

ERRORES DETECTADOS AL ESTIMAR ESCORRENTÍA DIRECTA, MEDIANTE ALGUNOS METODOS DE HIDROGRAMAS UNITARIOS SINTÉTICOS

Oscar J. Mesa Sanchez y Blanca Adriana Botero

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas,

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

ojmesa@perseus.unalmed.edu.co

RESUMEN

Se hace un análisis de los errores producto de la aplicación directa a ocho cuencas en Antioquia Colombia, de los hidrogramas unitarios sintéticos desarrollados por Snyder, Williams y Hann, Rodriguez-Iturbe y Valdés y por el SCS (Soil Conservation Service) y se reporta el resultado de la recalibración de las ecuaciones. Las cuencas escogidas en el departamento de Antioquia tienen registros simultáneos de precipitación y caudal. El procedimiento de recalibración consiste en la minimización de la suma de los errores en el caudal y el tiempo al pico. Los errores entendidos como la diferencia entre valores calculados y observados, elevada al cuadrado. Mediante un método de optimización, se estiman los parámetros de cada modelo. Los resultados permiten concluir que los errores obtenidos luego de la recalibración disminuyeron notablemente. Sin embargo, los errores aún son altos, lo que indica que así se obligue a estos modelos a predecir caudales y tiempo al pico con el mínimo error no, son satisfactorios para una gama de diversos eventos, con diferente duración de la lluvia. Interpretamos estos resultados por la irregular distribución espacio temporal de la precipitación y por el carácter no lineal del proceso precipitación-escorrentía.

ABSTRACT

Synthetic hydrograph methods of Snyder, Williams and Hann, Rodriguez-Iturbe and Valdés, and Soil Conservation Service were applied to eight catchments in Antioquia Colombia. Those basins have adequate rainfall and runoff records and therefore one can compare the errors of model's results. Next an optimization was run on each model parameters in order to minimize the mean quadratic error. Despite of the substantial reduction in the errors, they remain high. We interpret these results as a consequence of the very irregular space-time distribution of rainfall that it is not adequately represented by the rain gages, and of the nonlinearity of the rainfall-runoff transformation not captured by the linear hydrograph methods.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de obras de protección de personas, infraestructura y bienes materiales contra crecientes sin información hidrológica es una tarea muy común para los ingenieros en muchas zonas de nuestro país. El ingeniero recurre a herramientas de fácil aplicación como los modelos sintéticos de hidrogramas unitarios, muy utilizados desde su aparición. El problema para la aplicación de estos modelos es que se basan en hipótesis muy fuertes, algunas en contra de lo observado en la naturaleza. Además, han sido desarrollados la mayoría

de una forma empírica, basados en información de cuencas de otras zonas del mundo de latitudes distintas a las nuestras, con clima y condiciones climáticas y geomorfológicas muy diferentes a las nuestras.

Como antecedentes para este trabajo, se cuenta con varios estudios realizados tratando de encontrar la aplicabilidad de los modelos de hidrogramas unitarios sintéticos a nuestro país. En el trabajo de Smith 1997, se puede encontrar una muy buena recopilación y un análisis completo de los resultados, la conclusión es que los métodos no son muy alentadores a la hora de estimar con cierto grado de confianza los efectos producidos en

una cuenca debido a una precipitación conocida. Teniendo esto en cuenta, en varios trabajos se recalca la importancia de adelantar un esfuerzo para tratar de ajustar algunos modelos sintéticos a nuestras condiciones.

En este estudio se busca calibrar y conocer si realmente se pueden ajustar a nuestras condiciones cuatro de estos modelos de hidrogramas unitarios sintéticos, estos son los desarrollados por Snyder, Williams y Hann, el SCS (Soil Conservation Service), y por Rodriguez-ITurbe y Valdés, conocido este último como el modelo Geomorfológico (Botero,1999). Con este fin se utilizó información de ocho cuencas ubicadas en el departamento de Antioquia, de las cuales se dispone de observaciones de calidad aceptable, información recopilada en un trabajo previo realizado por Ochoa Y

Toro, en 1991, en el cual se aplican estos modelos sintéticos a dichas cuencas y se concluye que estos métodos son poco confiables.(Ochoa y Toro,1991).

2. INFORMACIÓN UTILIZADA

La información utilizada la constituyen los registros simultáneos de precipitación y caudal para 120 eventos ocurridos en ocho cuencas del departamento de Antioquia obtenidos del trabajo realizado por Ochoa y Toro (1991) que se consideró como el trabajo de referencia. En las tablas 1 y 2 se presenta la información sobre las estaciones limnigráficas y pluviográficas escogidas, así como el número de eventos y las características geomorfológicas de cada una de las cuencas.

Tabla 1. Información sobre las cuencas escogidas y el número de eventos

Corriente	Estaciones Limnigráficas	Código	Estaciones Pluviográficas Asociadas	Código	Número de Eventos
Buey	BP1 La mayoría	2618701	Mesopotamia	2618008	18
			El Buey	2618009	
Guadalupe	G8.Palmichal	2701713	El Haitón	2701070	18
			Rionegrito	2701058	
			Montañitas	2702029	
Riachón	PP5.Los Suribios	2701753	Boquerón-Amalfi	2701099	10
			Amalfi	2701525	
			El silencio	2701102	
			Cajamarca	2701100	
Caracolí	PP6.Caracolí	2701762	Cajamarca	2701100	12
Sta.Barbara	PP9.Salazar	2701774	El silencio	2701102	14
			Salazar	2701069	
Chico	RG5.Riochico	2701725	Trinidad	2701071	18
			Medina	2701073	
			San Andrés	2701053	
			Bocacero	2701042	
			San Pedro	2701522	
Riogrande	RG7.Riogrande	2701706	El Gomez	2701072	14
			Aragón	2701055	
			El Botón	2701051	
			San Bernardo	2701094	
			Trinidad	2701071	
Concepción	TC4.Concepción	2702703	El tabor	2702009	16
			Miraflores	2702014	

Tabla 2. Información sobre los parámetros geomorfológicos utilizados por los cuatro modelos

