

Predictive models of instantaneous maximum discharges for catchments of mountainous environments, supported by morphometric parameters

Williams Méndez¹, José Córdova² y Lelys Bravo de Guenni³

¹Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Instituto Pedagógico de Caracas, Centro de Investigación "Estudios del Medio Físico Venezolano", Caracas 1020, Venezuela. E-mail: williamsmendez@gmail.com,

²Universidad Simón Bolívar, Departamento de Procesos y Sistemas, Valle de Sartenejas, Baruta, Caracas 1080, Venezuela. E-mail: jrcordova@gmail.com

³Universidad Simón Bolívar, Departamento de Cómputo Científico y Estadística, Centro de Estadística y Software Matemático, Valle de Sartenejas, Baruta, Caracas 1080, Venezuela. E-mail: lelysb Bravo@gmail.com

Abstract

The instantaneous maximum discharge is a hydrological parameter that can be estimated by deterministic, probabilistic and empirical models or direct instrumental measurements, however, their magnitudes are influenced equally by the morphometry of the catchment and its drainage network. Is purpose of this research to explain the relationships between the instantaneous maximum discharges of catchments of "El Ávila" Massif northern hillside (Vargas State, Venezuela) and the morphometric parameters of these, to propose predictive models of such responses. The methodology consisted of measurements and calculations of the morphometric parameters of the catchments and their drainage networks, and the use of multivariate statistical techniques (linear correlation analysis, principal component analysis and multiple linear regression analysis). It was considered as instantaneous maximum discharges for a return period of 100 years those estimated by other authors. Most of the predictive models generated by each morphometric variable shows very good results in their estimates of the instantaneous maximum discharges of the catchments analyzed, however, only one was selected as the best predictor model (best correlation coefficients), which in this case is the corresponding variable basin scale.

Keywords: Predictive model; instantaneous maximum discharge; catchment.

Modelos predictivos de caudales máximos instantáneos para cuencas de drenaje de ambientes montañosos, sustentados en parámetros morfométricos

Resumen

El caudal máximo instantáneo es un parámetro hidrológico que puede ser estimado mediante modelos determinísticos, probabilísticos y empíricos o por mediciones instrumentales directas, sin embargo, sus magnitudes están influenciadas de igual manera por la morfometría de la cuenca y su red de drenaje. Es propósito de esta investigación explicar las relaciones existentes entre los caudales máximos instantáneos de cuencas de la vertiente norte del macizo "El Ávila" (estado Vargas, Venezuela) y los parámetros morfométricos de éstas, para proponer modelos predictivos de dichas respuestas. La metodología contempló mediciones y cálculos de los parámetros morfométricos de las cuencas y sus redes de drenaje, y el empleo de técnicas estadísticas multivariadas (análisis de correlación lineal, análisis de componentes principales y análisis de regresión lineal múltiple). Se consideraron como caudales máximos instantáneos para un período de retorno de 100 años, a los estimados por otros autores. La mayoría de los modelos predictivos generados por cada variable morfométrica arrojaron muy buenos resultados en sus estimaciones de los caudales máximos instantáneos de las cuencas de drenaje analizadas, sin embargo, se seleccionó solamente uno como el mejor modelo predictor (mejores coeficientes de correlación), que para este caso es el correspondiente a la variable escala de la cuenca.

Palabras clave: modelo predictivo; caudal máximo instantáneo; cuenca de drenaje.

Introducción

El propósito de esta investigación consiste en explicar las relaciones existentes entre los caudales máximos instantáneos centenarios ($Tr = 100$ años) de cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo “El Ávila” (estado Vargas, Venezuela), para condiciones posteriores al evento de aludes torrenciales de Diciembre de 1999, y sus parámetros morfométricos, mediante el empleo de técnicas de tratamiento estadístico multivariado, a fin de generar y proponer modelos predictivos de dichos caudales de respuesta.

De allí que en esta investigación se han considerado para explicar las relaciones de los caudales máximos instantáneos de una cuenca con su morfometría, al mayor número posible de parámetros de esta naturaleza, con la finalidad de explorar e identificar quienes de ellos tienen mayor peso o influencia en las magnitudes de tales caudales.

Entre algunos de los trabajos sobre morfometría de cuencas de drenaje y su vinculación con la respuesta hidrológica de dichos sistemas, llevados a cabo en los últimos cinco años, destacan los desarrollados por:

Delgado y Gáspari [1]; Martínez, Díaz y Cosío [2]; Genchi, Carbone, Piccolo y Perillo [3]; Martínez y Díaz [4]; Salas, Pinedo, Viramontes, Báez y Quintana [5]; Campo, Aldalur y Fernández [6]; Gáspari, Rodríguez, Senisterra, Denegri, Delgado y Besteiro [7]; Romshoo, Bhat y Rashid [8]; Esper y Perucca [9]; Karalis, Karymbalis, Valkanou, Chalkias, Katsafados, Kalogeropoulos, Batzakis y Bofilios [10]; Meza, Rodríguez, Corvacho y Tapia [11]; Quiroga, Gil y Coronato [12]; Souza y Bernardes [13]; y Yunus, Oguchi y Hayakawa [14].

