

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XX CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

ESTUDIO DE CRECIDAS EN LA CUENCA DEL RÍO ITATA APLICANDO EL
HIDROGRAMA UNITARIO INSTANTÁNEO GEOMORFOLÓGICO

JOSÉ VARGAS B.¹
SERGIO VILCHES E.²

RESUMEN

En los últimos años, en Chile se han usado principalmente modelos tradicionales para predecir caudales máximos de origen pluvial en cuencas no controladas. A partir de sistemas de información geográfica (SIG), en este estudio se evalúa una formulación sin aplicación conocida en el país: el Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico (HUIG). En este trabajo, se definen las ecuaciones gobernantes y se emplea la metodología para calcular crecidas con diferentes períodos de retorno en cuatro subcuencas de la hoya hidrográfica del río Itata. Los pasos fundamentales del estudio incluyen la recopilación de la información pluviométrica y fluviométrica y la caracterización morfológica de las cuencas con el uso del programa ArcGIS 9.2, en base a un modelo digital de elevación (MDE). Las predicciones realizadas se comparan con el análisis de frecuencia de los datos históricos y con los resultados de procedimientos típicos de determinación de crecidas. Las estimaciones del hidrograma geomorfológico son las más consistentes, con porcentajes de error promedio entre un 2% y un 11%.

¹Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - mail: jvargas@udec.cl

²Ingeniero Civil, Universidad de Concepción - mail: svilches@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de crecidas en cursos de agua ha sido un tópico relevante en la hidrología aplicada por alrededor de un siglo. Pese a los desarrollos y aportes concretos realizados por investigadores e ingenieros especializados, la necesidad de predecir caudales máximos es una materia que sigue estando afectada a una incertidumbre inherente. La problemática anterior es aún mayor en zonas sin información fluviométrica. En este sentido, la realidad de Chile indica que los registros de caudales máximos son escasos y de corta data, situación generalizada en las distintas regiones del país. De este modo, tanto para el diseño de obras hidráulicas como para la planificación sustentable del recurso hídrico, uno de los desafíos más importantes en cuencas chilenas sin datos es contar con métodos confiables para el cálculo de crecidas asociadas a un determinado período de retorno.

En las últimas dos décadas, para estimar caudales máximos en cuencas no informadas, en el país se han usado modelos convencionales incluidos en el “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica” (DGA-MOP, 1995). Hoy en día es de interés validar nuevas herramientas de diseño que sean más eficientes e hidrológicamente basadas que las metodologías de uso común. Recientemente, aprovechando el potencial de los sistemas de información geográfica (SIG), en otros países del mundo se ha usado el Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico (HUIG) para determinar crecidas pluviales en cuencas no instrumentadas (Kumar *et al.*, 2006). El tema de esta investigación se centra en un análisis de este modelo en la cuenca del río Itata, a partir de información SIG.

2. METODOLOGÍA

La metodología del estudio se resume en los siguientes pasos: (1) definición de subcuencas de trabajo en estaciones con datos; (2) recopilación de registros de precipitaciones máximas diarias [$(P_{24})_{Máx}$] y caudales instantáneos máximos [$(Q_{inst})_{Máx}$]; (3) caracterización morfológica de las cuencas con el programa ArcGIS; (4) programación del modelo geomorfológico para la estimación de crecidas de origen pluvial con períodos de retorno de interés; (5) comparación de resultados con el análisis de frecuencia de los datos disponibles y con las predicciones de métodos tradicionales de cálculo (Método DGA-AC, Método de Verni-King, Fórmula Racional, HUS tipo Linsley, citados en DGA-MOP, 1995).

3. TEORÍA DEL HIDROGRAMA UNITARIO INSTANTÁNEO GEOMORFOLÓGICO

La teoría del HUIG fue introducida por Rodríguez-Iturbe y Valdés (1979) con el fin de relacionar el caudal y el tiempo al peak de un hidrograma unitario instantáneo (HUI) con características geomorfológicas de una cuenca y con un término dinámico dado por una velocidad representativa del agua. Al tratarse de un HUI, se busca representar la respuesta de la cuenca a un pulso unitario de precipitación efectiva uniformemente distribuida y de duración infinitesimal. En la base conceptual del modelo, se asume que la lluvia puede rastrearse a través de la red de drenaje con un enfoque probabilístico, adoptando el sistema jerárquico de Horton (1945) y Strahler (1957). La formulación original del HUIG es matemáticamente compleja y se basa en la función de densidad de probabilidad (fdp) del tiempo de viaje de una gota de precipitación efectiva que

recorre la trama hidrográfica, tomando en cuenta tiempos en las laderas y en los cauces. Haciendo algunas simplificaciones y asumiendo una respuesta hidrológica de tipo lineal, Rodríguez-Iturbe y Valdés derivaron las características más importantes del HUIG parametrizadas en términos de las razones de Horton. Las ecuaciones gobernantes son las siguientes:

$$q_p = 1,31 \cdot R_L^{0,43} \cdot V / L_\Omega \quad (1)$$

$$t_p = 0,44 \cdot (L_\Omega / V) \cdot (R_B / R_A)^{0,55} \cdot R_L^{-0,38} \quad (2)$$

donde q_p es el caudal peak en hr^{-1} , t_p es el tiempo al peak en hr, R_B , R_L y R_A son las razones hortonianas de bifurcación, longitud y área, respectivamente, L_Ω es la longitud del cauce de mayor orden en km, y V es la velocidad media del agua en m/s. La definición del término dinámico (V) es el punto más incierto del modelo. Sin embargo, asumir constante la velocidad del flujo hacia aguas abajo de la red de drenaje es una simplificación razonable, de acuerdo a las observaciones de Leopold y Maddock (1953) sobre la geometría hidráulica. Para su estimación, en este estudio se extendió el enfoque establecido por Franchini y O'Connell (1996), que relaciona este término con características geomorfológicas de la cuenca.

