométrica en algunas estaciones. Puede observarse que Saucio es estable, mientras que La Balsa, luce con aparentes procesos de agradación (ascenso del lecho) que disminuyen la capacidad de conducción de agua y que acrecienta la frecuencia de

desbordes. De acuerdo con trabajos recientes de la Universidad Nacional, los vertimientos de la ciudad al río Bogotá en tiempo seco (agua residual urbana) de sólidos suspendidos totales se estiman en 455 toneladas por día, mientras que aguas debajo de la ciudad, se registran 210 toneladas por día. Esto significa que hay sedimentación de una cantidad apreciable de sólidos que pueden representar el orden de 2.3 centímetros por año de agradación promedio del lecho del río en un tramo de aproximadamente 66 kilómetros. En 2011 se dragaron 414000 m³ en el tramo Tunjuelo – Canoas [28], valor que arroja una tasa de sedimentación de aproximadamente 6.6 centímetros por año en ese tramo de 21 kilómetros. Es decir, la agradación está presente en el río a su paso por la ciudad, y esto contribuye a una mayor incidencia de desbordamientos.

La variación climática asociada a fenómenos macroclimáticos como El Niño y La Niña, evidentemente estuvieron presentes en la ola invernal reciente. Es posible considerar estos fenómenos dentro de un marco de suposición de estacionaridad con mezcla de poblaciones (una población asociada a caudales en períodos Niño, otra a los que se presentan en períodos Niña, y una tercera a los de períodos normales). Con esta perspectiva, la Figura 8 muestra las curvas de frecuencia de caudales máximos en la estación Puente Vargas en el río Bogotá. La curva obtenida con todos los datos disponibles supone que todos éstos provienen de una misma población (esta curva es la que generalmente se utiliza para consideraciones de diseño), mientras que las otras tres los discriminan en tres poblaciones diferentes según el estado macroclimático (13 Niños, 12 Niñas y 15 Normales). Debe mencionarse que las mayores magnitudes de caudal no necesariamente están asociadas a Niñas, y también se pueden tener valores altos de caudales máximos anuales en períodos Niño y Normal. La Figura 8 muestra, a su vez, que para períodos de retorno de más de 20 años, la curva de frecuencia de caudales con períodos