Cuenca	Área (km ²)	Longitud del canal principal (km)	Desnivel (m)	S L P (ft/m)	Pendiente de la cuenca (%)	Longitud al centroide	Ancho (km)
BPI	143	28	580	109,37	17,7	14,4	5,11
G8	276	35,5	850	126,42	9,64	16,38	7,77
PP5	98,7	25,35	530	110,39	29,59	7,6	3,89
PP6	23,2	10,23	330	170,32	25,91	4,85	2,27
PP9	33,1	8,03	360	236,71	34,96	3,28	4,12
RG5	341	43,75	930	112,24	17,9	15,88	7,79
RG7	330,3	33	310	49,6	16,2	15,59	10,01
TC4	126	31,63	940	156,91	28,8	18,13	3,98
Cuenca	Orden	RB	RI	RA	Lomega	CN (promedio)	
BPI	6	3,87	2,05	4,15	14,5	86	
G8	6	3,56	1,96	3,74	17,7	89	
PP5	6	3,87	1,89	4,22	12,2	87	
PP6	5	3,47	1,85	3,87	4,9	84	
PP9	5	3,8	1,63	4,41	3,3	76	
RG5	7	3,7	1,79	3,85	19,6	91	
RG7	7	3,55	1,64	3,9	13,1	96	
TC4	6	4,1	2,27	4,46	17,9	82	

RB: Relación de bifurcación de Horton

Lomega: Longitud de corriente de orden mayor

CN: Número de Curva

RA: Relación de áreas de Horton

RI: Relación de longitudes de Horton

3. METODOLOGIA

Para cada modelo se determinaron cuales eran los parámetros principales, y luego teniendo como función objetivo el error medio cuadrático entre los caudales pico y tiempo al pico de los hidrogramas calculados con cada modelo para cada evento y los observados, se utilizó el método de optimización de Powell para encontrar el valor de dichos parámetros que hiciera mínimo este error. Esta etapa se denominó ajuste de parámetros del modelo. Luego con dichos parámetros ajustados se realizó una regresión para cada modelo, que relacionara estos parámetros (variables a predecir) y los parámetros geomorfológicos de las cuencas, esta etapa se denominó calibración de los modelos.

Ajuste de parámetros de los modelos

Se obtuvo el hidrograma unitario sintético por cada método para cada una de las cuencas, luego al realizar la convolución con cada una de las lluvias seleccionadas se obtuvo el hidrograma de escorrentía directa correspondiente a dicho evento y de allí se obtuvo el caudal pico y tiempo al pico calculados. Luego para cada evento se obtuvo el hidrograma de escorrentía directa observado.

Parámetros a ajustar para cada modelo

Se escogieron en cada modelo aquellos parámetros principales, de los cuales dependían todos los otros parámetros calculados (ver tabla 3.). Estos parámetros

corresponden a cada uno de los modelos tal como se encuentran en Botero 1999; Rodriguez_Iturbe y Valdés 1982; Soil Conservation Service 1972 ; Singh 1987.

Tabla 3 Parámetros a ajustar en cada modelo

Modelo	Parámetros
Snyder	qp y tp
SCS	L
Williams y Hann	k y tp
Geomorfológico	qp y tp

Errores a minimizar o función objetivo

La función inicial escogida para minimizar, fue aquella que relacionaba con pesos iguales, la suma de los errores cuadráticos medios para el caudal y el tiempo al pico por cada cuenca., denominada Error Cuadrático Medio Total. ECMT.

$$ECMT = \frac{ECMQP + ECMTP}{2}$$

Donde:

$ECMQP$ = Error cuadrático medio del caudal pico para una cuenca

$ECMTP$ = Error de cuadrático medio del tiempo pico para una cuenca

4. RESULTADOS

Después de obtener los hidrogramas de escorrentía directa a partir de los modelos originales, se realizó el ajuste de los parámetros. Este proceso como se mencionó anteriormente se desarrolló por el método de optimización de Powell (Press et al., 1992) con variaciones en la función objetivo respecto al peso del caudal y del tiempo al pico. Además se trabajó por un método extensivo, examinando dicha función, para un intervalo de 25 datos, donde se incluyeran los valores de los parámetros, obtenidos por el método de Powell con la variación en la función objetivo que presentara el menor error, y así asegurar que los resultados no corresponden a mínimos locales. La función objetivo para el modelo Geomorfológico aplicado a las cuencas PP6 y TC4 presentó

dos mínimos, y cada uno de los dos métodos utilizados para el ajuste de los parámetros identificó uno, lógicamente se escogieron los parámetros asociados al menor error (Botero, 1999). Luego de intentar muchas combinaciones de pesos en la función objetivo, para cada modelo se escogieron finalmente los parámetros que mejor ajuste presentaran (ver tabla 4).

Los parámetros ajustados para el modelo de Snyder se obtuvieron a partir de la extensión y con un peso de 0,7 para el error al estimar el caudal. Para los modelos del SCS y Geomorfológico, los parámetros escogidos son los ajustados por el método de Powell, para una función objetivo con igual peso en el error del caudal y el tiempo al pico. En el modelo de Williams y Hann los parámetros se dan por este mismo método y la función objetivo tuvo un peso de 0,7 en el error para el tiempo al pico (Botero, 1999).