4. CONSIDERACIONES ESPECIALES DE APLICACIÓN DE LOS MODELOS

4.1 Modalidad de Cálculo y Aproximación Triangular del Hidrograma Unitario

Para probar el modelo descrito se usó un enfoque predictivo de diseño, empleando precipitaciones y caudales asociados a un determinado intervalo de ocurrencia promedio. Con esta modalidad de trabajo, se utilizó una aproximación triangular del hidrograma unitario, tal como definieron sus autores. En este caso, el hidrograma se describe sólo con el caudal peak, el tiempo al peak y el tiempo base, como se muestra en la Figura 1. La otra hipótesis fundamental fue especificar una tormenta de diseño de intensidad constante y de duración crítica igual al tiempo de concentración (t_c). Con estos supuestos, se derivaron por convolución las propiedades del Hidrograma de Escorrentía Directa (HED), siguiendo las referencias de Henderson (1963).

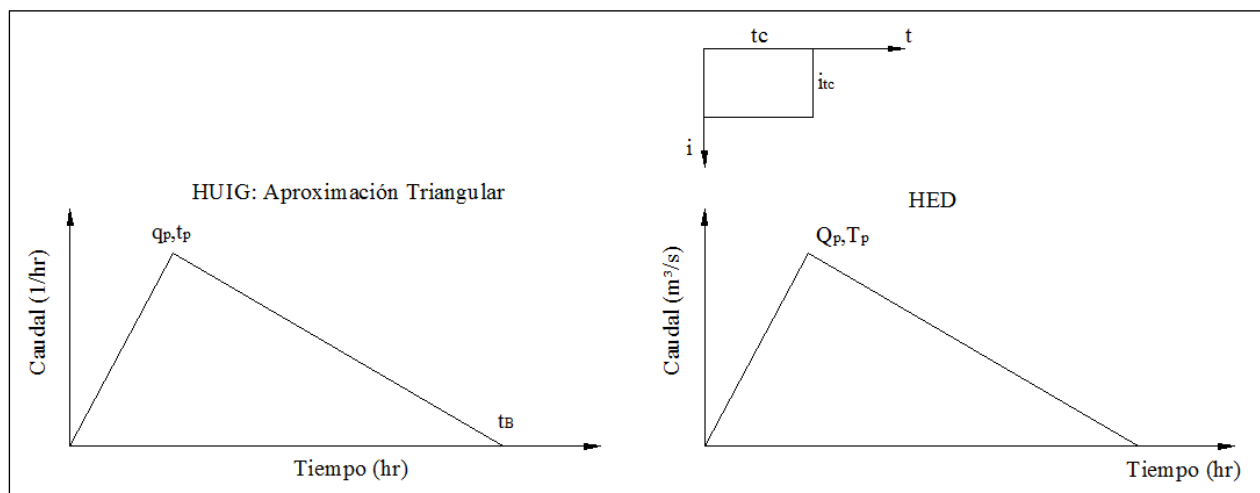


Figura 1 HUIG y HED

Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$\text{HUIG: } Q_p = (i_{\text{efect}})_{t_c}^T \cdot A_{\Omega} \cdot q_p \cdot t_c \cdot \left(1 - \frac{q_p \cdot t_c}{4}\right) \cdot \left(\frac{1000}{3600}\right) \quad (3)$$

$$T_p = t_p + t_c \cdot \left(1 - \frac{q_p \cdot t_p}{4}\right) \quad (4)$$

donde Q_p es el caudal peak de escorrentía directa en m^3/s , T_p es el tiempo al peak de escorrentía directa en hr, A_{Ω} es el área de la cuenca en km^2 , t_c es el tiempo de concentración en hr, y $(i_{\text{efect}})_{t_c}^T$ es la intensidad de lluvia efectiva sobre un tiempo de diseño de t_c horas para un período de retorno de T años, en mm/h .

4.2 Definición de la Lluvia de Diseño

En la Tabla 1 se definen matemáticamente algunas propiedades útiles para caracterizar la precipitación de diseño de entrada al modelo.

Tabla 1 Lluvia de Diseño: Input al Modelo Geomorfológico

PROPIEDAD	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
Tiempo de Concentración (t_c)	$t_c = 0,95 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385} \quad (5)$ <p><i>California Highways and Public Works</i> (DGA-MOP, 1995)</p>	<p>L: longitud del cauce principal, en km.</p> <p>H: desnivel máximo de la cuenca, en m.</p>
Precipitación Máxima con Período de Retorno de T años y duración t horas (P_t^T)	$P_t^T = K \cdot P_{24}^{10} \cdot CD_t \cdot CF_T \quad (6)$	<p>K: coeficiente para obtener la lluvia máxima en 24 horas en función de la lluvia máxima diaria, medida de 8:00 a 8:00 (se usó $K=1,1$).</p> <p>P_{24}^{10}: precipitación máxima diaria para un período de retorno de 10 años, en mm.</p> <p>CD_t y CF_T: coeficientes de duración y frecuencia, respectivamente (Varas y Sánchez, 1983)</p>