Las cuencas de drenaje seleccionadas para este estudio dado su interés hidrogeomorfológico producto del evento catastrófico de Diciembre de 1999, comprendidas entre la quebrada Curucutí al oeste y el río Miguelena al este, están situadas geográficamente en la Región Centro Norte del territorio venezolano (coordenadas geoastronómicas: $10^{\circ}32'25'' - 10^{\circ}37'35''$ de latitud norte y $66^{\circ}40'08'' - 66^{\circ}59'12''$ de longitud oeste), específicamente en la parte central del estado Vargas, en contacto con el margen meridional del mar Caribe, y extendidas sobre la vertiente norte del macizo “El Ávila” en su extremo occidental (Figura 1).

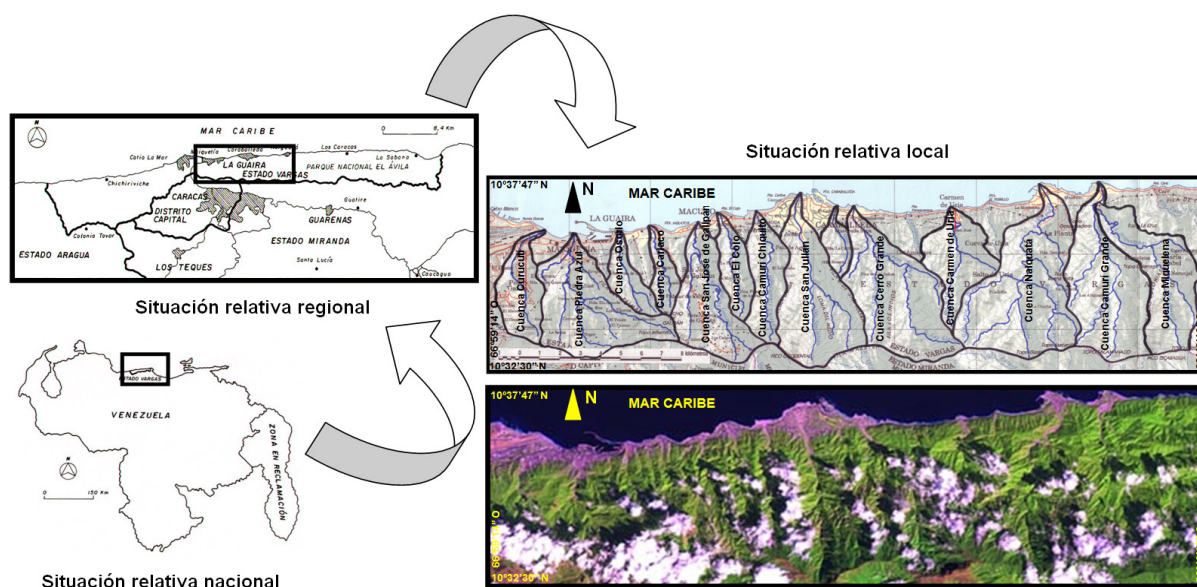


Figura 1. Localización de las cuencas de drenaje del área de estudio, vertiente norte del macizo “El Ávila”, estado Vargas, Venezuela.

Metodología

La información cartográfica base (Dirección de Cartografía Nacional [DCN] [15] [16]; Gobernación del Distrito Federal [GDF] [17]; Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional [SAGECAN] [18]), se rasterizó y digitalizó empleando el software ArcGIS 9.2 con sus módulos ArcHydro y Spatial Analysis, con este último se construyó el Modelo de Elevación Digital

del Terreno (MEDT). Las mediciones y cálculos de los parámetros morfométricos (Tabla 1) se realizaron sobre la cartografía digitalizada y el MEDT, obteniéndose atributos básicos.

Con esa información y las ecuaciones matemáticas que definen al resto de los parámetros, se procedió a sus respectivas estimaciones. La información hidrológica de interés está representada por los caudales máximos instantáneos ($Tr = 100$ años), cuyas magnitudes fueron

estimadas por González y Córdova [19], empleando el método de la onda cinemática.

Para interpretar el grado de relación entre los parámetros morfométricos y los caudales máximos instantáneos, se realizó un análisis de correlación lineal (ACL) con el complemento Xlstat de Microsoft Excel. Se desarrolló un Análisis de Componentes Principales (ACP) con los parámetros morfométricos a fin de reducir su dimensionalidad e identificar cuáles de ellos tienen pesos importantes en sus relaciones con los caudales máximos instantáneos, empleando el paquete estadístico SPSS Statistics Versión 17,0. Las puntuaciones estandarizadas fueron tomadas como los valores de las nuevas variables para el Análisis de Regresión Lineal Múltiple (ARLM). Se realizó un ARLM para cada uno de los grupos de factoriales o CP.

Se construyeron los modelos estadístico-matemáticos predictivos con los coeficientes no estandarizados (β) de las constantes y de los CP generados por el ARLM. Se estimaron las magnitudes de los caudales máximos instantáneos de las cuencas según estos nuevos modelos.