Tabla 4. Valores para los parámetros ajustados

Snyder	qPa	TP	ECMT *	ECMT	Geomorfológico	Qp	Tp	ECMT *	ECMT
BP1	252,40	2,08	0,59	0,03	BP1	0,32	2,88	1,06	0,04
G8	226,60	1,16	1,46	0,08	G8	0,39	0,24	2,32	0,10
PP5	130,80	3,08	0,54	0,08	PP5	0,20	5,85	0,48	0,07
PP6	191,60	1,00	0,24	0,07	PP6	0,31	0,10	0,92	0,06
PP9	255,00	1,32	0,19	0,04	PP9	0,42	0,39	0,60	0,03
RG5	156,00	1,84	0,19	0,10	RG5	0,29	0,34	2,96	0,09
RG7	112,80	2,75	0,10	0,06	RG7	0,15	3,35	0,30	0,06
TC4	232,00	3,13	0,12	0,14	TC4	0,38	1,29	9,19	0,11
Williams y Hann	K	Tp	ECMT *	ECMT	S.C.S.	TlaG	ECMT *	ECMT	
BP1	1,47	2,23	9,71	0,03	BP1	2,19	20,4785	0,03	
G8	1,44	0,40	24,11	0,09	G8	1,62	24,2835	0,09	
PP5	2,46	3,52	0,13	0,08	PP5	3,81	0,13883	0,07	
PP6	1,89	0,00	1,26	0,06	PP6	1,62	3,27358	0,15	
PP9	1,10	0,68	2,49	0,05	PP9	1,46	4,09273	0,06	
RG5	2,35	0,57	0,20	0,15	RG5	2,31	1,112	0,09	
RG7	3,27	3,86	0,99	0,06	RG7	4,51	1,30956	0,07	
TC4	1,30	1,55	0,24	0,11	TC4	1,75	0,4883915	0,12	

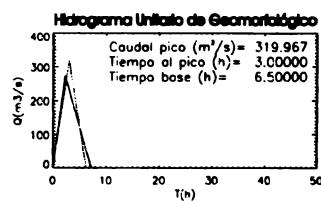
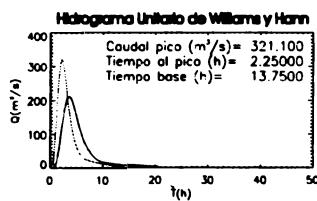
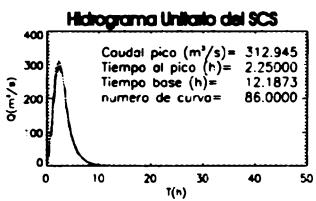
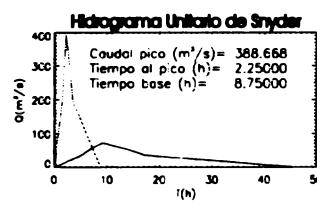
Con los valores encontrados para estos parámetros se calcularon los hidrogramas unitarios para cada cuenca (ver figura 1). De estos hidrogramas unitarios ajustados se puede observar que para los cuatro modelos en todas las cuencas las diferencias en el caudal pico disminuyó, en casos como el de la cuenca RG7, donde dicha diferencia entre dos modelos era de $600 \text{ m}^3/\text{s}$, prácticamente desapareció.

Con los hidrogramas unitarios ajustados se calcularon los hidrogramas de escorrentía directa para cada evento en cada una de las cuencas, en la figura 2 se presentan los más representativos del resultado general para todas

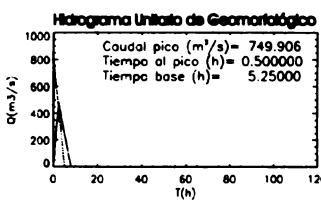
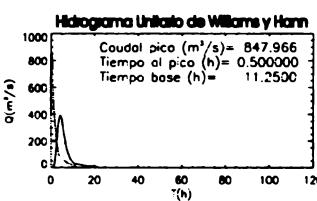
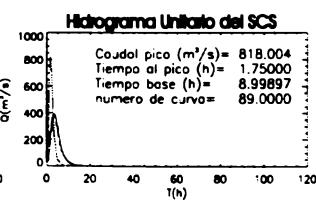
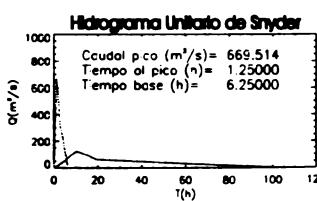
las cuencas. De la figura 2 se observa que el ajuste no es satisfactorio a pesar de la mejora con respecto a los modelos originales. En la mayoría de los casos el caudal pico y su tiempo de ocurrencia se alejan de lo observado, sobre todo la forma del hidrograma real pocas veces es representada satisfactoriamente (Botero 1999).

Se tiene también que para la mayoría de los eventos el hidrograma observado se ubica más a la izquierda que para los hidrogramas calculados por los modelos, esto significa que el tiempo al pico calculado para un gran porcentaje de eventos es mayor que el tiempo al pico observado.

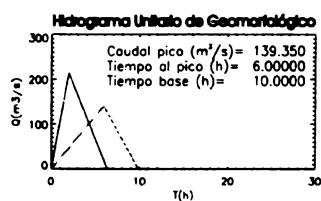
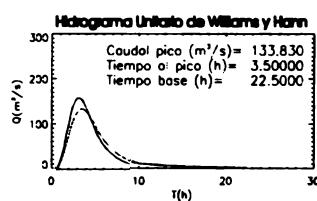
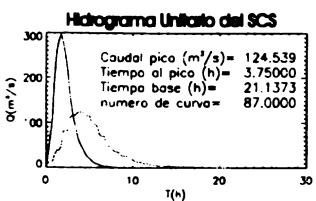
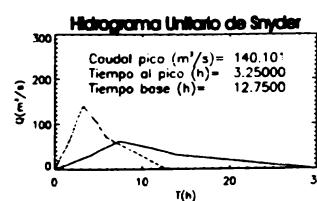
Bp1



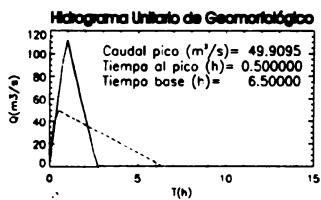
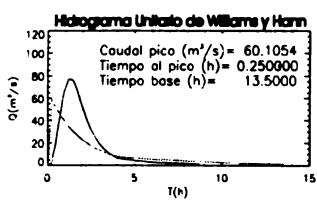
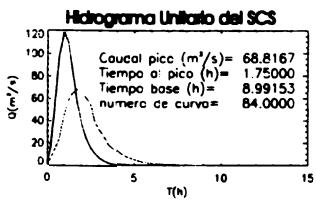
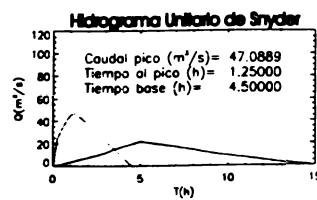
G8