Para descontar las pérdidas a la precipitación total y obtener la lluvia efectiva, se aplicó la técnica de la Curva Número (CN), considerando los usos de suelo de las cuencas, los grupos hidrológicos (A,B,C,D) y las condiciones de humedad antecedente (AMC), tal como se describe en Ponce (1989) y Aparicio (1997). A fin de maximizar el caudal de crecida, se estableció la condición de humedad más crítica (tipo III). Con la información de los coeficientes de duración y los porcentajes de usos de suelo de cada cuenca, para calcular la precipitación efectiva de diseño

primero se llevó la lluvia máxima diaria al tiempo crítico (t_c) y luego se aplicó el método de la Curva Número para calcular la lluvia efectiva sobre dicha duración. Las ecuaciones de interés son las siguientes:

$$(P_{\text{efect}})_{t_c}^T = \frac{(P_{t_c}^T - 0,2S')^2}{P_{t_c}^T + 0,8S'}, \quad P_{t_c}^T \geq 0,2S' \quad (7)$$

$$(i_{\text{efect}})_{t_c}^T = (P_{\text{efect}})_{t_c}^T / t_c \quad (8)$$

$$CN(\text{III}) = \frac{23 \cdot CN(\text{II})}{10 + 0,13CN(\text{II})} \quad (9)$$

$$S' = \left(\frac{1000}{CN(\text{III})} - 10 \right) \cdot 25,4 \quad (10)$$

donde $(P_{\text{efect}})_{t_c}^T$ es la lluvia efectiva en mm, $P_{t_c}^T$ es la precipitación máxima total en mm, CN(II) y CN(III) son los valores de la curva número en condiciones de suelo normal y húmedo, respectivamente, y S' es el volumen potencial máximo de precipitación retenida en mm.

5. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

5.1 Generalidades

El estudio se circunscribió en la cuenca hidrográfica del río Itata, que forma parte de la VIII región del Biobío en la zona centro sur de Chile. Está ubicada entre los paralelos $36^{\circ}00'$ y $37^{\circ}20'$ de Latitud Sur, y entre los meridianos $71^{\circ}00'$ y $73^{\circ}10'$ de Longitud Oeste. Comprende un área aproximada de 11.294 km^2 . En la Figura 2 se presenta el MDE de la zona de estudio.

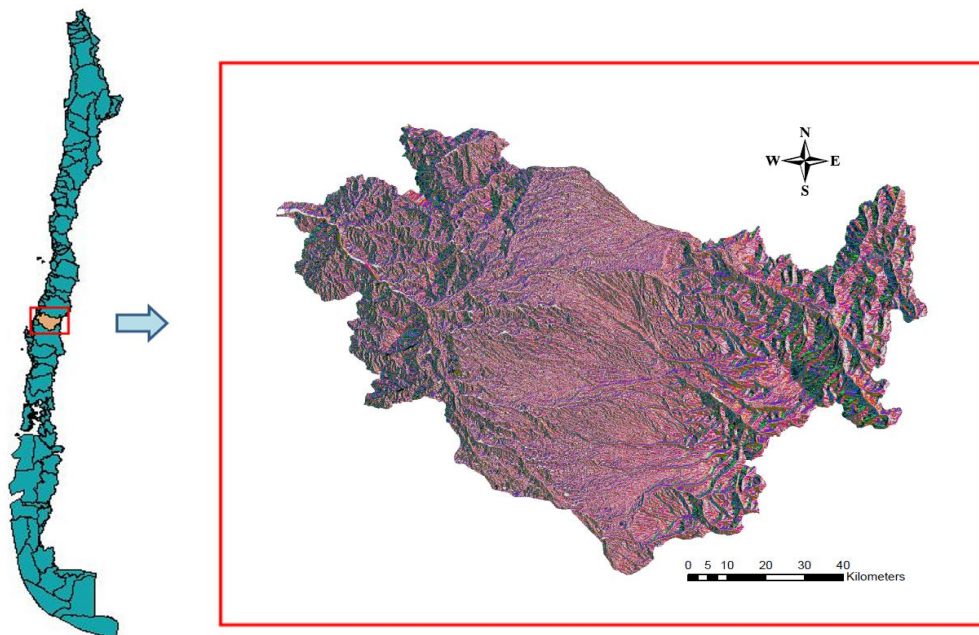


Figura 2 Cuenca del Río Itata: Ubicación y MDE (Resolución: 30x30 m)

Relativo a la superficie total de la cuenca, el uso de suelo está formado mayoritariamente por bosque nativo (17,7%), terrenos agrícolas (13,5%) y praderas naturales (9,1%). La descripción detallada del tipo de suelo para cada una de las subcuencas se hizo en base a capas de información geográfica.

5.2 Estaciones de Trabajo

La estadística de caudales instantáneos máximos y precipitaciones máximas diarias se obtuvo a partir de las estaciones detalladas en la Tabla 2. En la Figura 3 se precisan las cuencas aportantes.

