

**GEOMETRÍA HIDRÁULICA PARA CORRIENTES ESTABLES DE LA ZONA ANDINA
COLOMBIANA**

Gloria Jenny Mejía S.¹ y Lilian Posada G.²

***Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín***

RESUMEN

En el presente trabajo se reportan algunas de las ecuaciones tipo Geometría Hidráulica desarrolladas para corrientes en Régimen de la zona montañosa del noroccidente de Colombia. Se encontró que las ecuaciones para el ancho y la profundidad hidráulica de los canales en la zona montañosa son similares (en cuanto a los exponentes) a los encontrados por Leopold hace casi medio siglo [6]; para la velocidad se halló un exponente igual al propuesto por Pettis en 1937 [7] para los ríos de la Florida; para el área de la sección transversal se presenta adicionalmente una ecuación tipo Régimen deducida para las corrientes de montaña.

ABSTRACT

Some of the Hydraulic-Geometry Type equations developed for Regime streams in the mountain region of North western Colombia. By applying some of the existing hydraulic-geometry type equations to the mountain streams it was found that the exponents for the discharge when evaluating width and depth of mountain streams are to those proposed by Leopold about half a century ago [6]; for velocity the exponent was similar to the correspondent one proposed by Pettis in 1937 [7] for Florida rivers; to evaluate the cross sectional area, the hydraulic-geometry type equation does not apply but a Regime type equation was found to better represent the cross sectional area of mountain regime stream.

¹ Ingeniera Civil, Magister en Recursos Hidráulicos, gmsjenny@epm.net.co

² Profesora Asociada Universidad Nacional de Colombia, lposada@perseus.unalmed.edu.co

INTRODUCCIÓN

Los desarrollos de la Teoría del Régimen han traspasado las hipótesis iniciales en que fueron deducidas; la más fuerte de ellas es su aplicabilidad a canales de riego con caudales regulados. Después de que Leopold [6] presentara sus investigaciones acerca de la geometría hidráulica en corrientes naturales, se han desarrollado numerosos esfuerzos para relacionar las ecuaciones del Régimen - deducidas para canales de riego con caudal regulado - con las ecuaciones de geometría hidráulica en canales naturales estables. Aunque otros investigadores como Richard Hey han desarrollado expresiones para extender los conceptos del régimen a ríos de montaña del Reino Unido, estos esfuerzos no han sido validados para corrientes de montaña en zonas tropicales.

Para el cálculo de las ecuaciones del régimen en la zona montañosa del noroccidente del país (Figura 1) se empleó un enfoque básicamente empírico a datos de campo de 29 corrientes aluviales, cuyas características para el nivel de banca llena se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Rango de las variables en las corrientes estudiadas

Variable	Caudal	Ancho	Profundidad	Pendiente de fondo	Material del lecho	Area de drenaje
Símbolo	Q_b	B	H	S_o	D_{50}	A_T
Unidades	m^3/s	m	m	cm/km	mm	km^2
Rango	8.7 – 665.8	5.8 – 60.2	0.9 – 4.4	77 – 0.4	4 - 209	22 - 2541

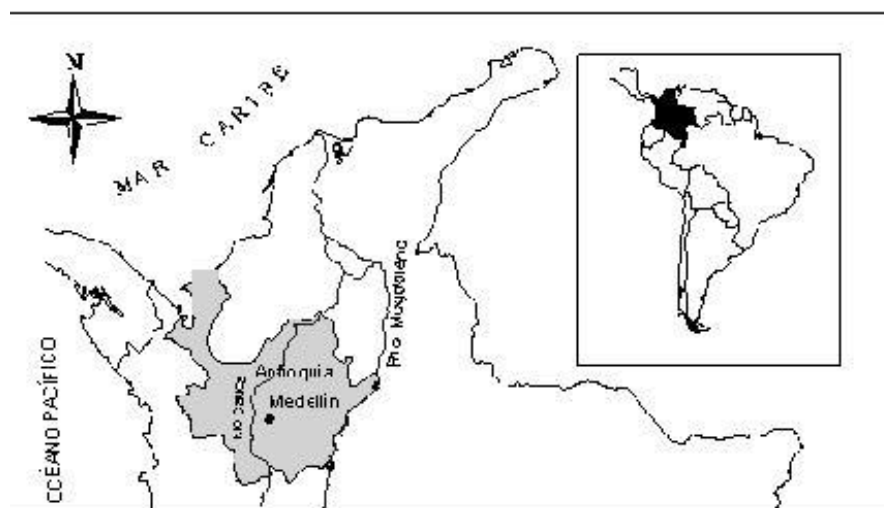


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

La investigación de campo se realizó en 23 estaciones de aforo, localizadas en el Departamento de Antioquia (Figura 1), seleccionadas de la red de estaciones de las Empresas Públicas de Medellín (EPM) y en seis estaciones que no cuentan con registros previos de caudal, localizadas en quebradas de los departamentos de Antioquia y el