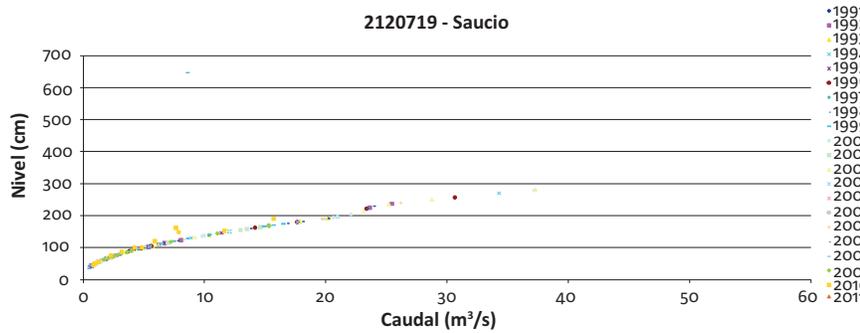


Figura 7a. Aforos estación Saucio

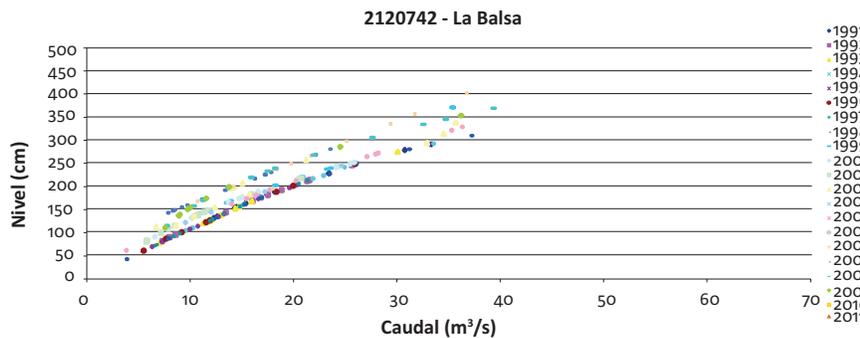


Figura 7b. Aforos estación La Balsa

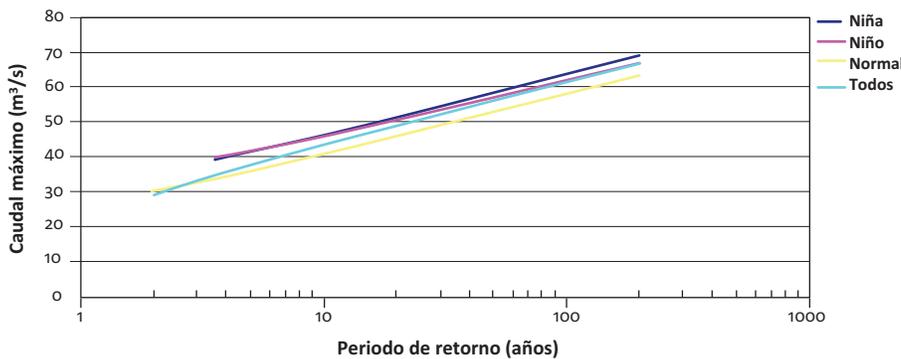


Figura 8. Curvas de frecuencia de caudales máximos, estación Puente Vargas

Niña produce mayores magnitudes de caudal, mientras que la curva de períodos Niño lo hace para períodos de menos de 20 años. En consecuencia, podría decirse que la envolvente superior de las curvas de frecuencia de la Figura 8 podría ser una alternativa de curva de frecuencia para consideraciones de diseño de estructuras hidráulicas de mitigación de inundaciones, mejor que, la tradicionalmente usada, bajo la suposición básica de una sola población muestral.

COMENTARIOS FINALES

Los sistemas hidrológicos son afectados por diferentes influencias de origen natural y antrópico, con variacio-

nes a diferentes escalas temporales y espaciales. Dependiendo de casa caso, estas influencias tienen importancia diferenciada.

Los registros históricos e información contextual son una fuente fundamental para analizar el comportamiento de sistemas hidrológicos.

Frecuentemente la longitud, calidad y continuidad de los registros hidrológicos disponibles dificulta, e inclusive, no permite identificar efectos individuales de influencias de variación. Adicionalmente, está presente la incertidumbre asociada a los datos y a su procesamiento para generar información pertinente (por ejemplo aforos, curvas de calibración, extrapolación, etc.).

La mayor incertidumbre hidrológica debe conllevar a diseños más conservativos (mayores factores de seguridad) que representen alternativas más apropiadas para la adaptación a ambientes cambiantes.

En la cuenca del río Bogotá es necesario incrementar esfuerzos de medición, análisis y modelación para conocer más adecuadamente su comportamiento integral e intentar estimarlo a futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Díaz-Granados. (Marzo, 2011). "Algunas reflexiones sobre el diseño hidrológico a propósito de la reciente ola invernal": XIX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología y el I Foro Nacional sobre la Seguridad de Embalses.
- [2] M. T. Van der Meer, R. F. Woldringh y K. Knuuti. (Junio, 2009). "Comparison of Dutch and American Levee Safety Approach": ASFPM Conference. Available: <http://www.fugrowaterservices.com/downloads/innovations/Mvd-MeeretalComparisonDutchandUSA.pdf>
- [3] G. Galloway Olsen. "If Stationarity is Dead, what do we do now?" Workshop on Nonstationarity Frequency Analysis, and Water Management. Laurie Schmidt (ed). Colorado: Water Institute Information, 2010. Series No. 109.
- [4] M. Frank "Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods", Wallingford, UK: FLOODsite Consortium, 2007
- [5] Reglamento técnico del sector de Agua potable y Saneamiento básico, RAS. Sistemas de Potabilización Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico, Noviembre 2000.

