

EFEECTO DEL ESTADO DE DEGRADACIÓN EN LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE DOS UNIDADES DE ESCURRIMIENTO EN LA CUENCA DEL RÍO LA SIERRA, MÉXICO

Cesar Augusto Granada Isaza, M.C.

Eusebio Ventura Ramos, Dr

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, México

Jurgen Baumann, Dr.

Comisión Nacional del Agua, México

Jose Luis Oropeza Mota, Dr.

Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Posgraduados, México

Nabil Mobayed Khodr, Dr.

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, México

Abstract

The hydrological response of a basin, watershed or runoff unit, is one of the main indicators of the balance between natural resources and their exploitation; an inadequate balance reduces the quantity and quality of natural resources. In this regard, it has been recognized the role of vegetation covered in the preservation of water resources and the transfer mechanisms between soil and vegetation. Usually, degradation starts as a result of human activities that disturb, destroy or decrease vegetation cover, subsequently leading soil degradation by the effect of different erosion agents. The aim of this study was to contribute to a better understanding of the interaction of precipitation, vegetation, soil and runoff in runoff units from a tropical basin in southern Mexico, hence, highlight the importance of vegetation as regulatory element in hydrological processes. According to the results, the hydrological response in tropical basins depends largely on factors such as the degradation state of the vegetation cover as well as variables related to the maximum and average intensity of precipitation. Even though, one should investigate further rainfall-runoff relationship in tropical areas; the results of this study allowed preliminary definition of variables such as peak flow, peak intensity, average intensity and total precipitation, should be considered for understanding rainfall-runoff relationship in different vegetation conditions, and their potential use in implementing best practices for water management and soil conservation.

Keywords: Hydrological response, Vegetal cover, Runoff units

Resumen

La respuesta hidrológica de una cuenca, microcuenca o unidad de escurrimiento, es uno de los principales indicadores del balance que existe entre los recursos naturales y su aprovechamiento, ya que cuando mayor e inadecuado es el aprovechamiento la disponibilidad de los recursos naturales disminuye en cantidad y en calidad. En este sentido, se ha reconocido el papel de la cubierta vegetal en la preservación de los recursos hídricos y los mecanismos de transferencia entre el suelo y la vegetación. Usualmente, la degradación inicia como el resultado de actividades humanas que disturbán, destruyen o disminuyen la cobertura vegetal, llevando posteriormente a la degradación de suelos, por efecto de los diferentes agentes erosivos. El objetivo del presente trabajo fue contribuir a un mejor entendimiento de la interacción de la precipitación, la vegetación, el suelo y el escurrimiento, en unidades de escurrimiento de una cuenca tropical del sur de México, y con ello resaltar la importancia de la vegetación como elemento regulador de procesos hidrológicos de superficie. De acuerdo a los resultados obtenidos, la respuesta hidrológica en cuencas de zonas tropicales depende en gran medida, entre otros factores, del estado de degradación de la cobertura vegetal y de variables relacionadas con la intensidad máxima y media de la precipitación. Aunque se debe investigar más a fondo la relación lluvia-escurrimiento en zonas tropicales, los resultados de este estudio permitieron definir, preliminarmente, que variables como el gasto pico, la intensidad máxima, la intensidad media, y la precipitación total, deben de ser consideradas para el entendimiento de la relación lluvia-escurrimiento en diferentes condiciones de cobertura vegetal, y su uso potencial en la implementación de las mejores prácticas para el manejo del agua y la preservación del suelo.

Palabras clave: Respuesta hidrológica, Cobertura vegetal, Unidades de escurrimiento

Introducción

El deterioro y degradación del ambiente, por el uso inadecuado de los recursos naturales, han ocasionado serios impactos sobre el bienestar de las personas y sobre el desarrollo sustentable en general, lo que ha preocupado a diversos sectores. El concepto de “sustentabilidad” implica que el uso de los recursos naturales a corto plazo debe ser sustituido por uno de largo plazo, para hacerlos disponibles a las necesidades de generaciones futuras. Una de las bases que sustentan el desarrollo es el hecho de que del buen manejo y

uso del suelo, agua, flora y fauna depende la calidad ambiental y el bienestar de la sociedad en general.

En este contexto, el manejo de cuencas juega un papel muy importante. La respuesta hidrológica de estas superficies de aportación, en sus diferentes dimensiones, es uno de los principales indicadores del balance que existe entre los recursos naturales y su aprovechamiento, ya que mientras más inadecuado es el aprovechamiento, la disponibilidad de los recursos naturales disminuye en cantidad y en calidad. Desde este punto de vista, un inadecuado manejo de los recursos naturales en una cuenca da como resultado un desbalance entre la respuesta de los componentes del balance hídrico, aumentando considerablemente las velocidades y volúmenes del escurrimiento y las tasas de desprendimiento y transporte de sedimentos, y disminuyendo los procesos de infiltración y retención de agua (Marks *et al.*, 1993).