Quindío; para estas últimas, se hizo el levantamiento topográfico de la sección, se registró la pendiente del lecho en un tramo de aproximadamente 50 m antes y después del sitio de aforo, se identificó el nivel de banca llena y se hizo la caracterización granulométrica del material del lecho (conteo de piedras de Wolman) y de las bancas; la única información adicional disponible en estos sitios consistió en fotografías aéreas de dos épocas recientes, con las que se verificó la estabilidad en planta del tramo analizado.

Los criterios de selección para las estaciones de EPM fueron los siguientes: que la estación estuviera localizada en tramos rectos, que no tuviera controles geológicos particulares, que los lechos y paredes estuvieran formados por material aluvial, que no estuvieran controladas por puentes o estructuras reguladoras que pudieran alterar la pendiente. Se chequeó la estabilidad de los sitios seleccionados atendiendo no solamente el criterio de la estabilidad en planta, sino además, la historia de la sección transversal a partir de la revisión de los procesos de agradación y degradación, manifiestos al dibujar los aforos disponibles. Para las estaciones de EPM, además de la información disponible recopilada durante años por personal calificado, se realizó un aforo líquido y sólido de la corriente, se obtuvo la granulometría del lecho, se determinó la pendiente del canal y se determinó en campo el posible nivel de banca llena, según el procedimiento descrito por Rosgen y Leopold [11].

Uno de los conceptos más importantes corresponde al caudal de banca llena, en este sentido, el procedimiento metodológico se enfocó en emplear al máximo la información disponible en las estaciones de EPM, con el fin de “aprender” de los sitios con información y así establecer una metodología de trabajo consistente y aplicable en aquellas corrientes que no poseen información de aforos previos.

Determinación de los caudales de banca llena en las estaciones de EPM.

Se evaluó el caudal para los niveles de banca llena identificados en el campo y para la mínima relación ancho/profundidad en las estaciones con registros previos, usando la curva de calibración y después de analizar la serie anual de registros se determinaron (mediante análisis de frecuencia) los períodos de retorno más probables para los caudales a banca llena; en todos los casos se observó que el caudal a banca llena tuvo un período de retorno superior a un año y coincidió con la mínima relación ancho/profundidad; se observó, además, que los aforos realizados estaban generalmente por debajo del nivel de banca llena, lo que se considera lógico por tratarse de un caudal de creciente, salvo el caso de la estación RG-7 que registra un aforo en 1954 en condiciones de banca llena. En las estaciones restantes, fue preciso extrapolar en la curva de calibración el caudal correspondiente a este nivel. Cuando se dispuso finalmente del caudal a banca llena se buscaron las ecuaciones que suministraran los mejores ajustes entre las dimensiones de la sección y el caudal para el nivel de banca llena.

Coefficiente de Resistencia y Pendiente de Fricción

Dado que las estaciones de EPM no cuentan con registros de caudal a banca llena (ya que este es un caudal de creciente) y tampoco las restantes 6 estaciones de aforo, es necesario determinar un coeficiente de resistencia y una pendiente de fricción para evaluar el caudal a banca llena a partir de la geometría de la sección al nivel de banca llena, en las estaciones sin registros previos y, en las estaciones de EPM, verificar las extrapolaciones en la curva de calibración disponible (revisadas previamente).

Para los niveles medidos en campo el día del aforo fue necesario verificar que el caudal aforado fuera igual al de la curva de calibración; entonces se aplicaron varias ecuaciones de resistencia (Chezy, Darcy-Weisbach, Manning) con los coeficientes respectivos evaluados en función del diámetro característico del material del lecho y una ecuación semilogarítmica de resistencia obtenida por Keulegan que se puede aplicar a canales rectangulares con paredes rugosas y flujo libre [12]; se dedujo cuál ecuación de resistencia daba mejores aproximaciones al caudal medido. Conocido el coeficiente de resistencia se obtuvo la pendiente de fricción para aplicar este procedimiento en las estaciones donde no hay curva de calibración y en las estaciones instrumentadas, para verificar las extrapolaciones para el caudal de banca llena.