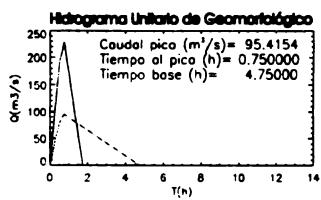
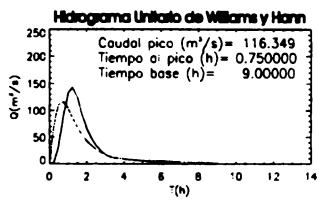
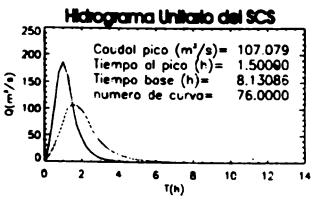
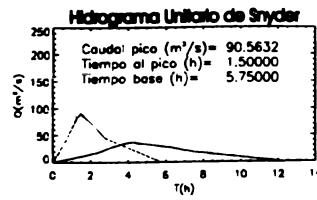
Pp5



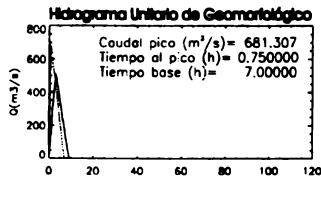
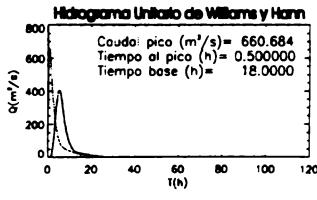
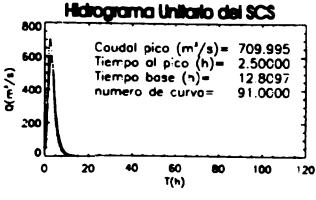
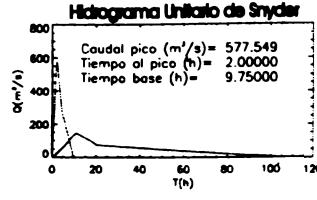
Pp6



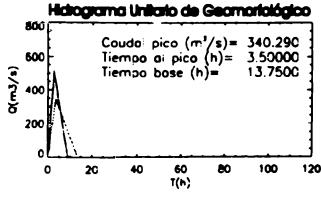
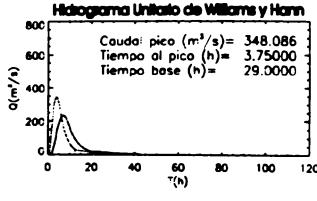
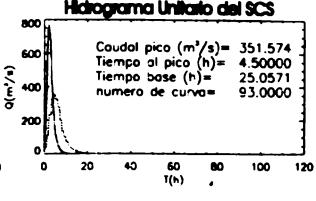
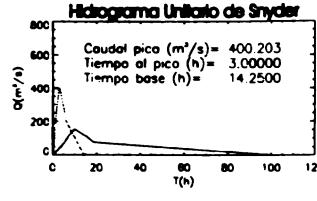
Pp9



Rg5



Rg7



Tc4

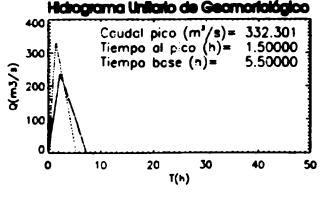
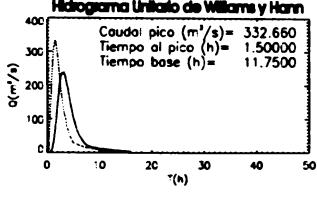
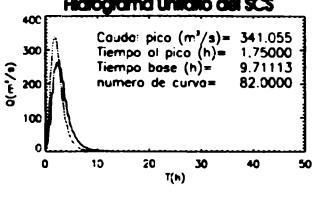
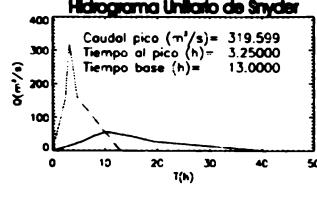


FIGURA 1. Hidrogramas unitarios para todas las cuencas, por cada uno de los modelos. En azul el ajustado, y en negro el original. Los valores especificados corresponden a los calculados con los parámetros ajustados.