En este sentido, se ha reconocido el papel de la cubierta vegetal en la preservación de los recursos hídricos y los mecanismos de transferencia entre el suelo y la vegetación (Tromble, 1988; Belmonte-Serrato y Romero-Díaz, 1993). Por lo tanto, la destrucción de la vegetación incrementa los efectos negativos de los procesos hidrológicos de superficie y de igual forma rompe el equilibrio de los ecosistemas (Wallis y James, 1972, Jane y Green, 1983; Wei *et al.*, 2007).

Usualmente, la degradación inicia como el resultado de actividades humanas que disturban, destruyen o disminuyen la cobertura vegetal, llevando posteriormente a la degradación de suelos, por efecto de los diferentes agentes erosivos (Granada-Isaza *et al.*, 2012). Por lo tanto, la degradación acelerada y sus consecuencias son el producto de un inadecuado uso de los recursos naturales, un desconocimiento de la capacidad de carga de los ecosistemas y de la ocurrencia de eventos climatológicos extremos (Toy *et al.*, 2002).

En específico, los problemas recientes de inundaciones y altas tasas de producción de sedimentos, al extremo de presentarse movimientos en masa, en los Estados de Chiapas y Tabasco, México, han sido una preocupación de la sociedad en general y de los gobiernos locales y federales. Sin embargo, la implementación de medidas de prevención y mitigación sólo pueden realizarse de manera adecuada mediante el conocimiento de las condiciones biofísicas y su respuesta bajo diferentes escenarios, el uso de modelos calibrados y validados y la instrumentación de sitios de monitoreo.

El objetivo del presente trabajo fue contribuir a un mejor entendimiento de la interacción de la precipitación, la vegetación, el suelo y el escurrimiento, en unidades de escurrimiento de una cuenca tropical del sur

de México, y con ello resaltar la importancia de la vegetación como elemento regulador de procesos hidrológicos de superficie.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

La Cuenca del Río la Sierra se encuentra ubicada sobre el territorio de los Estados de Chiapas y Tabasco, México, en las coordenadas extremas UTM zona 15N 1,990,868 N, 1,853,895 S, 502,977 O, 585,674 E (Figura 1.). La cuenca se encuentra mayoritariamente en el Estado de Chiapas. Hidrológicamente, la cuenca del Río La Sierra se encuentra bajo la jurisdicción de la Región Hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH30) dentro de la Región Hidrológico-administrativa XI Frontera-Sur de la Comisión Nacional del Agua, México (CONAGUA).

El punto de salida de la cuenca se localiza en las coordenadas UTM zona 15N 509,147 E y 1,985,631 N, a una elevación de 7 msnm, lo cual genera un área de captación de 365,931 hectáreas. Nace en la Sierra Madre del estado de Chiapas, a 1,300 msnm y descarga en el Río Grijalva a 7 msnm en el Municipio de Centro, en la vecindad de la Ciudad de Villahermosa, estado de Tabasco. Tiene una longitud aproximada de 128 Km y transporta un caudal medio anual de 126 m³/s. Su comportamiento mensual se ve fuertemente influenciado por la temporada de lluvias, siendo julio, agosto y septiembre los meses con los caudales más elevados, y marzo, abril y mayo los meses con caudales más bajos. Su pendiente es de fuerte a moderada en la parte media y alta, y su caudal perenne y torrencial, factores que acompañados de sus meandros, provoca grandes desprendimientos de tierra a su paso, favoreciendo socavación de taludes, erosión e inundaciones en las zonas más bajas.

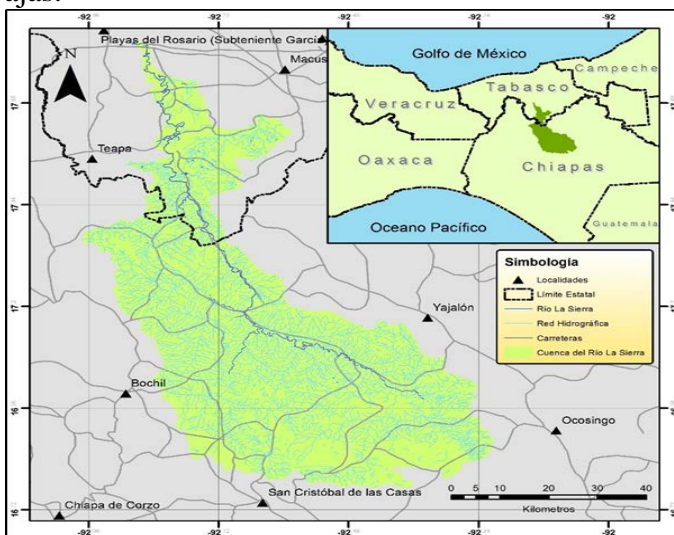


Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Río La Sierra.