Para verificar el diámetro característico (D_{65} por ejemplo) que mejor represente la altura de los elementos de rugosidad del canal (K_s) en la ecuación logarítmica para la distribución de velocidades en la sección de aforo, se empleó el procedimiento indirecto indicado por Chow [1], que considera las velocidades medidas a profundidades de $0.2H$, $0.6H$ y $0.8H$ para encontrar la pendiente de fricción media en la sección y el valor de K_s . Para cada una de las estaciones de EPM se tuvo acceso a la información de los aforos realizados durante los últimos 5 años; se verificó para cada vertical en un aforo la distribución logarítmica de velocidades y se calculó el correspondiente valor del n de Manning. Se empleó un grupo de ecuaciones que permiten calcular el valor del n de Manning en función de distintos diámetros característicos, como las expresiones de Strickler, Garde, Meyer, Bray, Raudkivi, Posada, Simons-Senturk y Henderson [9]. Cuando se calibró el caudal para cada uno de los aforos con base en la granulometría, se pudo observar que el diámetro característico que mejor ajuste presenta es el D_{65} , por lo que se optó por emplear este diámetro para el cálculo de la pendiente fricción.

Cuando se trabaja con cualquier tipo de ecuación de resistencia, la pendiente de fricción reviste una importancia fundamental. Para los aforos disponibles se calculó la pendiente fricción y se intentó correlacionarla con la pendiente del canal o con el radio hidráulico para efectos de estimación del caudal a banca llena (pues en ese nivel la velocidad es una incógnita); se pudo comprobar que no existe una buena correlación con el radio hidráulico sino que la variación del radio hidráulico con respecto a la pendiente de fricción es completamente errática; se analizó la sensibilidad de la variación del caudal para los valores promedios y máximos de la pendiente fricción en la sección y para la pendiente del fondo del canal. Los resultados obtenidos permiten concluir que la oscilación de la pendiente en este rango altera sensiblemente el orden de magnitud del caudal; por lo que se decidió emplear la pendiente del fondo del canal para estimar el rango de confiabilidad del caudal de la curva de calibración. Por la razón antes expuesta, se recomendó también, para las secciones que no tienen registros de aforos y que no están instrumentadas, emplear la pendiente del fondo del canal, suponiendo un flujo uniforme, dado que se desconoce la representatividad de la pendiente fricción del día del aforo para la estimación del caudal a banca llena.

Cálculo del caudal en corrientes no instrumentadas.

A partir de las conclusiones obtenidas para las corrientes instrumentadas (EPM), se adoptó la siguiente metodología aplicable en las corrientes que carecen de información adicional de aforos: Se estimó el caudal empleando los métodos seleccionados para las corrientes instrumentadas, exceptuando, por supuesto, el obtenido con la curva de calibración. Se utilizó como valor de la pendiente en el tramo el correspondiente a la pendiente del fondo del canal. Se empleó la granulometría obtenida en el campo con el procedimiento del conteo de Wolman. Para la determinación del nivel de banca llena se

consideraron los mismos criterios topográficos y de indicadores tenidos en cuenta para los sitios en corrientes instrumentadas. Se estableció el intervalo de confiabilidad del 95%, para los caudales estimados empleando las distintas ecuaciones de resistencia al flujo. Se seleccionó como caudal para banca llena aquel que presenta el menor error relativo respecto al caudal promedio. Para cada una de las diferentes variables geométricas se estudiaron las mejores correlaciones tipo geometría hidráulica obtenidas para la muestra completa y para agrupaciones de la muestra realizadas empleando la clasificación geomorfológica de Rosgen [11].

Período de retorno para el caudal a banca llena.