Resultados y discusión

Morfometría de las cuencas de drenaje

En atención a los parámetros morfométricos de las cuencas y sus redes de drenaje (table 1), y en específico a los referidos a la variable escala de la cuenca, estos sistemas hidrogeomorfológicos califican en la categoría de microcuencas debido a sus pequeñas dimensiones;

con relación a los parámetros de la variable gradiente y forma del relieve, las definen como espacios topográficamente muy accidentados de fuertes pendientes y grandes desniveles altitudinales; los parámetros de la variable forma de la cuenca señalan que se trata de sistemas de morfologías planimétricas semi-circulares a semi-alargadas; en el caso de los parámetros de la variable extensión de la red de drenaje, indican sistemas de desagüe de ramificaciones y densidades considerables con cortas longitudes y canales de escasa sinuosidad (rectilíneos); y para el caso de la variable orden y magnitud de la cuenca de drenaje, sus parámetros indican redes de altas magnitudes y órdenes, así como elevados niveles de torrencialidad (Tabla 2).

Estos valores de los parámetros morfométricos determinan en mayor proporción condiciones particulares que favorecen la ocurrencia de respuestas agresivas, así como menores tiempos de concentración en presencia de tormentas extraordinarias, e influyen en los procesos geomorfológicos que ocurren en las cuencas.

Caudales Máximos Instantáneos (Tr = 100 años) para condiciones posteriores a la ocurrencia de los aludes torrenciales de Diciembre de 1999

Los caudales máximos instantáneos estimados para las cuencas de drenaje oscilan entre magnitudes de 71 m³/s y 676 m³/s, las cuales como se puede apreciar en la Tabla 3, con un promedio de 300,31 m³/s el cual es superado por seis de las trece cuencas de drenaje analizadas. En líneas generales, estos caudales representan montos importantes que evidencian la agresividad y potencia hidrológica y morfodinámica de los eventos de crecidas y aludes torrenciales.

Tabla 1

Parámetros morfométricos medidos, estimados y/o calculados para las cuencas y redes de drenaje

Variable	Parámetros
Escala de la cuenca (10 parámetros)	1. Área (A) (Km ²); 2. Área de la vertiente mayor (Av_{may}) (Km ²); 3. Área de la vertiente menor (Av_{men}) (Km ²); 4. Perímetro (P) (Km); 5. Longitud (L) (Km); 6. Ancho promedio (a) (Km); 7. Ancho máximo ($a_{máx}$) (Km); 8. Diámetro (D) (Km); 9. Área del rectángulo equivalente al de la cuenca (Ar) (Km ²); 10. Perímetro de un círculo igual al área de la cuenca (Pc) (Km)
Gradiente y forma del relieve de la cuenca (18 parámetros)	11. Altitud mínima (h) (msnm); 12. Altitud máxima (H) (msnm); 13. Altitud media (H_m) (msnm); 14. Altitud de la naciente de la corriente principal (H_n) (msnm); 15. Altitud del desagüe de la corriente principal (h_d) (msnm); 16. Relieve máximo (Rm) (m); 17. Radio del relieve (R) (m/Km); 18. Pendiente media del relieve (P_m) (m/m); 19. Concavidad del perfil longitudinal de la corriente principal (Cp); 20. Pendiente media del perfil longitudinal de la corriente principal (Pcp_m) (m/m); 21. Relieve máximo de la corriente principal ($Rmcp$) (m); 22. Factor topográfico de la corriente principal (Ft); 23. Pendiente media del total de corrientes de la red de drenaje (Ptc_m) (m/m); 24. Integral hipsométrica (IH); 25. Coeficiente de masividad (Cm) (msnm/Km ²); 26. Coeficiente orográfico (Co); 27. Relieve relativo (Rr) (m/Km); 28. Número de rugosidad de Melton (NR)

Cont... Tabla 1

Variable	Parámetros
Forma de la cuenca (14 parámetros)	29. Elongación (E); 30. Perímetro relativo de crenulación (Prc); 31. Coeficiente de compacidad (Kc); 32. Índice de alargamiento (Ia); 33. Índice de homogeneidad (Ih); 34. Índice de simetría (Is); 35. Factor forma (Ff); 36. Alargamiento de caquot (Ac); 37. Radio de elongación (Re); 38. Radio de circularidad (RC); 39. Índice de forma (If); 40. Índice entre el largo y el área de la cuenca (ICo); 41. Coeficiente de forma (Cf); 42. Coeficiente de redondez (Cr)
Extensión de la red de drenaje (15 parámetros)	43. Longitud de la corriente principal (Lcp) (Km); 44. Longitud media del valle de la corriente principal (Lv_m) (Km); 45. Longitud total de las corrientes de la red de drenaje (Ltc) (Km); 46. Sinuosidad total de la corriente principal (S); 47. Sinuosidad topográfica de la corriente principal (St); 48. Sinuosidad hidráulica de la corriente principal (Sh); 49. Centro de gravedad del cauce principal (Cg) (Km); 50. Densidad de drenaje (Dd) (Km/Km ²); 51. Textura del drenaje (Td) (Km ⁻¹); 52. Coeficiente de mantenimiento del canal (Cmc) (Km ² /Km); 53. Extensión media de la escorrentía superficial (E_m) (Km); 54. Longitud del flujo superficial (Lfs) (Km); 55. Textura topográfica (Tt); 56. Intensidad de drenaje (Id) (Km); 57. Alejamiento medio (Am)
Orden y magnitud de la red de drenaje (25 parámetros)	58. Orden de la corriente (u); 59. Número de corrientes de un orden dado (N_u); 60. Número total de corrientes de la red de drenaje (N_t); 61. Orden de la cuenca (u); 62. Relación de bifurcación (R_b); 63. Relación de bifurcación media (R_{bm}); 64. Longitud de la corriente de un orden dado (L_u) (Km); 65. Longitud total de las corrientes de un orden dado (L_{tu}) (Km); 66. Longitud media de las corrientes de un orden dado (L_{mu}) (Km); 67. Longitud media acumulada de las corrientes de un orden dado (L_{mau}) (Km); 68. Relación de longitud (R_l); 69. Relación de longitud media (R_{lm}); 70. Desnivel de la corriente de un orden dado (D_u) (m); 71. Pendiente de la corriente de un orden dado (P_u) (m/m); 72. Desnivel medio de las corrientes de un orden dado (D_{mu}) (m); 73. Pendiente media de las corrientes de un orden dado (P_{mu}) (m/m); 74. Pendiente media acumulada de las corrientes de un orden dado (P_{mau}) (m/m); 75. Relación de pendiente (R_p); 76. Relación de pendiente media (R_{pm}); 77. Frecuencia de las corrientes de un orden dado (F_u) (N _u /Km ²); 78. Frecuencia media de las corrientes totales de la red de drenaje (F_{mc}) (N _u /Km ²); 79. Número de corrientes de orden 1 (N_1); 80. Coeficiente de torrencialidad (Ct) (N ₁ /Km ²); 81. Coeficiente de almacenamiento (Ca); 82. Magnitud de la cuenca (M) (N ₁)
Hidráulico (1 parámetro)	83. Ancho máximo de la sección hidráulica de interés ($ash_{máx}$) (m)