- [6] Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Manual de Drenaje de Carreteras. Bogotá: Ministerio de Transporte, Diciembre 2009.
- [7] G. Kite. Frequency and Risk Analyses in Hydrology, California: Water Resources Publications 1977.
- [8] R. Linsley, M. Kohler y J. Paulhus, Hydrology for Engineers, Tercera Edición, New York: McGraw-Hill, 1982.
- [9] V. Chow, D. Maidment y L. Mays, Applied Hydrology, New York: McGraw Hill, 1988.
- [10] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, Bogotá: NSR-98, 1998.
- [11] P. Milly, D. Betancourt, M. Falkenmark, R. Hirsch, Z. Kundzewicz, D. Lettenmaier y R. Stouffer, "Stationarity is Dead: Whither Water Management?". Science, Vol. 319, Febrero 2008. pp 573-574
- [12] R. Clarke. "Stochastic Hydrology Revisited", Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 7, No. 4. Out/Dez, 2002. pp. 97-104
- [13] R. Hirsch, M. "Perspective on Nonstationarity in Water Management", Colorado Water, Volume 27, Issue 2, Marzo/Abril 2010. pp 5-6
- [14] D. Jacob, D. Karoly y A. Seed. (February 2009) "Rainfall Frequency Analysis: The Assumption of Stationarity Still Valid?": 9th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Melbourne, Australia.
- [15] J. Olsen, J. Kiang and R. Waskom. Workshop on Nonstationarity, Hydrologic Frequency Analysis, and Water Management. Boulder, Colorado Water Institute, Information Series No. 109, 2010
- [16] A. Bradley. "Regional Frequency Analysis Methods for Evaluating Changes in Hydrologic Extremes", Water Resources Research, Vol., 34, No. 4, April, 1998. pp 741-750.
- [17] R. Smith, C. Campuzano. (2000) Análisis Exploratorio para la Detección de Cambios y Tendencias en Series Hidrológicas: XIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.
- [18] B. Faber. "Current Methods for Hydrologic Frequency Analysis" in Workshop on Nonstationarity, Hydrologic Frequency Analysis, and Water Management, Boulder, Colorado: Water Institute, Information Series No. 109, 2010.
- [19] T. Ouarda. "Bayesian Nonstationary Frequency Analysis of Hydrological Variables" in Workshop on Nonstationarity, Hydrologic Frequency Analysis, and Water Management, Boulder, Colorado: Colorado Water Institute, Information Series No. 109, 2010.
- [20] J. Stedinger and V. Griffis. "Getting from here to where?" in Workshop on Nonstationarity, Hydrologic Frequency Analysis, and Water Management, Boulder, Colorado: Colorado Water Institute, Information Series No. 109, 2010.
- [21] C. Escalante-Sandoval. "A Mixed Distribution with EV1 and GEV Components for Analyzing Heterogeneous Samples". Ingeniería, Investigación y Tecnología, Vol. 8, No. 3, Julio/Septiembre, 2007, pp. 123-133
- [22] G. Poveda, D. Álvarez y O. Rueda. "Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots" Climate Dynamics, Vol., 36, Issue 11-12, October 2010, pp. 2233-2249.
- [23] O. Gaitán "Análisis de frecuencia con más de una población, versión preliminar". Bogotá: Universidad de los Andes, 2011.
- [24] J. Rodríguez, M. Díaz-Granados, L. Camacho, M. Rodríguez, I. Raciny, C. Maksimovic, N. McIntyre, S. Achleitner, M. Möderl and W. Rauch. Chapter 10 - Case Study III: The case of Bogotá city. K. Vairavamorthy, N. Thygesen and H. Bregnhøj (eds). Integrated Urban Water System Interactions. UNESCO Book of the International Hydrological Program (IHP), in press.
- [25] R. Hirsch, J. Slack y R. Smith. "Techniques of trend analysis for monthly water quality data" Water Resources Research", Vol., 18 No.1, November, 1982. pp. 107 – 121.
- [26] C. Libiseller. "A Program for the Computation of Multivariate and Partial Mann-Kendall Test", Departamento de Matemáticas, Universidad de Linköping. Consultado el 10-05-2011. <http://www.mai.liu.se/~cllib/welcome/PMKtest.html>.
- [27] Chiew, C. y L. Siriwardena, Trend: trend/change detection software, CRC for Catchment Hydrology, 2005.
- [28] HMV Ingenieros. "Interventoría Dragado de Emergencia Río Bogotá entre Alicachín – Río Tunjuelo". Informe de Avance, 2011.