Uno de los datos de más interés en hidrología es el período de retorno asociado al caudal de banca llena el cual se calculó en las estaciones que disponen de registros de caudales máximos multianuales. Con base en estas series se hizo el análisis de frecuencia empleando la Distribución Gumbel. El período de retorno promedio para el caudal de banca llena fue de 1.3 años. Este valor está de acuerdo con las estimaciones obtenidas para corrientes estudiadas en otras latitudes, que fijan este período entre 1 y 2 años. No se puede afirmar claramente que el período de retorno, tenga un comportamiento marcadamente zonal, aunque existen algunas similitudes interesantes entre corrientes de la misma zona, como es el caso del río Grande y el río Chico en los sitios RG-6, RG-7 y RG-10 ($T_R = 1,2$ años); el río Porce y sus afluentes en los sitios PP-1, PP-5 y PP-2A. (T_R entre 1,0 y 1,1 años); el río Nare y sus afluentes en los sitios RN-9A, RNS-21, RN-31 y RN-32 (T_R entre 1,1 y 1,2). Se observaron valores altos para el período de retorno del caudal a banca llena en las estaciones Playa Dura (2,2 años) y Río Abajo (1,6 años), sobre los ríos Porce y Nare respectivamente. Estos valores altos pueden obedecer a que ambas corrientes tienen caudal influido.

MODELOS TIPO GEOMETRÍA HIDRÁULICA PROPUESTOS PARA LA ZONA DE ESTUDIO

Las mejores relaciones tipo geometría hidráulica en la literatura técnica y aplicables a la zona Andina fueron las deducidas por Nixon [8] como se podrá ver en desarrollo del documento los exponentes del caudal para las corrientes de la zona Andina son muy similares a las de Nixon. A continuación se presentan los mejores ajustes encontrados.

Tabla 1. Mejores ajustes tipo Geometría Hidráulica encontrados para la zona Andina [7].

VARIABLE	MODELO PROPUESTO	r^2	F	ERROR DE PREDICCIÓN (%)
Ancho, B (m)	$B = 2,261 Q^{0,469}$ (1)	0,87	180,55	18,82
Profundidad de flujo, H (m)	$H = 0,517 Q^{0,335}$ (2)	0,78	92,95	17,91
Área sección transversal, A (m ²)	$A = 1,168 Q^{0,803}$ (3)	0,92	309,95	23,58
Velocidad media, V (m/s)	$V = 0,856 Q^{0,197}$ (4)	0,41	18,57	17,24

- **Ancho de la sección**

Para numerosas investigaciones de geometría hidráulica se reporta una tendencia en los exponentes del caudal. Particularmente para el ancho, Leopold estimó un rango de variación entre 0,42 y 0,55; su propuesta final se centra en un valor para este exponente de 0,50 [5]. Para las correlaciones estudiadas en esta investigación, el valor del exponente del caudal es de 0.469, se recomienda el empleo de este modelo. La Figura 1 muestra el ajuste gráfico correspondiente a la ecuación (1); se aprecia como la totalidad de los datos se encuentran dentro de la faja del 25% del error relativo.

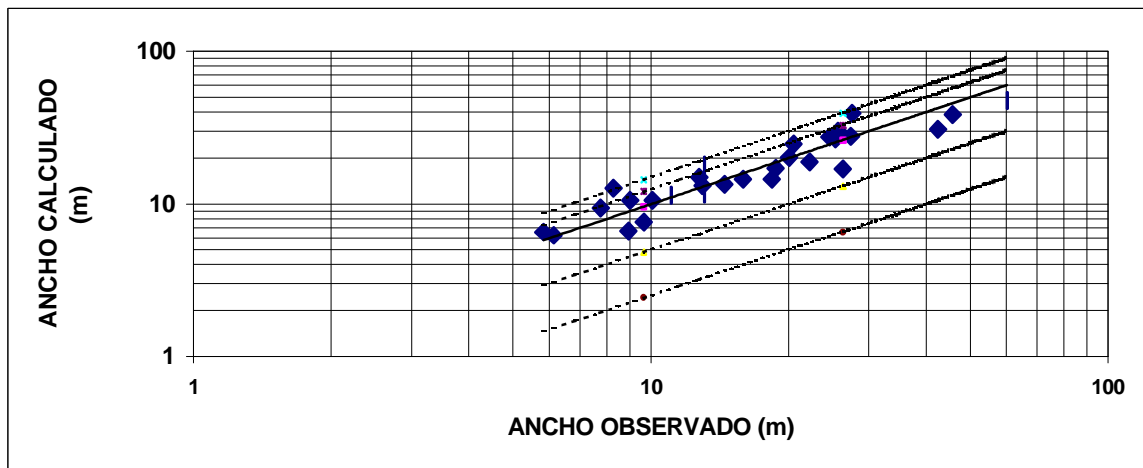


Figura 1. Comparación entre el ancho observado y el calculado para la muestra completa, empleando la ecuación (1) propuesta por Mejía [7].