Análisis de correlación lineal

Destaca a primera vista que existe una muy buena y alta correlación entre todos los parámetros que conforman a la variable escala de la cuenca con los caudales máximos instantáneos (Tabla 4), evidenciando que éstos guardan una estrecha relación proporcional con las dimensiones de los sistemas hidrogeomorfológicos que las producen.

Algunos de los parámetros morfométricos de la variable gradiente y forma del relieve de la cuenca que exhiben buenas correlaciones, mientras que todos

los parámetros que definen a la variable forma de la cuenca, en general presentan desde regulares a muy bajas correlaciones (Tabla 4), y ello tiene que ver principalmente con que todas las cuencas muestran valores de formas bastante cercanos entre sí.

En la variable extensión de la red de drenaje, solamente algunos parámetros (longitudes de las corrientes de los sistemas de drenaje y el centro de gravedad) presentaron altos coeficientes de correlación (Tabla 4), con lo cual se establece que las magnitudes de dichos caudales son una función de la extensión y distribución espacial de las redes de drenaje.

Tabla 2
Parámetros morfométricos de las cuencas de drenaje

Estadístico	A (Km ²)	Av_{may} (Km ²)	Av_{mep} (Km ²)	P (Km)	L (Km)	a (Km)	$a_{máx}$ (Km)	D (Km)	Ar (Km ²)	Pc (Km)
Valor máximo	31,38	25,55	8,83	25,10	8,70	3,74	6,18	6,32	51,79	19,86
Valor mínimo	2,89	1,63	1,26	6,80	2,88	1,00	1,40	1,92	4,03	6,03
Media	13,89	9,23	4,65	16,15	6,08	2,06	3,26	3,97	22,05	12,46
Estadístico	h (msnm)	H (msnm)	Hm (msnm)	H_n (msnm)	h_d (msnm)	Rm (m)	R (m/Km)	P_m (m/m)	Cp	Pcp_m (m/m)
Valor máximo	125	2770	1316,76	2550	125	2745	442,50	0,34	0,71	0,41
Valor mínimo	25	1280	547,71	1200	25	1230	270,83	0,24	0,00	0,20
Media	48,85	2122,08	939,70	2040,38	48,85	2073,23	353,45	0,30	0,39	0,27
Estadístico	$Rmcp$ (m)	Ft	Ptc_m (m/m)	IH	Cm (msnm/ Km ²)	Co	Rr (m/Km)	NR	E	Prc
Valor máximo	2525	1367,37	0,82	0,55	195,57	154518,28	180,88	0,91	0,68	25,94
Valor mínimo	1150	666,30	0,50	0,35	34,74	36620,01	92,20	0,42	0,48	16,00
Media	1991,54	1020,23	0,65	0,43	98,66	84764,85	136,94	0,63	0,57	21,38
Estadístico	Kc	la	lh	ls	Ff	Ac	Re	RC	If	ICo
Valor máximo	1,43	3,01	0,77	4,38	0,46	2,08	0,76	0,79	2,03	1,13
Valor mínimo	1,12	1,36	0,51	1,01	0,23	1,48	0,54	0,48	1,60	1,13
Media	1,29	2,03	0,64	1,89	0,33	1,77	0,64	0,60	1,84	1,13
Estadístico	Cf	Cr	Lcp (Km)	Lv_m (Km)	Ltc (Km)	S	St	Sh	Cg (Km)	Dd (Km/ Km ²)
Valor máximo	0,46	3,40	13,55	11,00	255,55	1,66	1,34	13,55	11,00	255,55
Valor mínimo	0,23	1,72	3,55	3,00	34,03	1,09	1,02	3,55	3,00	34,03
Media	0,33	2,50	7,86	6,75	123,33	1,33	1,13	7,86	6,75	123,33
Estadístico	Td (Km ⁻¹)	Cmc (Km ² / Km)	Em (Km)	Lfs (Km)	Tt	Id (Km)	Am	N_i	u	R_{bm}
Valor máximo	1136,46	0,18	0,04	0,10	1,52	5,21	2,80	1120	6	4,99
Valor mínimo	87,08	0,07	0,02	0,03	1,06	2,75	1,83	169	4	3,58
Media	430,41	0,11	0,03	0,05	1,30	4,09	2,27	497,54	5,15	4,10
Estadístico	R_{Lm}	R_{pm}	F_{mc} (N _i /Km ²)	Ct (N _i /Km ²)	Ca	M (N _i)	$ash_{máx}$ (m)			
Valor máximo	2,84	1,66	76,92	60,85	0,58	886	125			
Valor mínimo	1,92	1,16	15,48	11,72	0,50	127	35			
Media	2,26	1,41	40,83	31,51	0,55	384,54	63			