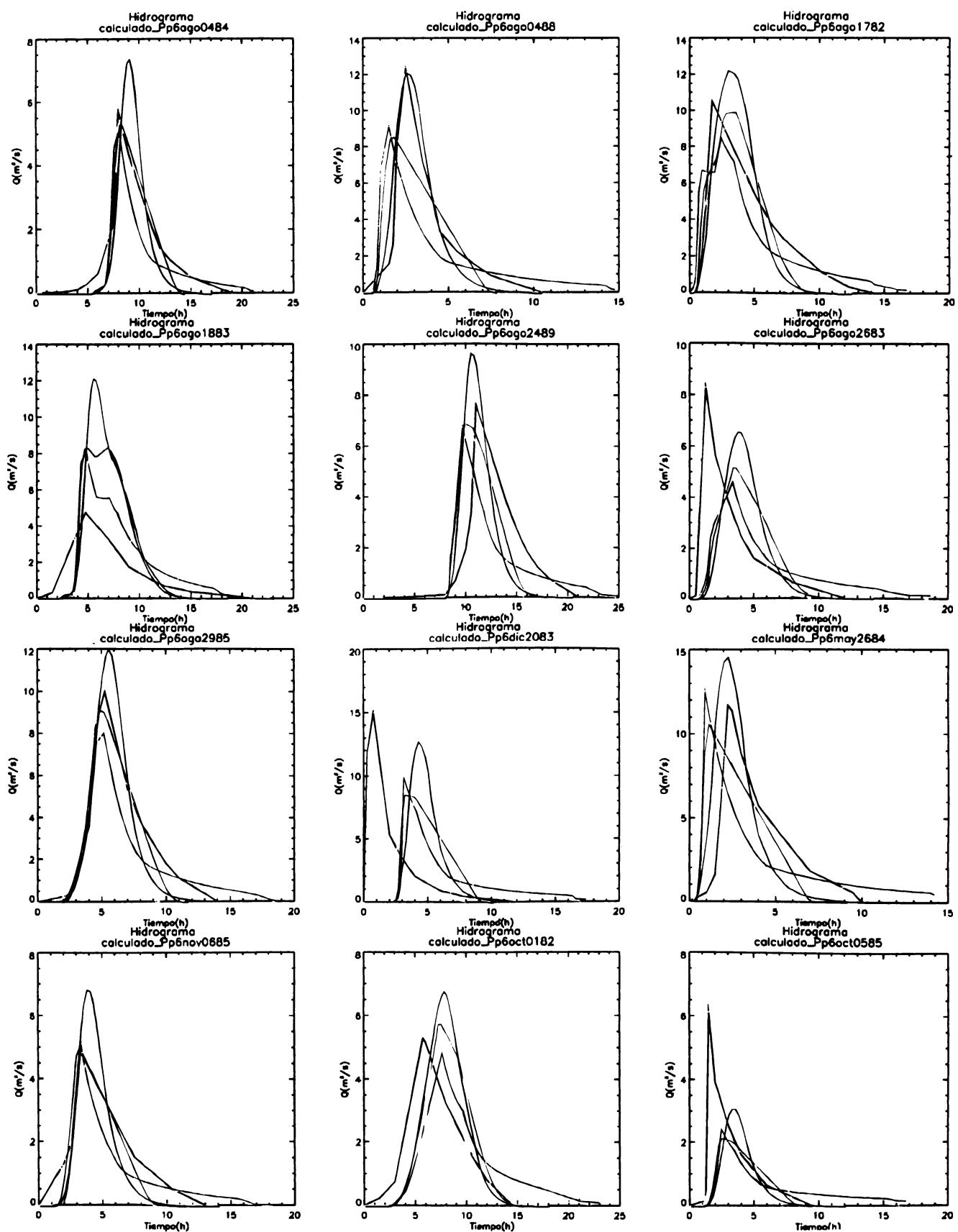


FIGURA 2. Hidrogramas de escorrentía directa calculados con los modelos ajustados, para las cuencas Pp6 y Rg5

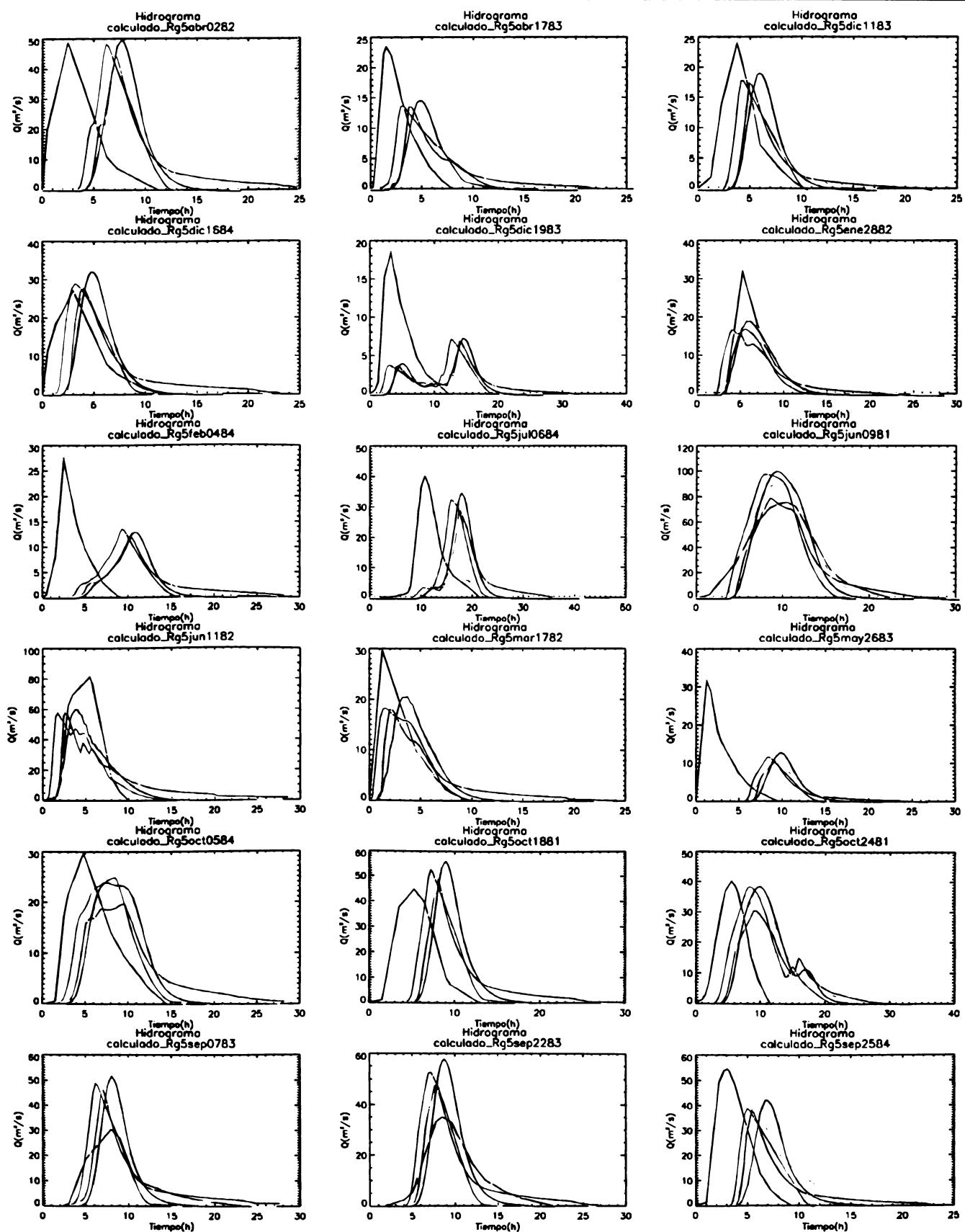


FIGURA 2. Hidrogramas de escorrentía directa calculados con los modelos ajustados, para las cuencas Pp6 y Rg5

Para algunos eventos los hidrogramas calculados por los cuatro modelos muestran una diferencia muy grande con el hidrograma observado, especialmente en el caudal pico, y se ve claramente que el área bajo el hidrograma de escorrentía directa calculado es mucho menor al del hidrograma observado, esta diferencia entre áreas es evidencia de una mala estimación del exceso de lluvia por infiltración. Obviamente la lluvia efectiva calculada según el volumen del hidrograma observado es mayor.