Tabla 2 Estaciones Fluviométricas (Q) y Pluviométricas (P)

NOMBRE	CUENCA APORTANTE	LATITUD SUR (°)	PERÍODO DE REGISTRO
Q1: Río Renegado en Invernada	C1	36,85	1958-2009
Q2: Río Diguillín en San Lorenzo	C2	36,92	1958-2009
Q3: Río Chillán en Esperanza N°1	C3	36,78	1959-1994
Q4: Río Cato en Puente Cato	C4	36,55	1958-2009
NOMBRE	ALTITUD (m.s.n.m.)	LATITUD SUR (°)	PERÍODO DE REGISTRO
P1: Diguillín	710	36,87	1959-2009
P2: Fundo Atacalco	730	36,92	1930-2009
P3: Mayulermo	375	36,82	1992-2009
P4: Coihueco Embalse	330	36,65	1971-2009

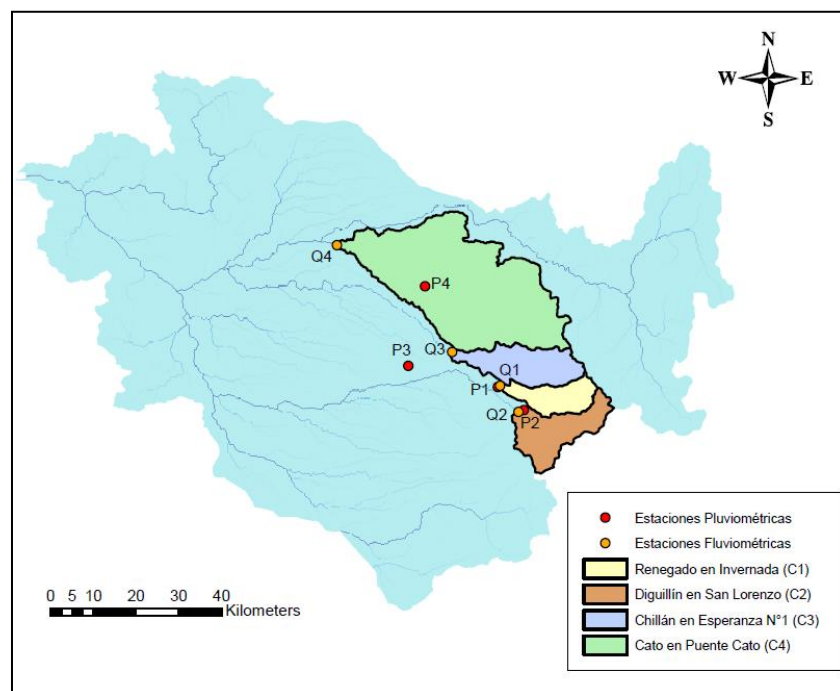


Figura 3 Cuencas Analizadas en la Zona de Estudio

5.3 Caracterización Morfológica

Tras procesar el MDE original con ArcGIS y delimitar las cuatro cuencas aportantes, se generaron las curvas de nivel. Con ello, para la aplicación de los modelos hidrológicos, se calcularon las pendientes medias con la expresión de Mociornita (DGA-MOP 1995), se encontró la cota promedio de la línea de nieves y se determinaron las áreas drenantes pluviales siguiendo el criterio de Escobar y Vidal (1992). En la Figura 4 se muestra un ejemplo.

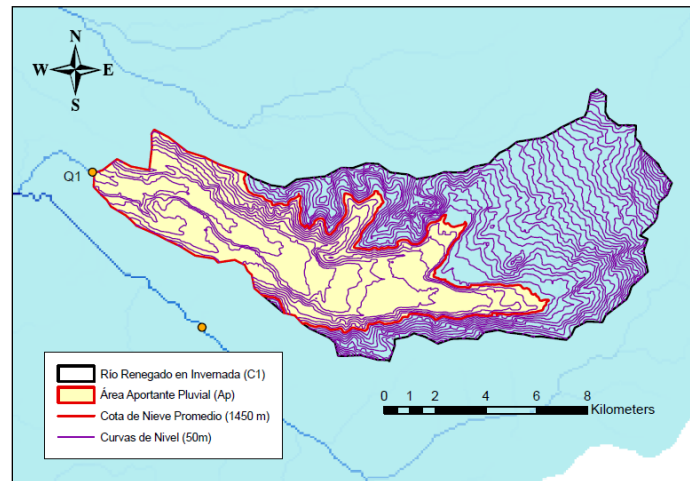


Figura 4 Curvas de Nivel y Área Aportante Pluvial, Río Renegado en Invernada

Para sintetizar las redes de drenaje, se emplearon algoritmos de SIG en función de un “valor umbral” (A), que corresponde al número de celdas necesarias en el MDE para formar un cauce. A medida que (A) disminuye, se crean progresivamente más ríos y tributarios. Se estableció un rango de variación de (A) entre [1000,50], lo que incluye redes de drenaje con muy pocos cauces y también retículos muy densos. A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo de las razones de Horton para la cuenca del río Chillán en Esperanza N°1, cuya red de drenaje se precisa en la Figura 5. La parametrización de la trama hidrográfica se incluye en la Tabla 3.

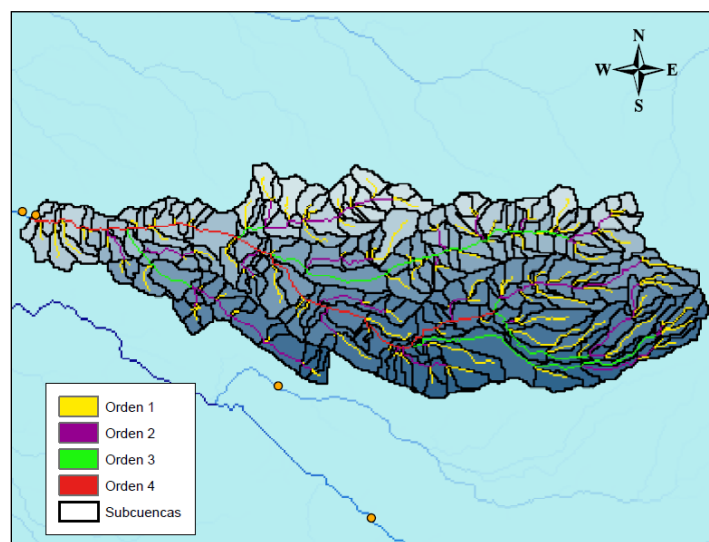


Figura 5 Red de Drenaje Generada para A=50, Río Chillán en Esperanza N°1

Tabla 3 Parametrización de la Red de Drenaje (C3)