Con la variable orden y magnitud de la red de drenaje destacan como buenos predictores los parámetros orden de la cuenca, número total de corrientes de la red de drenaje y magnitud de la cuenca (Tabla 4). Ello demuestra que mientras más amplias y extensas son las redes, mayores son las magnitudes de los caudales.

Análisis de componentes principales de los parámetros morfométricos

Según el Análisis de la Varianza Total Explicada (AVTE), todos los parámetros morfométricos agrupados

en la variable escala de la cuenca se explican en un mismo componente (CP 1), y ello tiene que ver con que existen altas correlaciones entre todos estos parámetros. Para el caso de la variable gradiente y forma del relieve de la cuenca se obtuvieron cuatro CP, aunque son los dos primeros CP los que mayor proporción albergan en la explicación de los mismos.

En la variable forma de la cuenca, la VTE alcanzó su mejor porcentaje de representación en los dos primeros CP. Para la variable extensión de la red de drenaje se generaron tres CP, en el tercero de los cuales se explica el mayor porcentaje; y para el caso de la variable orden y magnitud

Tabla 3

Caudales máximos instantáneos ($Tr = 100$ años) de las cuencas de drenaje para condiciones posteriores a los aludes torrenciales de diciembre de 1999

Cuenca	Caudal máximo instantáneo posterior a los aludes torrenciales de Diciembre de 1999 ($Tr = 100$ años) ($Q_{mi_{pos-d}}$) (m^3/s)
Qda. Curucutí	159
Qda. Piedra Azul	413
Qda. Osorio	80
Qda. Cariaco	115
Río San José de Galipán	320
Qda. El Cojo	114
Qda. Camurí Chiquito	204
Qda. San Julián	448
Qda. Seca	71
Río Cerro Grande	500
Río Uria	260
Río Naiguatá	544
Río Camurí Grande	401
Valor máximo =	676
Valor mínimo =	71
Media =	300,31
Moda =	-
Mediana =	260
Varianza =	39695,23
Desviación estándar =	199,24
Asimetría =	0,51
Curtosis =	-0,98
Coefficiente de variación =	0,66
Primer cuartil =	115
Segundo cuartil =	260
Tercer cuartil =	448

Nota. Tabla elaborada con información tomada de "Estimación de hidrogramas de crecidas en cuencas del Litoral Central luego de los aludes torrenciales de Diciembre de 1999" por M. González y J. Córdova, 2003, *Acta Científica Venezolana*, 54 (1), 63-87.

de la red de drenaje se obtuvieron de igual forma tres CP, en cuyo CP 3 se alcanza el mayor porcentaje de representación.

Con relación a los coeficientes de las puntuaciones (pesos) obtenidos para cada parámetro de cada variable morfométrica y reagrupados según los CP (nuevas variables), se observó que en el caso de la variable escala de la cuenca todos sus parámetros poseen valores equiparables. Para el resto de las otras variables morfométricas se observaron diferencias significativas en cuanto a sus coeficientes de puntuaciones.

Análisis de regresión lineal múltiple

Los resultados de los modelos obtenidos en los ARLM entre los CP de los parámetros morfométricos de la variable escala de la cuenca y los caudales máximos

instantáneos, presentaron en primer lugar muy buenos coeficientes de correlación e índices de determinación, con lo cual se afirma inicialmente que los modelos generados se ajustan y explican muy bien las relaciones entre ambas variables.

Las apreciaciones con relación al modelo generado para la variable gradiente y forma del relieve de la cuenca, coincidieron en todos sus aspectos con los realizados anteriormente para la variable escala de la cuenca, y con mejores estimaciones. Con relación a la variable forma de la cuenca, aun cuando los modelos obtenidos no son extremadamente deficientes, tampoco son los

mejores predictores. Las variables extensión de la red de drenaje y orden y magnitud de la red de drenaje, se presentan como buenas predictoras también.