Para otros eventos se presentan hidrogramas de dos picos, éstos corresponden a lluvias de dos picos y muestran la incapacidad de los modelos ajustados para representar bien el filtro que es la cuenca.

Según los resultados globales (ver tabla 5) el modelo que menor error cuadrático medio presenta al estimar tanto valores de caudal pico y tiempo al pico es el Geomorfológico. Sin embargo todos los modelos presentan valores similares para este error y la diferencia entre un modelo y otro no es significativa, esta semejanza indica que a la hora de estimar caudal y tiempo al pico los cuatro modelos se comportan prácticamente igual, presentando mayor variación en la estimación del tiempo al pico.

TABLA 5. Errores totales en la estimación del caudal y tiempo al pico

Modelo	ECMQP*	ECMTP*	ECMQP	ECMTP
Snyder	0,401	0,456	0,122	0,028
Geomorfológico	0,406	4,049	0,124	0,020
Williams y Hann	0,391	9,389	0,124	0,033
S.C.S	0,453	13,341	0,148	0,019

*Error Calculado con los valores arrojados por el modelo original.

Cuando se comparan los caudales calculados por los modelos ajustados con los ocurridos realmente (figura 3) se puede observar que para el modelo original de Snyder, siempre se subestiman los caudales y tiene una gran dispersión, el ajuste logra disminuir esta dispersión pero ocasiona que algunos caudales se sobreestimen también. Esto aunque disminuye el error ocasiona el aumento en la incertidumbre al modelar con este método, ya que no se tendrá seguridad si se está fallando por encima o por debajo de lo esperado. En general para todos los modelos se observa una disminución en la dispersión de los caudales calculados respecto a los observados, comparado con la dispersión en los modelos originales, sin embargo no se puede considerar que estos modelos permitan realizar un buen ajuste con ellos.

5. CONCLUSIONES

Todos los modelos presentaron para el ajuste resultados similares, el error de predicción para caudal y tiempo al pico entre modelos tiene diferencias entre el mayor y el menor que no superan el 10%. Para el error cuadrático medio ocurre algo similar.

El modelo de Snyder no es bueno para modelar hidrogramas de escorrentía directa en cuencas de áreas pequeñas (menores a 150 km²), ya que el tiempo base estimado siempre es demasiado grande. El modelo de Williams y Hann presenta una buena estimación para los tiempos al pico especialmente en cuencas pequeñas, y el modelo del S.C.S para cuencas grandes.

Comparando con los modelos originales, el error obtenido al calcular los hidrogramas de escorrentía directa con los parámetros ajustados, disminuyó notablemente, como era de esperarse, sin embargo aún es muy alto, lo que indica que así se obligue a estos modelos a predecir caudales y tiempo al pico con el mínimo error no, son satisfactorios para una gama de diversos eventos, con una duración de la lluvia diferente. Esto se da principalmente por dos razones: la primera corresponde a que la distribución de la lluvia es en realidad muy diferente a lo que plantea la hipótesis del hidrograma unitario, la variación en la intensidad y su distribución espacial son totalmente variables, y la segunda es que se pretende modelar linealmente un proceso que ocurre en un sistema con respuestas altamente no lineales y aunque las aproximaciones sencillas son la mejor manera de enfrentar problemas complejos, en algunos casos estas aproximaciones aumentan los errores y la incertidumbre.

Con el trabajo realizado, el cual enmarca el presente sintéticos, para el diseño hidrológico la principal recomendación es utilizarlo con mucha precaución considerando los errores de predicción reportados en este estudio y su tendencia con los parámetros de la cuenca, sin embargo es mejor considerar que estos métodos son muy limitados a la hora de modelar eventos de duraciones e intensidades diferentes y que aunque las aproximaciones lineales se han considerado como satisfactorias es hora de ir cerrando el capítulo del hidrograma unitario agragedo e investigar otras posibilidades que ya están planteadas desde hace mucho tiempo y que no son tan difíciles de poner en práctica, como modelos no lineales, de tanques y que consideren el transito de la escorrentía sobre la cuenca y los canales como un proceso dinámico.