Orden del cauce	Número de Cauces	Longitud (km)	Longitud Media (km)	Área Aportante (km ²)	Área Acumulada (km ²)	Área Media (km ²)
1	141	123,9	0,9	114,1	114,1	0,8
2	30	61,5	2,0	42,8	157,0	5,2
3	6	40,6	6,8	29,1	186,1	31,0
$\Omega = 4$	1	25,4	$L_{\Omega} = 25,4$	23,5	209,5	$A_{\Omega} = 209,5$

En la Figura 6 se muestran las regresiones logarítmicas realizadas para computar los números hortonianos como el antilogaritmo del valor absoluto de las pendientes de las gráficas.

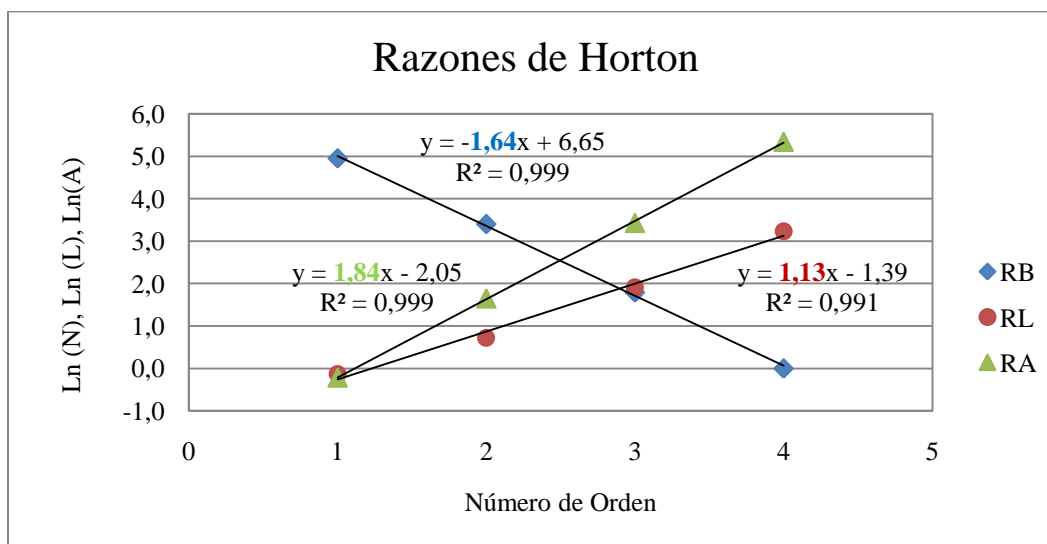


Figura 6 Estimación de Razones de Horton, Río Chillán en Esperanza N°1

En la Tabla 4 se sintetiza el análisis morfométrico realizado para las cuatro cuencas del estudio.

Tabla 4 Resumen de los Parámetros Morfológicos e Hidráulicos

PROPIEDADES	C1	C2	C3	C4
Área Aportante, A_{Ω} en km ²	52,9	200,4	209,5	973,0
Longitud del Cauce Principal, L en km	21,2	29,3	31,0	67,7
Longitud al Centroides, L_g en km	9,6	13,6	18,5	37,9
Pendiente Media de la Cuenca, S en %	27,7	46,7	34,1	20,0
Desnivel Máximo de la Cuenca, H en m	620	2480	2650	2150
Tiempo de Concentración, t_c en hr	2,72	2,32	2,42	6,44
Razón de Bifurcación, R_B	2,24	3,47	5,18	3,59
Razón de Longitud, R_L	1,50	1,88	3,09	1,81
Razón de Área, R_A	4,05	3,98	6,33	4,14
Orden de la Cuenca, Ω	3	5	4	5
Longitud del Cauce de Mayor Orden, L_{Ω} en km	8,9	9,8	25,4	24,3

*Las razones de Horton y otras características de la red de drenaje corresponden al retículo cuyo umbral (A) representa el mejor ajuste estadístico de acuerdo al esquema de Horton-Strahler.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Análisis de Frecuencia y Cálculo de la Curva Número

El análisis de frecuencia de precipitaciones máximas y caudales de crecida se hizo para períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. Se fijó la crecida centenaria como límite adecuado para las estimaciones a realizar, de acuerdo a los años de datos disponibles en las estaciones de trabajo.

Para calcular los valores de la curva número, en todas las cuencas se consideró que el suelo se encuentra igualmente distribuido entre los grupos hidrológicos B y C. En la Tabla 5 se muestra el cálculo de la curva número promedio para la cuenca del río Renegado en Invernada. En la Tabla 6 se presenta un cuadro resumen de los valores de la curva número (tipo III) para cada cuenca.