Tabla 4

Coeficientes de correlación entre los caudales máximos instantáneos (Tr = 100 años) y los parámetros morfométricos de las cuencas y redes de drenaje

Parámetro morfométrico	Caudal máximo instantáneo posterior a los aludes torrenciales de Diciembre de 1999	Parámetro morfométrico	Caudal máximo instantáneo posterior a los aludes torrenciales de Diciembre de 1999
	(Tr = 100 años)		(Tr = 100 años)
	$(Q_{mi_{pos-d}})$		$(Q_{mi_{pos-d}})$
	(m ³ /s)		(m ³ /s)
A (Km ²)	0,94	Is	0,51
Av_{may} (Km ²)	0,88	Ff	0,62
Av_{men} (Km ²)	0,90	Ac	-0,63
P (Km)	0,94	Re	0,62
L (Km)	0,93	RC	0,17
A (Km)	0,92	If	-0,24
$a_{máx}$ (Km)	0,89	Cf	0,62
D (Km)	0,95	Cr	-0,62
Ar (Km ²)	0,92	Lcp (Km)	0,84
Pc (Km)	0,95	Lv_m (Km)	0,91
h (msnm)	-0,13	Ltc (Km)	0,87
H (msnm)	0,71	S	0,06
Hm (msnm)	0,66	St	0,51
H_n (msnm)	0,70	Sh	-0,49
h_d (msnm)	-0,13	Cg (Km)	0,84
Rm (m)	0,70	Dd (Km/Km ²)	-0,45
R (m/Km)	-0,73	Td (Km ⁻¹)	-0,39
P_m (m/m)	0,07	Cmc (Km ² /Km)	0,47
Cp	0,11	Em (Km)	0,47
Pcp_m (m/m)	-0,75	Lfs (Km)	0,43
$Rmcp$ (m)	0,69	Tt	-0,47
Ft	0,21	Id (Km)	-0,43
Ptc_m (m/m)	-0,10	Am	-0,41
IH	0,25	N_t	0,78
Cm (msnm/Km ²)	-0,87	u	0,73
Co	-0,75	R_{bm}	-0,54
Rr (m/Km)	-0,79	R_{Lm}	-0,58
NR	-0,77	R_{pm}	-0,01
E	0,62	F_{mc} (N _t /Km ²)	-0,43
Prc	-0,27	Ct (N _t /Km ²)	-0,41
Kc	-0,24	Ca	-0,09
Ia	-0,56	M (N _t)	0,72
Ih	-0,04	$ash_{máx}$ (m)	0,75

Modelos predictivos de caudales máximos instantáneos (Tr = 100 años)

Se generó un modelo predictivo (ecuación lineal) con cada grupo de parámetros morfométricos de cada variable morfométrica y los caudales máximos instantáneos, de acuerdo con los casos en que los CP de cada grupo de parámetros morfométricos satisficieron a dichos modelos. De esta manera, en la Tabla 5 se

aprecian cada uno de los modelos (ecuaciones lineales) que predicen a dichos caudales máximos instantáneos.

Se muestran como excelentes modelos predictores los representativos de las variables morfométricas escala de la cuenca, gradiente y forma del relieve de la cuenca y extensión de la red de drenaje, siendo el primero el que presentó el mejor nivel de ajuste (Tabla 6).

Tabla 5
Modelos (ecuaciones) estadístico-matemáticos predictivos de los caudales máximos instantáneos (Tr = 100 años)

Variable	Modelo estadístico-matemático predictivo de los caudales máximos instantáneos
Escala de la cuenca	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$ $Qmi_{pos-at} = 279,154 + 166,882(CP1)$
Gradiente y forma del relieve de la cuenca	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$ $Qmi_{pos-at} = 279,154 + 106,140(CP1) + (-116,567(CP2))$
Forma de la cuenca	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$ $Qmi_{pos-at} = 279,154 + 122,679(CP1)$
Extensión de la red de drenaje	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3$ $Qmi_{pos-at} = 279,154 + (-67,028(CP1)) + 145,189(CP2) + (-36,443(CP3))$
Orden y magnitud de la red de drenaje	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$ $Qmi_{pos-at} = 279,154 + 120,246(CP1)$

Operacionalización del modelo predictivo final seleccionado

Para la estimación de los caudales máximos instantáneos se procedió a diseñar un modelo operativo integrado en una hoja de cálculo del software Excel, a fin de facilitar su utilización y manejo por parte del usuario. Este

modelo contempló la organización de criterios o aspectos en columnas consecutivas de la forma que se muestra en la Figura 2.

El procedimiento inicia con el cálculo de la media y de la desviación estándar de los valores de cada parámetro morfométrico de las cuencas de drenaje.

Tabla 6
Magnitudes de los caudales máximos instantáneos (Tr = 100 años) estimados con los nuevos modelos predictivos

Cuenca	Caudal máximo instantáneo (Tr = 100 años) (Qmi_{pos-d}) (m^3/s)	Caudal máximo instantáneo posterior a los aludes torrenciales de Diciembre de 1999 (Tr = 100 años) (Qmi_{pos-d}) (m^3/s) estimados por los modelos predictivos generados por el ARLM por cada grupo de parámetros morfométricos según variable morfométrica				
		Escala de la cuenca	Gradiente y forma del relieve de la cuenca	Forma de la cuenca	Extensión de la red de drenaje	Orden y magnitud de la red de drenaje
Qda. Curucutí	159	168,90	225,95	292,32	203,82	250,23
Qda. Piedra Azul	413	391,43	349,40	470,78	443,69	243,61
Qda. Osorio	80	91,67	58,19	184,53	64,86	109,82
Qda. Cariaco	115	113,91	118,31	178,87	109,04	271,38
Río San José de Galipán	320	300,90	284,23	255,19	313,26	459,00
Qda. El Cojo	114	127,86	177,76	94,33	108,17	225,98
Qda. Camurí Chiquito	204	214,89	290,72	113,21	266,39	240,54
Qda. San Julián	448	410,58	400,63	321,82	361,52	234,42
Qda. Seca	71	50,71	-5,71	237,12	68,42	68,01
Río Cerro Grande	500	487,17	449,78	303,86	463,75	408,99
Río Uria	260	267,50	332,16	382,78	247,42	267,58
Río Naiguatá	544	563,10	503,24	496,27	560,10	419,02
Río Camurí Grande	401	440,37	444,35	297,92	418,55	430,40
Coeficiente de correlación =		0,99	0,94	0,73	0,98	0,71