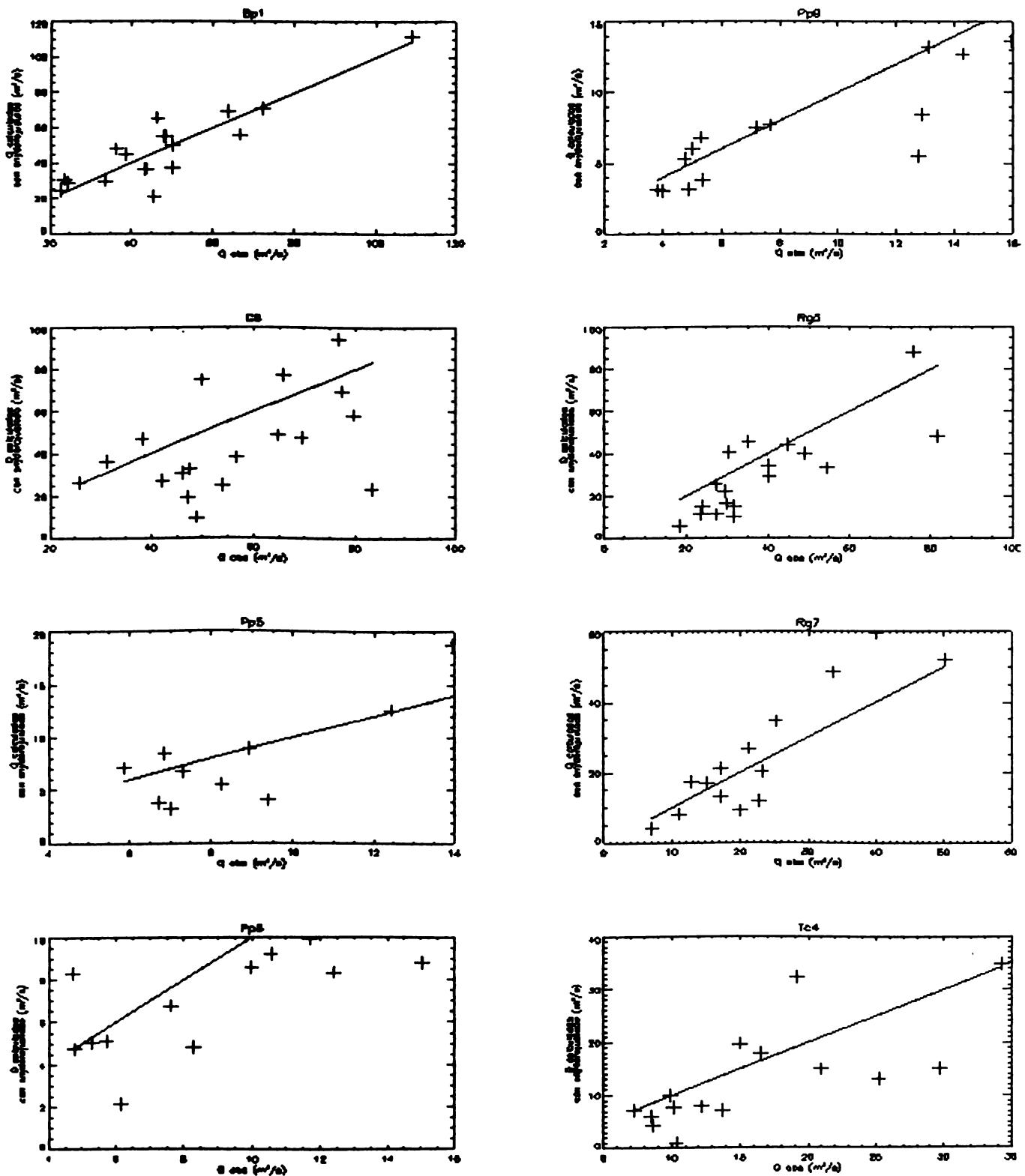


FIGURA 3. Caudal observado vs caudal calculado con el modelo de Snyder y el Geomorfológico (ajustados a la Izquierda, sin ajustar a la derecha.), para algunas cuencas seleccionadas del estudio.

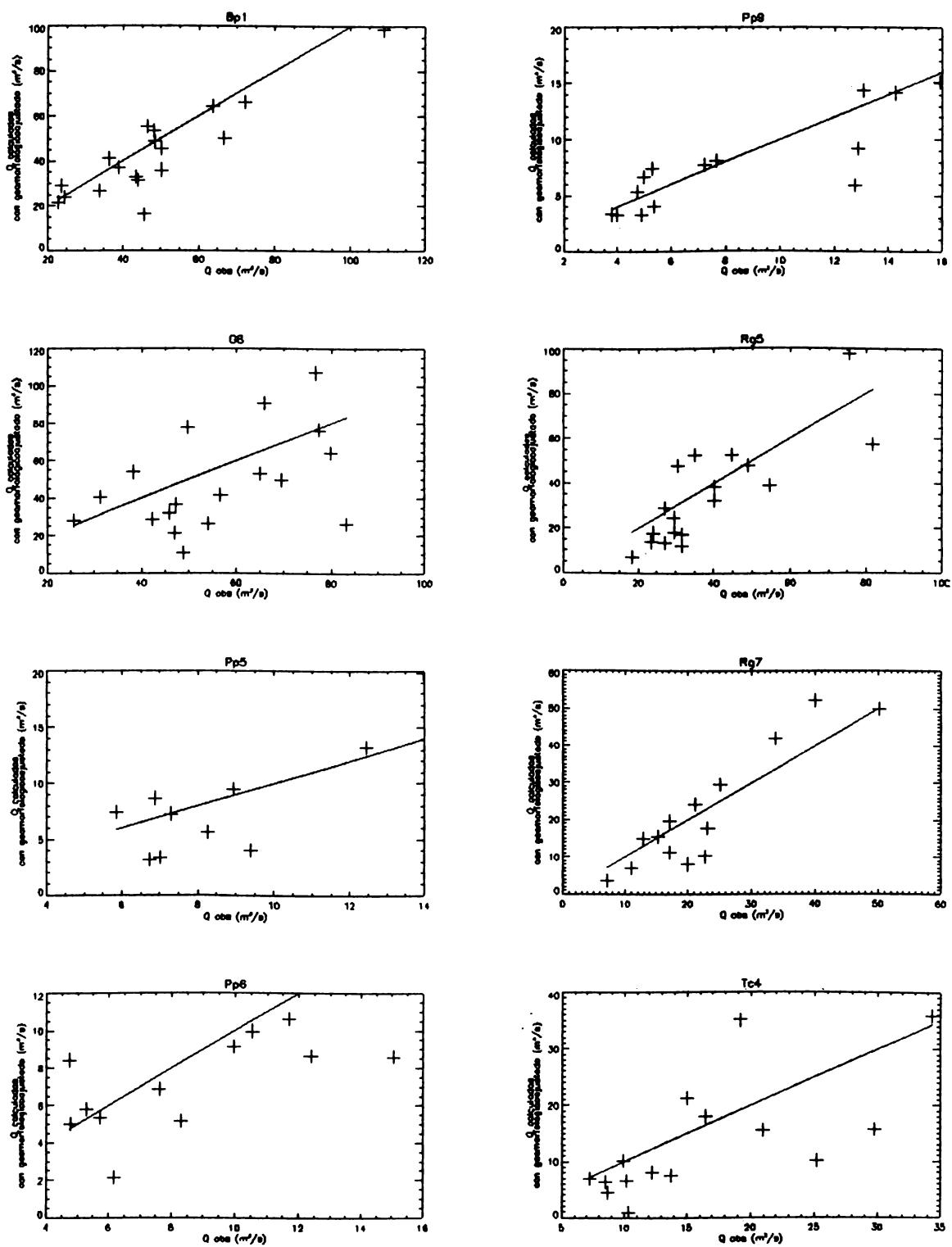


Figura 3. Caudal observado vs caudal calculado con el modelo de Snyder y el Geomorfológico (ajustados a la Izquierda, sin ajustar a la derecha.), para algunas cuencas seleccionadas del estudio.