Tabla 5 CN Promedio, Río Renegado en Invernada (C1)

Usos de Suelo	Área (km ²)	%	CN (B)	CN (C)	CN ponderado
Bosques Nativo	45,13	85,34	68	78	62,30
Terrenos Agrícolas	3,36	6,36	80	86	5,28
Urbano	0,21	0,39	88	90	0,35
Áreas sin Vegetación	1,40	2,64	74	82	2,06
Plantaciones Forestales	1,80	3,40	66	77	2,43
Matorral	0,89	1,68	67	77	1,21
Estepa Andina	0,10	0,19	69	79	0,14
	52,88	100			73,76

$$CN(II) = 73,76 \Rightarrow CN(III) \approx 87$$

Tabla 6 Resumen CN

Hoya	CN(III)
C1	87
C2	90
C3	91
C4	89

6.2 Desarrollo de un Modelo Simple para la Velocidad Media

La velocidad media del agua se relacionó con características geomorfológicas de las cuencas. Se extendió el modelo establecido por Franchini y O'Connell (1996), incluyendo como variable descriptiva a la pendiente media de la hoya en la siguiente ecuación de regresión:

$$V(I) = \frac{L_{\Omega}}{a \cdot t_c \cdot (R_L)^b \cdot S^c} \quad (11)$$

donde V(I) es la velocidad media en m/s, a, b y c son coeficientes de ajuste, L_{Ω} se expresa en km, t_c en s, y S en o/1. Se ajustó el modelo en las cuatro cuencas para representar las velocidades que a priori reproducen la estadística histórica de caudales usando el HUIG (Tabla 7).

Tabla 7 Modelo de Velocidad

	C1	C2	C3	C4	Coeficientes de Ajuste			Correlación
*V (m/s)	1,900	3,100	3,700	1,700	a	b	C	R ²
V(I) (m/s)	2,093	2,822	3,700	1,700	0,154	0,968	-0,506	0,963

*Velocidades que reproducen la información de caudales usando el modelo HUIG.

La correlación del modelo se observa gráficamente en la Figura 7.

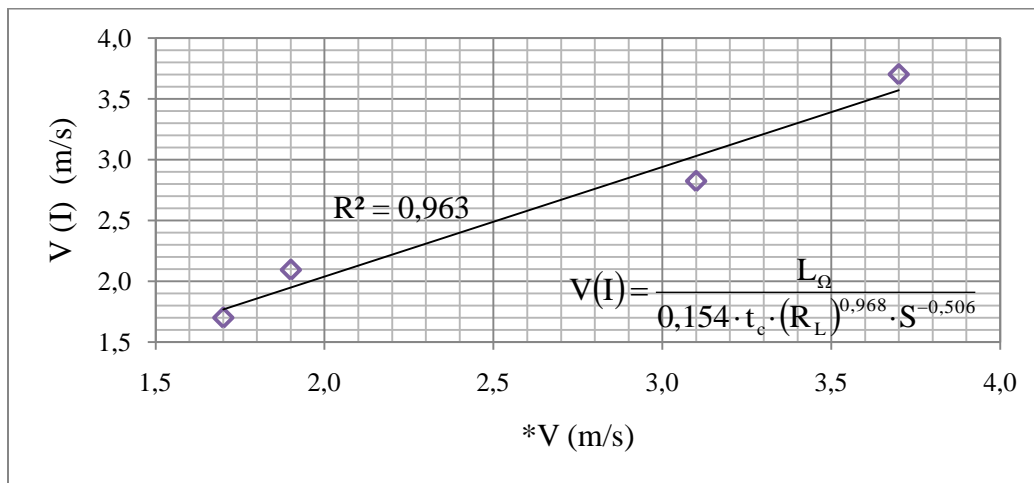


Figura 7 Correlación del Modelo de Velocidad

6.3 Aplicación de los Modelos

A modo de ejemplo, en la Tabla 8 se muestra el cálculo de la lluvia de diseño para la cuenca C1. Para esta misma hoy, en la Figura 8 se presenta el HUIG, construido a partir de los valores derivados de la red de drenaje y de la velocidad representativa.

Tabla 8 Precipitación de Diseño, Río Renegado en Invernada

$t_c = 2,722$ (hr), CN = 87						
T (años)	P_{24}^T (mm)	CD_{t_c}	$P_{t_c}^T$ (mm)	$i_{t_c}^T$ (mm/hr)	$(P_{effect})_{t_c}^T$ (mm)	$(i_{effect})_{t_c}^T$ (mm/hr)
10	185,00	0,288	53,34	19,60	25,00	9,19
25	216,70	0,288	62,48	22,96	32,45	11,92
50	241,70	0,288	69,68	25,60	38,54	14,16
100	267,95	0,288	77,25	28,38	45,09	16,57

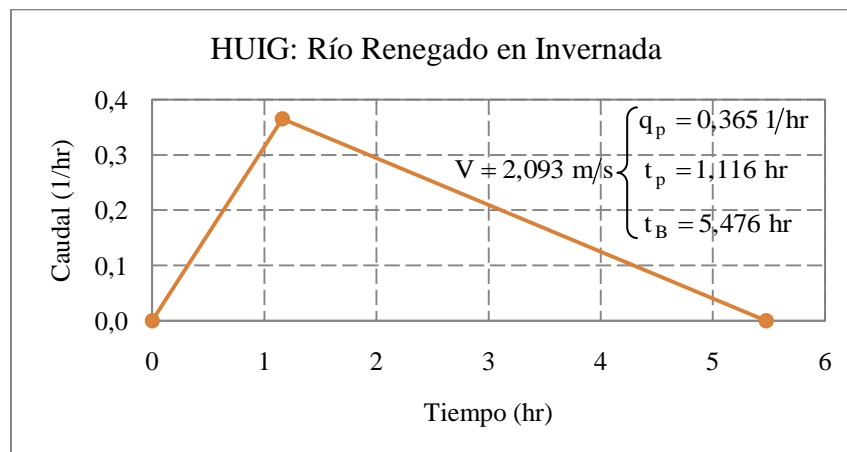


Figura 8 Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico (C1)

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la aplicación del modelo geomorfológico en todas las subcuencas analizadas. Los caudales de crecida obtenidos se comparan con el análisis de frecuencia de la estadística fluviométrica (A-F) y con las predicciones de cuatro procedimientos tradicionales de cálculo (Método Verni-King Modificado, HUS tipo Linsley, Fórmula Racional y Método DGA-AC, citados en DGA-MOP, 1995).