Estimación de las magnitudes de los caudales máximos instantáneos para condiciones posteriores a los aludes torrenciales de Diciembre de 1999 de cuencas y redes de drenaje de la vertiente norte del macizo "El Ávila" (estado Vargas, Venezuela) a partir de modelos (ecuaciones) estadístico-matemáticos predictivos generados por el ARLM entre los componentes principales de los parámetros morfométricos de la variable escala de la cuenca (variables independientes o predictores) y los caudales máximos instantáneos para condiciones posteriores a los aludes torrenciales de Diciembre de 1999 (variables dependientes) observados

N°	Parámetro morfométrico	Coefficientes de las puntuaciones (pesos)	Media	Desviación estándar	Nueva cuenca	Puntuaciones factoriales estandarizadas
		CP 1				
1	Área (Km ²)	0,105	13,89	9,32	3,92	-0,11
2	Área de la vertiente mayor (Km ²)	0,102	9,23	7,23	2,92	-0,09
3	Área de la vertiente menor (Km ²)	0,092	4,65	2,66	1,00	-0,13
4	Perímetro (Km)	0,105	16,15	5,65	9,50	-0,12
5	Longitud (Km)	0,101	6,08	1,83	3,25	-0,16
6	Ancho promedio (Km)	0,104	2,06	0,92	1,21	-0,10
7	Ancho máximo (Km)	0,103	3,26	1,50	1,69	-0,11
8	Diámetro (Km)	0,106	3,97	1,45	2,23	-0,13
9	Área del rectángulo equivalente al de la cuenca (Km ²)	0,105	22,05	15,10	5,49	-0,12
10	Perímetro de un círculo igual al área de la cuenca (Km)	0,106	12,46	4,57	7,02	-0,13

-1,18

N°	Parámetro de respuesta hidológica	Nueva cuenca
1	Caudal máximo instantáneo posterior al deslave (Tr = 100 años) (m ³ /s)	82,43

Ejemplo elaborado con datos de parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Catuche, vertiente sur del macizo "El Ávila", Distrito Capital, Venezuela

Figura 2. Modelo operativo integrado para la estimación de los caudales máximos instantáneos (Tr = 100 años).

Seguidamente se estandarizaron los valores de cada parámetro morfométrico para cada cuenca de drenaje, restándole al valor de cada parámetro morfométrico por cada cuenca su respectiva media, dividiéndolo luego entre su desviación estándar y multiplicándolo finalmente por el coeficiente de la puntuación (peso) correspondiente.

Posteriormente se realizó la sumatoria de las puntuaciones factoriales estandarizadas de todos los parámetros morfométricos por cada cuenca de drenaje. Por último, se estima el caudal máximo instantáneo (Tr = 100 años) de la nueva cuenca empleando el modelo generado por el ARLM, en el cual la variable predictiva representada por el CP1 (sumatoria de las puntuaciones factoriales estandarizadas) para este caso, multiplica a su respectivo coeficiente β . En la Figura 2 se muestra un ejemplo de aplicación con datos morfométricos de la cuenca de la quebrada Catuche, ubicada en la vertiente sur del macizo "El Ávila".

Conclusiones

El ACL entre los caudales máximos instantáneos y los parámetros morfométricos de las cuencas y sus redes de drenaje, revelaron casos donde no existe ningún tipo

de correlación hasta aquellos en los que las mismas se muestran como medianamente buenas, buenas y muy buenas. Las mejores correlaciones se observaron con los parámetros de la variable escala de la cuenca en su totalidad, y con algunos de las variables gradiente y forma del relieve, extensión de la red de drenaje, y orden y magnitud de la red de drenaje. El ACP permitió reducir la dimensionalidad de los grupos de parámetros morfométricos, definiendo como nuevas variables a los CP o factoriales creados para cada grupo o variable morfométrica inicial.

El ARLM con los CP de los grupos o variables morfométricas, reveló muy buenas correlaciones e índices de determinación entre éstos y los caudales máximos instantáneos, observándose las mejores y más altas correspondencias en orden de importancia con las variables escala de la cuenca, extensión de la red de drenaje y gradiente y forma del relieve de la cuenca.

A pesar que la mayoría de los modelos predictivos generados por cada variable morfométrica arrojaron muy buenos resultados (a excepción de los correspondientes a las variables forma de la cuenca y orden y magnitud de la red de drenaje), se seleccionó solamente uno como el mejor modelo, que para este caso es el correspondiente a la variable escala de la cuenca.