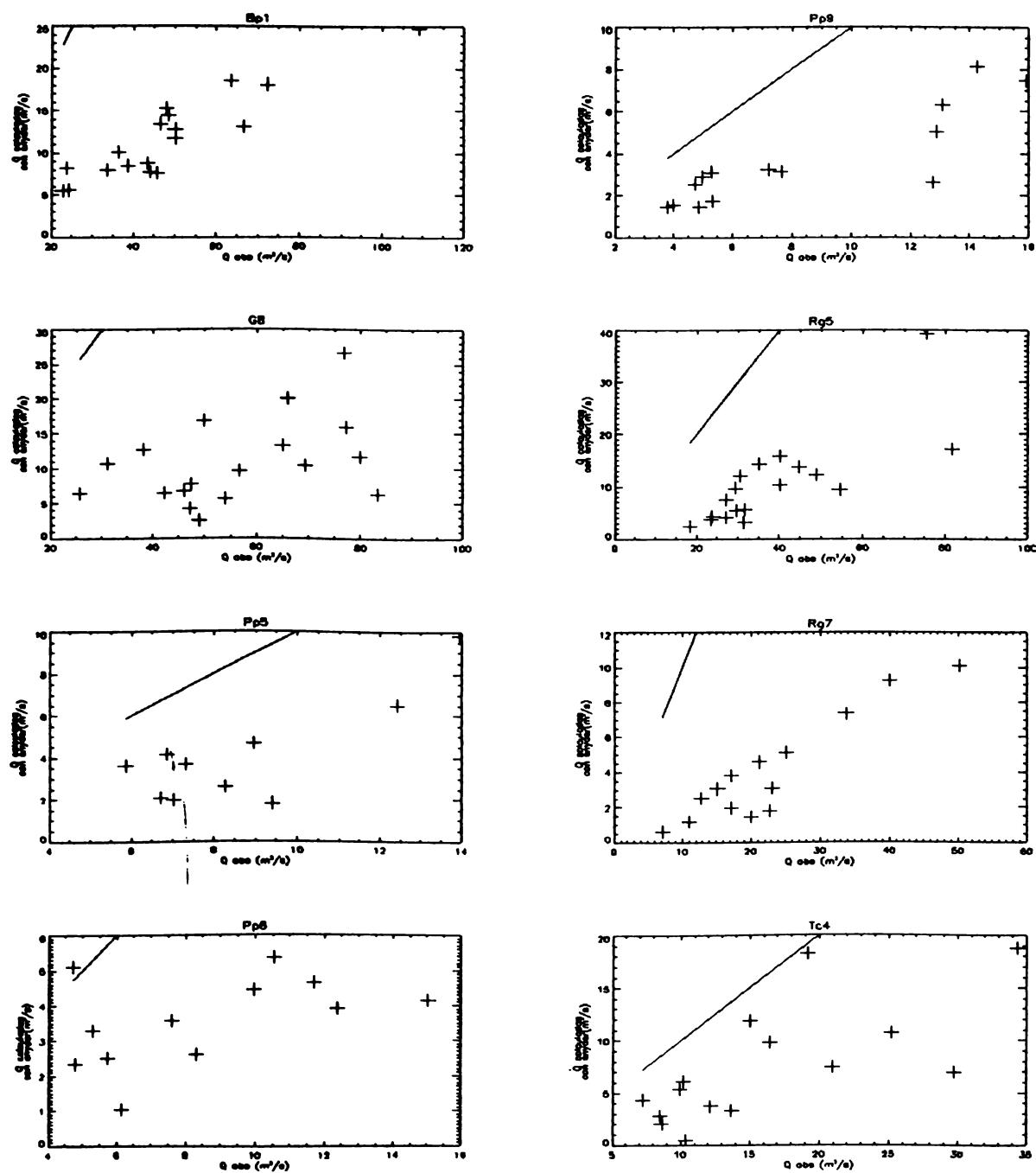


Figura 3. Caudal observado vs caudal calculado con el modelo de Snyder y el Geomorfológico (ajustados a la Izquierda, sin ajustar a la derecha.), para algunas cuencas seleccionadas del estudio.

6. REFERENCIAS

- Botero B. A.,** 1999. Acerca de lo inadecuado del Hidrograma Unitario Sintético. Trabajo dirigido de grado, Ingeniería Civil., Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín.
- Ochoa J.C. y Toro J.C.,** 1991. Acerca de la aplicabilidad de algunas hidrógrafas unitarias sintéticas. Trabajo dirigido de grado, Ingeniería Civil., Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín.
- Press, W. H. et al.,** 1992. Numerical Recipes in Fortran: "The art of scientific computing." Segunda edición. Cambridge.
- Rodriguez_Iturbe, I. y J. B. Valdés.,** 1982. La respuesta hidrológica de una cuenca: su relación con la estructura de drenaje. Seminario sobre hidrología con énfasis en el problema de la información escasa, Medellín, Colombia 23 al 26 de Marzo.
- Singh V.P.,** 1987. Hidriologic Systems Rainfall-Runoff modeling. Volume 1. De. Prentice Hall. United States of America.
- Smith R.A.,** 1997. Modelos Lineales del sistema cuenca: El hidrograma unitario. Trabajo presentado como requisito de promoción a profesor Titular. Posgrado en Aprovechamiento de los recursos hidráulicos, departamento de ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia , Facultad de Minas. Medellín.
- Soil Conservation Service Hydrology.,** 1972. SCS National Engineering Handbokk, secc 4. U.S.Departament of agriculture, Washintong, D.C.