La cuenca del Río La Sierra está conformada por 29 subcuencas con superficies entre 1,968 y 23,074 hectáreas. Así mismo, las subcuencas se dividen en un total de 185 microcuencas, unidades básicas para la planeación y el manejo de los recursos naturales, con superficies entre 633 y 6,001 hectáreas

Las unidades de escurrimiento monitoreadas se ubican dentro de la microcuenca Cerro Blanco, la cual se ubica en la parte baja de la cuenca media del Río La Sierra, entre los estados de Tabasco y Chiapas, específicamente en los municipios de Tacotalpa, Tabasco y Amatlán, Chiapas. Cuenta con un área aproximada de 1,620 ha, de las cuales el 57% se pertenecen a Amatlán y el 43% a Tacotalpa (Figura 2).

La topografía de la microcuenca Cerro Blanco, de acuerdo al modelo digital de elevaciones (MDE), es montañosa en su parte alta y parte media alta, y menos pronunciada hacia la parte media baja con la combinación de laderas y planicies de inundación a los márgenes. Las elevaciones van desde los 60 hasta los 1,162 msnm, teniendo 435 msnm como valor medio. Con una pendiente media de alrededor del 30%, la topografía accidentada ha limitado el desarrollo de algunas zonas de la microcuenca y sus actividades productivas. De igual manera, la topografía ha sido la promotora de procesos hidrológicos superficiales de carácter torrencial, que han afectado las partes bajas de la planicie.

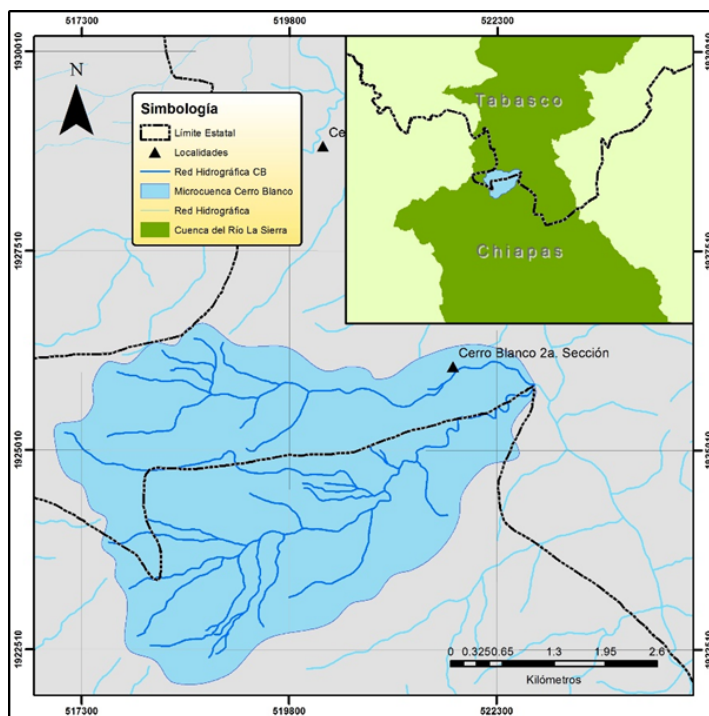


Figura 2. Delimitación de la microcuenca Cerro Blanco.

Las dos unidades de escurrimiento monitoreadas se ubican en la localidad de Linda Vista del municipio de Amatan Chiapas, a una elevación media de 409 msnm (Figura 3). La primera unidad se identificó como "Conservada" debido a su estado de conservación de la cobertura vegetal, donde el 92% corresponde a selva alta subperenifolia y 8% de pastizales inducidos. Esta unidad cuenta con un área de captación de 24,491 m², una elevación media de 426 msnm y su punto de salida se ubica en las coordenadas UTM zona 15N 520,221 E y 1,924,502 N. El tipo de suelo dominante es Rendzina de textura media, de acuerdo a la clasificación de la FAO-UNESCO (FAO-UNESCO, 1987).

La segunda unidad monitoreada se identificó como "Degradada" debido a su estado de degradación de la cobertura vegetal, donde solo el 52% corresponde a selva alta subperenifolia y 48% a pastizales inducidos. Esta unidad tiene un área de captación de 29,351 m², y cuenta con una elevación media de 436 msnm y su punto de salida se ubica en las coordenadas UTM zona 15N 520,243 E y 1,924,585 N. El suelo dominante es del tipo Rendzina de textura media de acuerdo a la clasificación de la FAO-UNESCO (FAO-UNESCO, 1987).



Figura 3. Fotografía de las dos unidades de escurrimiento. (a. Unidad de escurrimiento conservada, b. Unidad de escurrimiento degradada)

Instrumentación y Monitoreo

Para cada una de las dos unidades de escurrimiento se instalaron equipos de medición de precipitación y escurrimiento.