- **Profundidad hidráulica**

El valor del exponente del caudal en los modelos de Geometría hidráulica presentados por Leopold oscila alrededor de 0,37 [5]; el exponente en la ecuación (2) es de 0.34. Para el modelo seleccionado [7] que se observa en la Figura 2, de un total de 29 datos, el 86,2% se encuentra dentro del rango de predicción del 25% del valor observado; solamente dos corrientes, el río Pantanillo y el río Medellín en la estación RMS-17 (6,9% de la muestra) se encuentran en el límite del rango del 50% del valor observado.

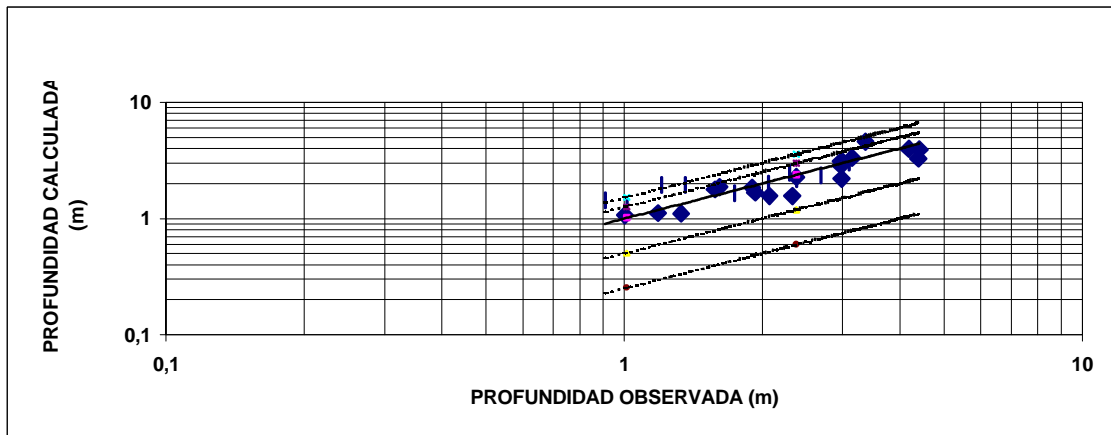


Figura 2. Comparación entre la profundidad hidráulica observada y la calculada a partir de la ecuación (2) propuesta por Mejía [7].

- **Área de la sección transversal**

Muchos investigadores no formulan expresiones para el área transversal, porque se cuenta con las correspondientes al ancho y la profundidad. Los estudios realizados por Bray (1985) en Alberta Canadá [4] reportan para el caudal un exponente de 0,86, en las correlaciones correspondientes al área transversal; para la misma variable, tanto Lacey [13] como Nixon [8], encuentran un exponente de 0,83 para el caudal. Para los modelos deducidos a partir de los datos disponibles este coeficiente es de 0,80 y como se observa en la Tabla 1 el valor del coeficiente de determinación permite que el caudal explique una alto porcentaje de la variación del área de la sección. Sin embargo la mejor ecuación hallada para explicar el área de la sección es la ecuación tipo Régimen que se muestra a continuación:

$$A = 0.112 Q^{0.777} D_{65}^{0.104} S^{-0.290} \quad (5)$$

Con la pendiente en m/m, las demás variables en sistema internacional (para este modelo los parámetros estadísticos son $r^2=0.98$, $F=152.87$). En la Figura 3 se muestra gráficamente el ajuste entre la variable observada y calculada y se indican las líneas correspondientes al 25% y 50% del ajuste ideal (valor observado igual al calculado).