Tabla 9 Caudales Instantáneos Máximos en m³/s

C1: Río Renegado en Invernada						
T (años)	A-F (Pearson Tipo III)	HUIG	Verni-King	HUS Linsley	Fórmula Racional	DGA-AC
10	95,0	100,8	103,8	109,0	103,6	77,5
25	119,5	130,8	126,4	129,3	121,4	98,5
50	137,4	155,4	146,1	145,4	136,7	114,8
100	154,9	181,8	166,0	162,2	151,6	130,3
C2: Río Diguillín en San Lorenzo						
T (años)	A-F (Gumbel)	HUIG	Verni-King	HUS Linsley	Fórmula Racional	DGA-AC
10	573,1	535,7	347,1	406,0	434,0	293,2
25	685,1	649,4	405,5	464,9	492,1	372,4
50	768,2	732,3	452,8	506,9	538,9	433,9
100	850,7	813,6	495,3	547,6	579,4	492,6
C3: Río Chillán en Esperanza N°1						
T (años)	A-F (Gumbel)	HUIG	Verni-King	HUS Linsley	Fórmula Racional	DGA-AC
10	386,7	370,1	313,6	354,7	397,5	266,5
25	470,7	466,7	379,1	418,5	463,2	338,4
50	533,0	540,1	433,4	465,9	517,1	394,4
100	594,8	614,2	484,8	512,9	565,9	447,7
C4: Río Cato en Puente Cato						
T (años)	A-F (Gumbel)	HUIG	Verni-King	HUS Linsley	Fórmula Racional	DGA-AC
10	1193,4	1144,6	1089,4	1325,2	1083,5	1069,4
25	1458,0	1412,7	1308,7	1550,5	1256,2	1358,1
50	1654,3	1641,5	1513,1	1739,4	1415,0	1582,6
100	1849,2	1856,4	1695,1	1914,8	1550,7	1796,5

6.3 Análisis de Errores y Evaluación de Resultados

En la tabla siguiente se detallan los errores porcentuales, relativos a los valores obtenidos por análisis de frecuencia, de todos los métodos de estimación de crecidas.

Tabla 10 Errores Medios de los Modelos de Crecidas

Modelos	% de Error Promedio				
	C1	C2	C3	C4	Media
HUIG	11,5	5,2	2,4	2,1	5,3
Verni King	7,2	40,8	18,9	9,0	18,9
HUS Linsley	8,4	32,7	11,4	6,5	14,8
Fórmula Racional	3,3	28,5	3,0	13,4	12,1
DGA-AC	17,1	45,0	27,5	6,1	23,9

Se observa que el modelo HUIG tiene el error medio más bajo en tres de las cuatro cuencas del estudio, con un error mínimo de un 2,1% en el río Cato (C4) y un máximo de un 11,5% en el río Renegado (C1). A nivel global, es la metodología más consistente.

Resulta interesante hacer un análisis de los caudales específicos de las cuatro cuencas. En la Figura 9 se precisan dichos caudales para los períodos de retorno establecidos.