La precipitación se monitoreó por medio de un pluviómetro digital de balancín marca SPECTRUM® modelo 3554WD con registro de datos cada 10 minutos, almacenados de forma continua en un datalogger integrado al equipo (Figura 4).



Figura 4. Pluviómetro digital de balancín.

El escurrimiento se monitoreó mediante una estación de medición de flujo, la cual estaba conformada por un sensor de nivel ultrasónico marca Endress+Hauser® modelo FDU91 instalado en un canal tipo Parshall estándar de 0.6096 m. El sensor se encuentra conectado a un transmisor marca Endress+Hauser® modelo FMU90 donde la señal del sensor de nivel se convierte a flujo y posteriormente se almacena en un datalogger marca Endress+Hauser® modelo RDL10-S1C1C4. El sistema de medición de flujo está alimentado por un sistema de energía solar compuesto por dos paneles, dos baterías y un controlador de carga (Figura 5). Para las dos unidades de escurrimiento el sistema se configuro para tomar lecturas en un intervalo de 10 min.



Figura 5. Sistema completo de medición de flujo.

El periodo de monitoreo se llevó a cabo desde el 17 de septiembre del 2011 hasta el 30 de septiembre de 2012, obteniendo los registros de precipitación en mm y escurrimiento en l/s y para un año completo.

Análisis de la Información

De los registros de datos se identificaron y caracterizaron los eventos de precipitación, para obtener las intensidades máxima, mínima y media (mm/h); la lámina total (mm), la duración total (min) y el hietograma correspondiente. A partir de esta información se seleccionaron 24 eventos de precipitación del periodo monitoreado verificando tener dentro de los eventos seleccionados 8 eventos con intensidades máximas menores a 30 mm/h, 8 eventos con intensidades máximas entre 30 y 60 mm/h y 8 eventos con intensidades máximas por encima de 60 mm/h.

Para cada uno de los 24 eventos de precipitación seleccionados se analizaron los datos de escurrimiento de las dos unidades monitoreadas. La respuesta hidrológica de los eventos de precipitación se describió en función de la caracterización de cada hidrograma de salida. Para cada evento y cada unidad se construyo el hidrograma y se calculó la duración efectiva en minutos, siendo la duración efectiva la porción del hietograma que se transpone sobre el hidrograma; el gasto pico, el gasto de mayor magnitud en

los intervalos de tiempo del hidrograma en (mm/h); el tiempo al gasto pico, tiempo en el que ocurre el gasto pico, en minutos; y el tiempo total del hidrograma en minutos.

A partir de los programas computacionales SPSS®, STATGRAPHICS® y EXCEL®, se compararon estadísticamente los resultados de las dos unidades de escurrimiento, y se analizó el efecto del estado de la degradación de la cobertura vegetal en la regulación hidrológica. Los análisis estadísticos llevados a cabo incluyeron el cálculo de estadísticos de tendencia central, pruebas de comparación de medias, selección de variables y regresiones lineales para encontrar las ecuaciones que permitieran representar el escurrimiento en función de la precipitación.

Resultados

En la Tabla 1, se pueden observar las intensidades máxima, mínima y media (mm/h); la lámina total (mm), y la duración total (min) para cada evento de precipitación seleccionado.

Tabla 1. Eventos de precipitación seleccionados y sus características.

ID	Fecha	I _{MAX} (mm/h)	I _{MIN} (mm/h)	I _{MEDIA} (mm/h)	P _{TOTAL} (mm)	d _{TOTAL} (min)
1	18/09/2011	94.8	12.0	45.8	19.1	25
2	18/09/2011	15.6	3.6	8.3	7.3	45
3	20/09/2011	33.6	3.6	6.7	11.2	30
4	21/09/2011	27.6	6.0	11.7	20.4	105
5	21/09/2011	51.6	3.6	25.9	30.2	70
6	23/09/2011	39.6	6.0	16.3	39.4	145
7	24/09/2011	21.6	3.6	11.7	11.7	60
8	25/09/2011	12.0	3.6	5.0	10.0	120
9	29/09/2011	103.2	6.0	43.6	32.7	45
10	30/09/2011	76.8	12.0	50.7	29.6	35
11	01/10/2011	61.2	3.6	20.2	18.5	55
12	04/10/2011	45.6	3.6	9.7	15.3	95
13	04/10/2011	15.6	0.0	5.5	8.2	80
14	04/10/2011	39.6	0.0	13.9	58.9	255
15	05/10/2011	27.6	3.6	12.9	8.6	40
16	05/10/2011	15.6	0.0	4.7	15.9	205
17	06/10/2011	106.8	6.0	39.6	23.1	35
18	10/10/2011	67.2	0.0	22.9	43.9	115
19	11/10/2011	82.8	3.6	36.8	39.9	65
20	12/10/2011	6.0	0.0	2.9	12.2	250
21	13/10/2011	61.2	18.0	34.4	8.6	15
22	14/10/2011	158.4	24.0	79.2	39.6	30
23	15/10/2011	39.6	0.0	9.2	12.2	80
24	15/10/2011	30.0	12.0	17.9	14.9	50