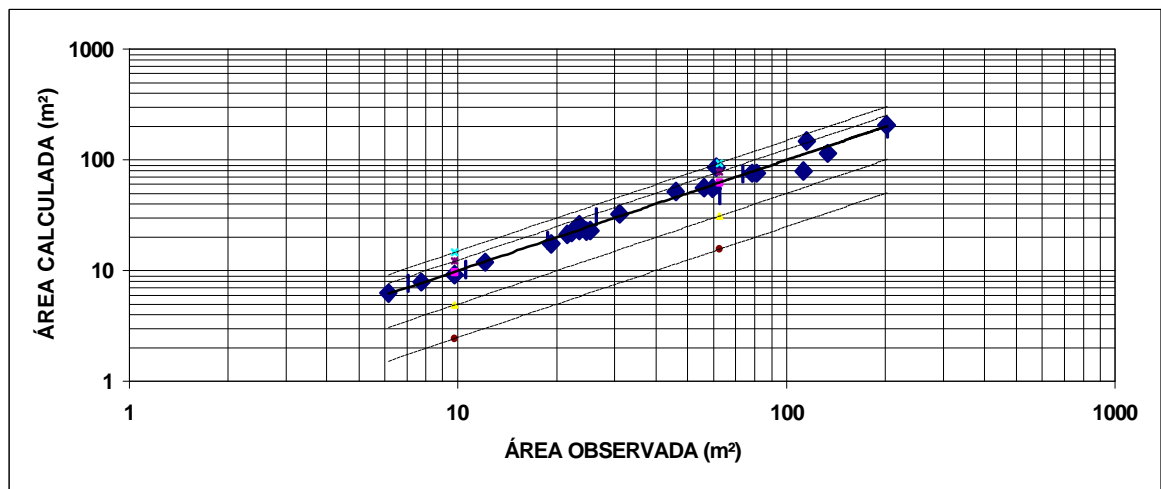


Figura 3. Comparación entre el área de la sección transversal observada y la calculada a partir (5) propuesta por Mejía [7].

- **Velocidad Media**

Para encontrar el mejor ajuste de la velocidad, Nixon [8] propuso un exponente igual a 0.17 para el caudal, mientras que Pettis (1937) (en [4]) propone un exponente de 0.20. Para las corrientes de la zona Andina Colombiana, Mejía [7] encontró un exponente para el caudal (ecuación 4) igual al de Pettis (0.20). En la Figura 4 se muestra la correlación entre los valores observados y calculados de la velocidad; se aprecia que el 96% de los valores calculados (28 de 29) se encuentra dentro de la faja de predicción del 25% respecto al valor teórico [7].

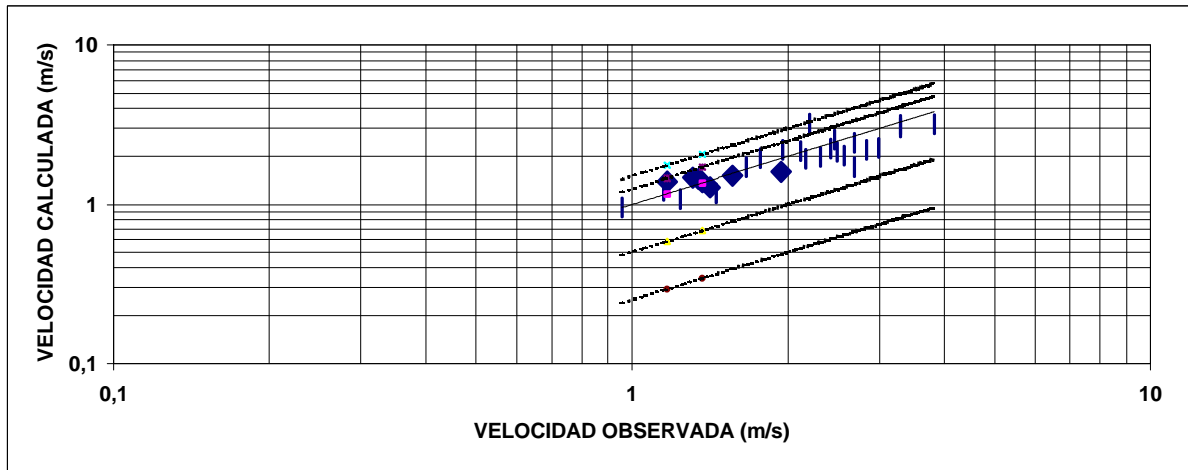


Figura 4. Comparación entre la velocidad media observada y la calculada a partir (4) propuesta por Mejía [7].