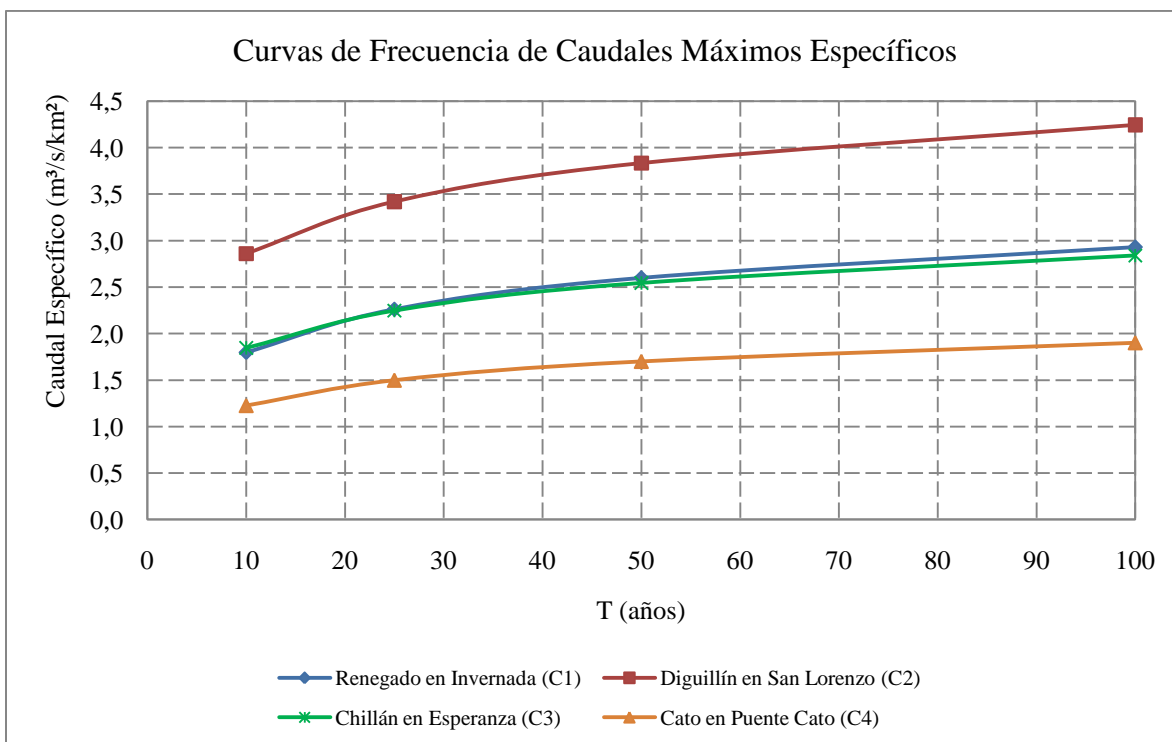


Figura 9 Curvas de Frecuencia de Caudales Máximos Específicos

En el gráfico se identifican tres zonas. Las curvas de frecuencia de las hoyas de los ríos Renegado y Chillán conforman una región intermedia, donde todos los métodos se comportan relativamente bien. En la zona de caudales específicos bajos, se distingue la curva del río Cato, hoya en que los modelos también tienen un porcentaje de error menor respecto al análisis de frecuencia. El río Diguillín, la cuenca más productiva, constituye la tercera región, en la que los métodos de cálculo convencionales subestiman hasta un 40% las crecidas. En el caso anterior, el HUIG tiene errores mucho más bajos que las demás formulaciones.

7. CONCLUSIONES

Se evaluó satisfactoriamente el HUIG, un modelo hidrológico sin aplicación conocida en Chile. Si bien el concepto del modelo data de hace más de dos décadas, fue interesante analizar su aplicación con las nuevas tecnologías SIG. Además, a nivel teórico, esta metodología tiene un soporte físicamente basado en la relación causa-efecto entre la geomorfología fluvial y la hidrología al detalle de la red de drenaje.

A partir del MDE de la zona de estudio, el programa ArcGIS fue muy útil para determinar las propiedades morfológicas más importantes y mostró ventajas notables en comparación a las técnicas comunes usadas para relevar información fisiográfica. Con los avances actuales de la tecnología se hace cada más factible contar con este tipo de herramientas digitales, por lo que se recomienda su uso y difusión.

Se confirmó que un hidrograma triangular es suficiente para hacer buenas predicciones en ingeniería con fines de diseño y que suponer una lluvia crítica de duración igual al tiempo de concentración es una aproximación aceptable. Por otro lado, el empleo del método de la Curva Número para separar la lluvia efectiva de la total dio resultados coherentes de acuerdo a la información de los usos de suelo y usando la forma de cálculo definida. Para la modelación, se seleccionaron los mejores retículos desde un punto de vista estadístico de acuerdo al esquema de Horton-Strahler. Con esta información de entrada, un punto fundamental fue la deducción de una ecuación sencilla para la velocidad media. Se expresó satisfactoriamente el término dinámico en función de la longitud del cauce de mayor orden, el tiempo de concentración, la razón de longitud y la pendiente media de la cuenca, obteniéndose un coeficiente de correlación de 0,96 respecto a las velocidades que a priori reproducían los caudales de crecida.

Con las consideraciones anteriores, la metodología de cálculo propuesta presentó los porcentajes de error medio más bajos respecto al análisis de frecuencia de caudales máximos, con valores entre un 2% y un 11%. En síntesis, las parametrizaciones originales de Rodríguez-Iturbe se complementaron en forma apropiada con el uso de información geográfica y entregaron resultados alentadores en la cuenca del río Itata. De este modo, se concluyó que las tecnologías tipo SIG tienen un gran potencial en la modelación de caudales de crecida, siempre y cuando se usen enfoques conceptuales simples con una base hidrológica adecuada y se empleen formulaciones matemáticas con pocos parámetros de calibración. Finalmente, si bien resta aplicar el modelo a otras cuencas fuera del estudio y analizar en profundidad sus variables más relevantes para recomendarlo en futuros estudios de crecidas en cuencas sin datos, este trabajo corresponde al primer paso para validar la teoría del HUIG en Chile.

8. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro de Ciencias Ambientales EULA de la Universidad de Concepción por proporcionar el MDE utilizado para el análisis morfométrico y a la DGA por facilitar los datos hidrológicos requeridos para realizar este estudio.

9. REFERENCIAS

Aparicio, M. (1997) Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México DF.

DGA-MOP (1995) Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Santiago.

Escobar, F., y F. Vidal (1992) Experiencia sobre la determinación de la línea de nieves en cuencas de Chile central. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. 7(2).

Franchini, M., y P.E. O'Connell (1996) An analysis of the dynamic component of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. Journal of Hydrology. 175. 407-428.

Henderson, F.M. (1963) Some properties of the unit hydrograph. Journal of Geophysical Research. 68(10). 4785-4793.

Horton, R.E. (1945) Erosional development of streams and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin. 56. 275-370.

Kumar, R., B. Sahoo, C. Chatterjee, S. Raghuwanshi y R.D. Singh (2006) Flood estimation by GIUH-based Clark and Nash models. Journal of Hydrologic Engineering. 11. 515-525.

Leopold, L.B., y T. Maddock (1953) The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. United States Geological Survey Professional Paper 252.

Ponce, V.M. (1989) Engineering Hydrology. Principles and Practices. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey.

Rodríguez-Iturbe, I., y J.B. Valdés (1979) The geomorphologic structure of hydrologic response. Water Resources Research. 15(6). 1409-1420.

Strahler, A.N. (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transactions of the American Geophysical Union. 38. 912-920.

Varas, E., y S. Sánchez (1983) Relaciones intensidad-duración-frecuencia generalizadas. VI Congreso Nacional de Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago. Octubre.