I_{MAX}= Intensidad máxima; I_{MIN}= Intensidad mínima; I_{MEDIA}=
Intensidad media; P_{TOTAL}= Lámina total; d_{TOTAL}= duración total

La lámina de precipitación total varió de 7.3 mm hasta 58.9 mm, con un valor medio de 22.1 mm y una desviación estándar de 14.0. Por otro lado, las intensidades máximas variaron entre 6.0 mm/h y 158.4 mm/h, siendo 51.4 mm/h el valor medio y 37.2 la desviación estándar, lo que indica una variación significativa entre las intensidades máximas de los eventos. Las intensidades medias variaron entre 2.9 mm/h y 79.2 mm/h con un valor medio de 22.3 mm/h y una desviación estándar de 18.9. La característica con mayor variación entre los eventos seleccionados fue la duración total, la cual presentó valores desde los 15 min hasta 255 min, un valor medio de alrededor de 85 min y una desviación estándar de 67.

A partir del análisis de correlación, se identificaron las relaciones entre las variables estudiadas. En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis de correlación entre variables.

Tabla 2. Resultados del análisis de correlación de variables para las dos unidades de escurrimiento monitoreadas.

Unida de Escurrimento Degradada								
	I _{MAX}	I _{MIN}	I _{MEDIA}	P _{TOTAL}	D _{TOTAL}	Q _P	T _P	T _B
I _{MAX}	1.00							
I _{MIN}	0.65	1.00						
I _{MEDIA}	0.95	0.78	1.00					
P _{TOTAL}	0.50	0.07	0.45	1.00				
D _{TOTAL}	-0.47	-0.54	-0.49	0.30	1.00			
Q _P	0.79	0.42	0.79	0.79	-0.15	1.00		
T _P	-0.60	-0.43	-0.58	0.02	0.74	-0.34	1.00	
T _B	-0.63	-0.41	-0.62	-0.01	0.80	-0.44	0.77	1.00
Unida de Escurrimento Degradada								
	I _{MAX}	I _{MIN}	I _{MEDIA}	P _{TOTAL}	D _{TOTAL}	Q _P	T _P	T _B
I _{MAX}	1							
I _{MIN}	0.65	1.00						
I _{MEDIA}	0.95	0.78	1.00					
P _{TOTAL}	0.50	0.07	0.45	1.00				
D _{TOTAL}	-0.47	-0.54	-0.49	0.30	1.00			
Q _P	0.83	0.47	0.83	0.77	-0.19	1.00		
T _P	-0.51	-0.41	-0.50	0.20	0.76	-0.25	1.00	
T _B	-0.61	-0.46	-0.60	0.09	0.86	-0.40	0.79	1.00

Resalta la relación directa entre la intensidad media y la máxima con un coeficiente de correlación (r) de 0.95. De igual manera las relaciones con coeficientes de correlación mayor a 0.70 en las dos unidades fueron las

relaciones entre la intensidad media y la mínima, el gasto pico y la intensidad máxima, el gasto pico y la intensidad media, la duración total y tiempo total, el tiempo al pico y el tiempo total, y el gasto pico y la lámina total. Cabe resaltar que la única relación inversa obtenida con un coeficiente de correlación considerable fue la relación de la intensidad máxima y el tiempo total con coeficientes de -0.63 y -0.61 , para las unidades degradadas y conservadas, respectivamente.

En la Tabla 3 se presentan las características de la respuesta hidrológica de cada evento para cada una de las dos unidades monitoreadas.

Tabla 3. Respuesta hidrológica de los eventos de precipitación para cada una de las unidades de escurrimiento monitoreadas.