Referencias bibliográficas

1. Delgado M. y Gáspari F.: "Caracterización morfométrica geoespacial, estudio de caso: Arroyo Belisario, Argentina". *Tecnociencia Chihuahua*, Vol. 4, N° 3 (2010) 154-163.
2. Martínez G., Díaz J. y Cosío O.: "Análisis morfométrico en la cuenca hidrológica San José del Cabo, B. C. S., México: Una aproximación en la identificación de potenciales áreas de captura". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 27, N° 3 (2010) 581-592.
3. Genchi S., Carbone M., Piccolo M. y Perillo G.: "Hydrologic response of the drainage basins that intersect Las Grutas town, Argentina". *Investigaciones Geográficas*, N° 75 (2011) 23-36.
4. Martínez G. y Díaz J.: "Morfometría en la cuenca hidrológica de San José del Cabo, Baja California Sur, México". *Revista Geológica de América Central*, N° 44 (2011) 83-100.
5. Salas V., Pinedo C., Viramontes O., Báez A. y Quintana R.: "Morfometría de la cuenca del río Nazas-Rodeo en Durango, México, aplicando tecnología geoespacial". *Tecnociencia Chihuahua*, Vol. 5, N° 1 (2011) 34-42.
6. Campo A., Aldalur N. y Fernández S.: "Morfometría fluvial aplicada a una cuenca urbana en Ingeniero White, República Argentina". *Investigaciones Geográficas*, N° 77 (2012) 7-17.
7. Gáspari F., Rodríguez A., Senisterra G., Denegri G., Delgado M. y Besteiro S.: "Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce, Buenos Aires, Argentina". *AUGMDomus*, N° 4 (2012) 143-158.
8. Romshoo S., Bhat S. y Rashid I.: "Geoinformatics for assessing the morphometric control on hydrological response at watershed scale in the Upper Indus Basin". *Journal of Earth's Systems Sciences*, Vol. 121, N° 3 (2012) 659-686.
9. Esper M. y Perucca L.: "Caracterización morfométrica de la cuenca del río Seco a propósito de las fuertes precipitaciones de enero de 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 66, N° 2 (2014) 235-245.
10. Karalis S., Karymbalis E., Valkanou K., Chalkias C., Katsafados P., Kalogeropoulos K., Batzakis V. y Bofilios A.: "Assessment of the relationships among catchment's morphometric parameters and hydrologic indices". *International Journal of Geosciences*, N° 5 (2014) 1571-1583.
11. Meza M., Rodríguez A., Corvacho O. y Tapia A.: "Análisis morfométrico de microcuencas afectadas por flujos de detritos bajo precipitación intensa en la quebrada de Camiña, Norte Grande de Chile". *Diálogo Andino*, N° 44 (2014) 15-24.
12. Quiroga D., Gil V. y Coronato A.: "Morfometría de la cuenca del río Avilés, Tierra del Fuego, Argentina: Aportes al conocimiento de las condiciones de escurrimiento en territorios semiáridos". *Cuaternario y Geomorfología*, Vol. 28, N° 1-2 (2014) 63-80.
13. Souza A. de y Bernardes F.: "Análise morfométrica da bacia do Rio Pardo (MG E SP)". *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Vol. 15, N° 3 (2014) 471-491.
14. Yunus A., Oguchi T. y Hayakawa Y.: "Morphometric analysis of drainage basins in the Western Arabian Peninsula using multivariate statistics". *International Journal of Geosciences*, N° 5 (2014) 527-539.
15. Dirección de Cartografía Nacional.: "Hojas II-8, III-8, IV-8, I-9, II-9, III-9, IV-9, I-10, II-10, III-10, IV-10, I-11, II-11, III-11, IV-11, I-12, II-12, III-12, IV-12, I-13, II-13, III-13 y IV-13" [Planos topográficos a escala 1:5.000, Proyecto BITUCOTEX], Caracas, Venezuela, 1958.
16. Dirección de Cartografía Nacional.: "Hoja 6847-IV-SO 23 de Enero; Hoja 6847-I-SO Curupao; Hoja 6847-IV-NE El Caribe; Hoja 6847-IV-SE Los Chorros; Hoja 6847-IV-NO Maiquetía; y Hoja 6847-I-NO Naiguatá" [Cartas topográficas a escala 1:25.000], Caracas, Venezuela, 1979.
17. Gobernación del Distrito Federal.: "Hojas B-42, C-42, D-42, E-42, B-43, C-43, D-43, E-43, B-44, C-44, D-44, B-45, B-46, B-47, B-48 y B-49" [Planos topográficos a escala 1:5.000], Caracas, Venezuela, 1984.
18. Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional.: "Hoja 6847-IV-NE Caraballeda; Hoja 6847-IV-SO Caracas; Hoja 6847-I-SO Curupao; Hoja 6847-IV-NO La Guaira; Hoja 6847-IV-SE Los Chorros; y Hoja 6847-I-NO Naiguatá" [Ortofotomapas a escala 1:25.000], Caracas, Venezuela, 1995.
19. González M. y Córdova J.: "Estimación de hidrogramas de crecidas en cuencas del Litoral Central luego de los aludes torrenciales de Diciembre de 1999". *Acta Científica Venezolana*, Vol. 54, N° 1 (2003) 63-87.

Recibido el 12 de Abril de 2015

En forma revisada el 19 de Octubre de 2015