- **Caudal a banca llena en función del Area de drenaje**

A partir de los datos disponibles se buscó corroborar y/o encontrar una relación entre el caudal a banca llena y el área aferente de la cuenca para las corrientes de la zona Andina. En la Tabla 2 se muestran las correlaciones halladas [7] para dos condiciones de datos en la muestra: a) la totalidad de las cuencas sin limitar la selección por el tamaño de las mismas, b) una selección de las cuencas considerando un valor umbral mínimo para el área, concepto enunciado por Gupta y Dawdy [3]. A partir de datos de lluvia y caudal, Gupta y Dawdy encontraron experimentalmente que para las crecientes, incluida la correspondiente a banca llena, el comportamiento de los exponentes del área en cuencas pequeñas está determinado más por la respuesta de la cuenca que por la entrada de la precipitación. Este resultado soporta la existencia de un área crítica de drenaje de tal forma que la variabilidad espacial de las crecientes, en cuencas mayores que el tamaño crítico, está determinada por la entrada de la precipitación y en cuencas más pequeñas que el tamaño crítico por la respuesta propia de la cuenca, que considera sus pendientes, y conformación geomorfológica particular.

El valor del umbral reportado por Gupta para los Apalaches es de aproximadamente 50 km²; en otras localidades el mismo autor reporta un umbral de 100 km². Finalmente se eliminaron de la muestra las corrientes que tienen caudal influido. Esta última selección no tiene ninguna base física y sirve simplemente de elemento auxiliar para el tema que se presenta a continuación y que se relaciona con el caudal medio. El área de las cuencas osciló entre 22,4 km² y 3755 km².

Tabla 2. Correlaciones para el caudal a banca llena como función del área de drenaje [7].

Ecuación	R ²	Error de Predicción (%)	F	Observaciones
$Q = 5,868 A_T^{0,494}$	0,35	37,75	11,40	Sin umbral
$Q = 3,683 A_T^{0,568}$	0,38	37,21	12,29	Umbral en 50 km ²
$Q = 1,631 A_T^{0,694}$	0,51	38,57	17,46	Umbral en 100 km ²

En la Tabla 2 se aprecia que los coeficientes de determinación mejoran al establecer umbrales para el área de la cuenca. Si se mira esta primera agrupación de datos, se podrá observar que el mejor coeficiente de correlación se obtuvo cuando se consideró un umbral para el área de 100 km². Esto implica pasar de una serie de 29 datos a una serie de 19 datos; no obstante, al realizar esta selección, según el parámetro F la correlación tiene fundamento físico y no depende del azar. Se hicieron algunos intentos adicionales en esta primera agrupación por mejorar el coeficiente de determinación, no considerando las áreas con órdenes de magnitud mayores a 2000 km² para trabajar con una muestra más homogénea, sin que los resultados obtenidos fueran satisfactorios y justificaran reducir el rango de aplicación de los resultados. Los exponentes para el área de la cuenca en las expresiones para el caudal son del orden de 0.85 (Richards, [10]), 0.69 y 0.68 propuestos por Emmet y Green, respectivamente [2]. Según se desprende de la comparación entre los exponentes hallados en las correlaciones deducidas y los encontrados para otras latitudes el umbral del área de la cuenca para la zona estudiada es de 100 km². En la Figura 5 se observa la correlación entre el área de la cuenca y el caudal a banca llena para la Zona Tropical Andina.

El ajuste gráfico muestra que cuatro corrientes (el 21,1% de los datos) se encuentran por fuera del rango del 50% del error relativo; corresponden a las estaciones RN-9A, BP-5, PSN-1 y RN-26, localizadas en zonas de alta precipitación a saber: RN-9A (4605 mm), BP-5 (2315 mm), PSN-1 (4032 mm), RN-26 (2982 mm). Estos datos parecen confirmar el concepto expresado por Gupta y Dawdy [3] en el sentido de que la mejor correlación entre el caudal con cualquier período de retorno y el área de la cuenca es la que se obtiene para corrientes localizadas en provincias hidrológicas similares, caracterizadas entre otros parámetros por la precipitación media multianual.