ID	Fecha	Unidad Conservada				Unidad en Degradada			
		d_{EFECTIVA} (min)	Q_P (mm/h)	T_P (min)	T_B (min)	d_{EFECTIVA} (min)	Q_P (mm/h)	T_P (min)	T_B (min)
1	18/09/2011	20	5.4	30	110	20	14.8	20	115
2	18/09/2011	50	2.5	60	210	50	3.6	50	205
3	20/09/2011	25	3.3	40	150	25	8.6	30	155
4	21/09/2011	95	4.1	50	340	95	7.4	40	380
5	21/09/2011	60	14.4	30	95	60	31.3	30	140
6	23/09/2011	105	13.5	150	280	135	25.0	180	350
7	24/09/2011	55	5.9	40	135	55	13.2	30	130
8	25/09/2011	75	2.1	100	310	75	2.5	80	290
9	29/09/2011	30	22.4	10	50	30	46.2	10	65
10	30/09/2011	35	17.5	20	95	35	39.7	20	125
11	01/10/2011	50	4.7	40	125	50	9.7	40	145
12	04/10/2011	85	2.7	30	240	85	4.4	30	230
13	04/10/2011	70	2.5	80	140	70	2.9	70	160
14	04/10/2011	215	14.0	90	350	235	30.7	110	380
15	05/10/2011	40	3.3	30	95	40	5.8	40	145
16	05/10/2011	195	3.0	130	290	195	5.2	120	360
17	06/10/2011	35	12.6	20	75	35	27.9	20	105
18	10/10/2011	75	15.5	40	95	75	31.1	50	150
19	11/10/2011	55	23.3	20	90	55	44.2	30	130
20	12/10/2011	215	2.0	90	330	215	2.1	90	370
21	13/10/2011	15	3.1	20	105	15	5.7	20	100
22	14/10/2011	30	31.6	10	55	30	70.4	10	60
23	15/10/2011	45	4.5	30	110	45	10.3	30	120
24	15/10/2011	40	7.2	40	110	40	15.4	40	135

d_{EFECTIVA} = Duración efectiva de la precipitación sobre el hidrograma; Q_P = Gasto pico; T_P = Tiempo al pico; T_B = Tiempo total del hidrograma

De acuerdo a la información obtenida en cada hidrograma, la duración efectiva de la precipitación varió de 20 minutos para el evento 1 en las dos unidades hasta 215 minutos para los eventos 14 y 20 en la unidad de escurrimiento conservada y 235 minutos en el evento 14 para la unidad de

escurrimiento degradada. Los valores de la duración efectiva de las dos unidades monitoreadas son iguales para 22 de los 24 eventos, ya que para los eventos 6 y 14 la duración efectiva fue mayor para la unidad degradada en un 29% y 9%, respectivamente, comparada con la unidad conservada.

En lo que se refiere al gasto pico, los valores de las mediciones demuestran la variabilidad de los datos en cada grupo y entre grupos de datos. De acuerdo a los valores medidos, el gasto pico mínimo fue de 2.0 mm/h para la unidad conservada y 2.1 mm/h para la unidad degradada. Estos valores mínimos se presentaron en el evento 20 para las dos unidades. Para el gasto pico máximo los valores fueron de 31.5 mm/h y 70.4 mm/h, respectivamente, y para las dos unidades se presentó en el evento 22. Estos valores demuestran que aunque las magnitudes de los escurrimientos varían para cada evento y cada unidad, las unidades de escurrimiento responden hidrológicamente de la misma manera a los eventos extremos. Los resultados demuestran que la unidad de escurrimiento conservada presenta una disminución media en el gasto pico de 9.9 mm/h con respecto a la unidad degradada, lo que indica el efecto benéfico de la cobertura vegetal para regular los procesos hidrológicos de superficie.

El tiempo pico medido de los hidrogramas demuestra que en 8 de los 24 eventos el tiempo al gasto pico fue mayor en la unidad conservada que en la unidad degradada con un tiempo de retraso entre 10 y 20 minutos, lo cual indica el efecto de la vegetación al oponer más resistencia al flujo y como resultado probablemente de una mayor intercepción e infiltración del agua en el suelo. Sin embargo, en 11 de los 24 eventos el tiempo pico fue igual en las dos unidades y solo en 5 de los 24 eventos el tiempo pico fue mayor en la unidad de escurrimiento degradada entre 10 y 30 minutos, lo que indica que el comportamiento de este parámetro no fue consistente y su ocurrencia y magnitud depende de otros factores.

Con respecto al tiempo total de los hidrogramas, en casi el 80% de los eventos el tiempo de duración total del escurrimiento fue mayor para la unidad degradada en comparación con la unidad conservada, con valores entre 5 y 70 minutos. Esto puede indicar un efecto en la retención de la precipitación y su posterior infiltración en el suelo. En el resto de los eventos el tiempo total del hidrograma fue mayor en la unidad conservada. En ningún evento el tiempo total fue igual para las dos unidades.

De acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias de mínima diferencia significativa de Fisher con un nivel de confiabilidad del 95%, el único caso en donde se identifica diferencia estadísticamente significativa entre los resultados de las dos unidades es en el gasto pico, ya que la diferencia de media es de -10.0, favorable a la condición conservada, y con un límite de +/-8.1. Los resultados del análisis de comparación de medias se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación múltiple de medias de la caracterización de los hidrogramas de las unidades de escurrimiento monitoreadas.

D _{DEFECTIVA}	Unidad	Media	Desviación estándar	Homogeneidad
	Conservada	71.4	57.7	A
	Degradada	73.5	61.0	A
	Comparación		Diferencia	+/- Límites
Conservada-Degradada		-2.1	34.5	
Q _P	Unidad	Media	Desviación estándar	Homogeneidad
	Conservada	9.1	8.2	A
	Degradada	19.1	17.8	B
	Comparación		Diferencia	+/- Límites
Conservada-Degradada		-10.0*	8.0	
T _P	Unidad	Media	Desviación Estándar	Homogeneidad
	Conservada	51.8	43.1	A
	Degradada	52.7	49.0	A
	Comparación		Diferencia	+/- Límites
Conservada-Degradada		-0.9	41.0	
T _B	Unidad	Media	Desviación Estándar	Homogeneidad
	Conservada	166.0	98.7	A
	Degradada	189.4	105.1	A
	Comparación		Diferencia	+/- Límites
Conservada-Degradada		-23.4	59.2	

* Diferencia estadísticamente significativa, LSD Fisher $\alpha=0.05$

Es importante resaltar la diferencia estadísticamente significativa en el gasto pico de las unidades conservadas y degradadas, ya que indica de forma consistente la importancia de la cobertura vegetal en la reducción de este parámetro o el aumento de la magnitud del mismo por efecto de la degradación de la cobertura (Schnorbus y Alila, 2004), y su implicación en la regulación de la respuesta hidrológica.

Siendo la intensidad máxima de los eventos y el gasto pico las variables de respuesta más sensible y significativos para las dos condiciones de cobertura vegetal, en la Figura 6 se presenta la relación entre las mismas para los eventos monitoreados.

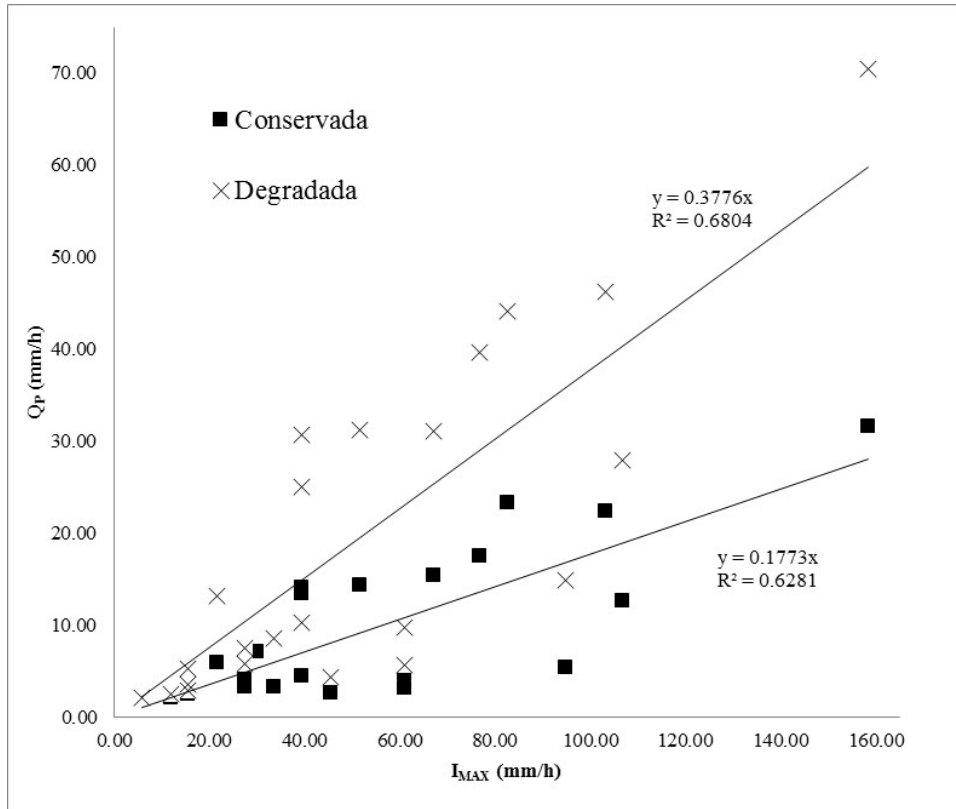


Figura 6. Relación entre la intensidad máxima y el gasto pico para las dos unidades de escurrimiento monitoreadas.

El coeficiente de regresión (R^2) entre la intensidad máxima y el gasto pico fue de 0.68 y 0.62 para las unidades degradada y conservada, respectivamente. Esta relación demuestra que el gasto pico responde en forma directamente proporcional en función de la intensidad máxima. Como se puede observar en las ecuaciones respectivas, el valor de la pendiente de la recta de regresión es menor para la unidad de escurrimiento conservada (0.1773) con respecto a la unidad degradada (0.3776), lo que indica que el incremento en el gasto pico por cada unidad de intensidad máxima de lluvia es de alrededor de 2 veces mayor en la unidad degradada en comparación con la unidad conservada, o dicho en otras palabras, la intensidad del gasto pico se reduce aproximadamente a la mitad por efecto de la vegetación conservada, y esta condición ayuda a regular los procesos hidrológicos de superficie de forma más efectiva.