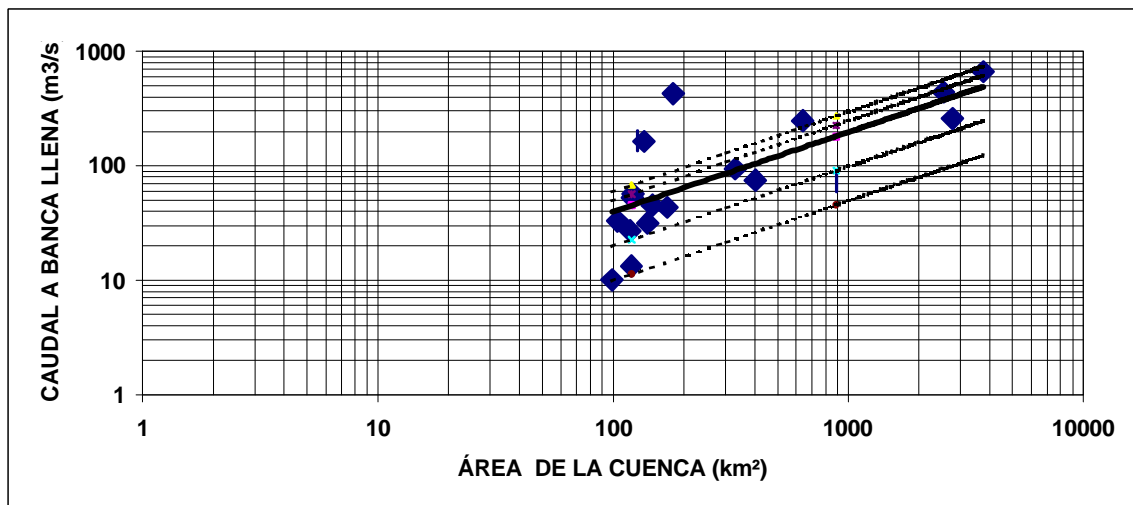


Figura 5. Correlación entre el área de la cuenca y el caudal a banca llena para un umbral de área de 100 km² [7].

CONCLUSIONES

El exponente del caudal en las ecuaciones de Geometría hidráulica para corrientes en Régimen en la zona Andina tiene el mismo orden de magnitud de las ecuaciones propuestas en diversas partes del mundo, se recomienda su aplicabilidad para hallar el valor del ancho y la profundidad hidráulica. Para el área completa de la sección transversal se presenta una ecuación tipo Régimen en función de la pendiente y el D₆₅ del

lecho. Se propone una expresión para encontrar un valor del caudal a banca llena en función del área de drenaje de cuencas mayores de 100 km². Para las ecuaciones se cumple que la suma de los exponentes del caudal en el producto del área por la velocidad es la unidad y el producto de los coeficientes respectivos es también la unidad.

La metodología aplicada tanto a la selección de las estaciones como al análisis de la calidad de la información fue rigurosa y el objeto era aprender de las estaciones con información para aplicar, con confianza, los conceptos y resultados en las estaciones sin información previa y en sitios similares.

REFERENCIAS

1. CHOW, V. T. 1959. Open channel hydraulics, McGraw - Hill Book, CO, New York, pp 196-197.
2. EMMETT, W., and LEOPOLD, L. 1964. "Geometry of rivers channels" Journal of the Hydraulics Division, ASCE Proceedings, pp 277 - 285
3. GUPTA K, V., and DAWDY, R. 1995. "Physical interpretations of regional variations in the scaling exponents of flood quantiles" Hydrological processes, Vol 9: pp 347 - 361.
4. KHALIL, B.M. 1975. River Regime with special reference to River Nilo" Journal of the Hydraulics Division, Vol 101: pp 135-153.
5. LEOPOLD, L., WOLMAN, G., and MILLER, J. 1964. Fluvial processes in geomorphology, Dover publications, New York.
6. LEOPOLD, L., MADDOCK, T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications" U.S. Geol. Survey Prof. Paper 252, 57 p.
7. MEJÍA SIERRA, Gloria Jenny, 2001. Aplicabilidad de las Ecuaciones del Régimen a las corrientes de la zona Andina. Tesis de Magister, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
8. NIXON, M. 1959. "A study of the bankfull discharges of rivers in England and Walles", paper No 6233 for discussion at an ordinary meeting, Colorado State University.
9. POSADA, M. Javier E. 1998. Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning en canales naturales. Tesis de Grado, Universidad Nacional.
10. RICHARDS, Keith, 1987, "Channels, environment and process, Institute of British Geographers, pp 95-127
11. ROSGEN, D., 1996. "Applied river morphology", Wildland hydrology, Pagosa Springs Colorado, 372p.
12. SIMONS, D. and SENTURK, F. 1992. Sediment Transport Technology, Water Resources Publications, Fort Collins, Co, USA, 308p.
13. STEVENS A., M., and NORDIN Jr. C., 1990. "First step away Lacey's Regime Equations", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 116, No. 11, pp 1422 - 1425.