Los resultados descritos anteriormente demuestran que la diferencia en la cobertura vegetal de las dos unidades tiene un efecto significativo en el comportamiento hidrológico, especialmente en el gasto pico, siendo esta característica la más sensible. Para encontrar los modelos de regresión que

permitan estimar el gasto pico para las dos unidades en función de las características de la precipitación, se realizó un análisis de regresión usando la metodología de mínimos cuadrados y pasos sucesivos. Los parámetros calculados para los modelos tienen un nivel de confianza del 95% con un α de 0.05.

Los modelos encontrados para las unidades de escurrimiento presentan un valor P de 0.0001, lo que evidencia que los modelos son significativos estadísticamente. Estos modelos presentan un coeficiente de determinación de 0.862 para la unidad conservada y 0.888 para la unidad degradada. En la Tabla 5, se presentan las ecuaciones que representan el comportamiento del gasto pico en función de la precipitación para las diferentes unidades de escurrimiento.

Tabla 5. Ecuaciones para el cálculo de Q_P en función de la precipitación.

Unidad	Ecuación	R^2
Conservada	$Q_P = 0.239 I_{MED} + 0.315 P_T - 3.102$	0.862
Degradada	$Q_P = 0.571 I_{MED} + 0.634 P_T - 7.684$	0.888

donde Q_P es el gasto pico (mm/h), I_{MED} es la intensidad media (mm/h) y P_T es la lámina total (mm)

De acuerdo con las ecuaciones obtenidas, el aumento del gasto pico por cada unidad de intensidad media es 2.4 veces mayor en la unidad de escurrimiento degradada en relación a la unidad de escurrimiento conservada. En el mismo sentido, el gasto pico aumenta dos veces más por cada unidad de lámina total para la unidad degradada en comparación con la unidad conservada.

El análisis de mínimos cuadrados y pasos sucesivos descarta las variables duración total, intensidad máxima e intensidad mínima, dejando las variables intensidad media y precipitación total. Los coeficientes de las ecuaciones demuestran el efecto de la cobertura vegetal, ya que para la unidad conservada los coeficientes son menores en una magnitud general aproximada de 2 a 1.

Conclusiones

Los eventos de precipitación seleccionados permitieron observar la variación de datos tanto en la precipitación como en el escurrimiento de las unidades monitoreadas, lo cual a su vez permitió establecer la relación lluvia-escurrimiento para las dos condiciones de degradación de la cobertura vegetal.

Los resultados demuestran que la cobertura vegetal tiene un efecto significativo en la regulación hidrológica superficial. Las variables de respuesta hidrológica más sensibles fueron el gasto pico y en menor medida su tiempo de ocurrencia. En general, la magnitud del gasto pico se redujo y su ocurrencia tuvo un retraso en la condición conservada en comparación con la condición degradada.

Se encontró una relación directamente proporcional entre el gasto pico y la intensidad máxima de los eventos de precipitación, en las dos unidades de escurrimiento. La condición conservada disminuye el efecto de la intensidad máxima en el gasto pico a poco más de la mitad, es decir, en aproximadamente 53%, en comparación con la condición degradada, lo que refleja el efecto de la vegetación en esta variable de respuesta hidrológica.

El gasto puede ser estimado para cada una de las dos condiciones de degradación de la cobertura mediante un modelo polinomial de regresión que incluye la intensidad media y la precipitación total. En los modelos respectivos se puede observar, que el gasto pico aumenta más del doble por cada unidad de intensidad media y en aproximadamente el doble por cada unidad de precipitación en la condición degradada cuando se compara con la condición conservada. En ambos casos, la confiabilidad de los modelos es alta, tal como reflejan los valores de los coeficientes de determinación respectivos. Estos resultados ratifican la importancia de la vegetación en la respuesta hidrológica zonas de aporte.

En conclusión, de acuerdo a los resultados obtenidos, la respuesta hidrológica en cuencas de zonas tropicales depende en gran medida, entre otros factores, del estado de degradación de la cobertura vegetal y de variables relacionadas con la intensidad máxima y media de la precipitación. Aunque se debe investigar más a fondo la relación lluvia-escurrimiento en zonas tropicales, los resultados de este estudio permitieron definir, preliminarmente, que variables como el gasto pico, la intensidad máxima, la intensidad media, y la precipitación total, deben de ser consideradas para el entendimiento de la relación lluvia-escurrimiento en diferentes condiciones de cobertura vegetal, y su uso potencial en la implementación de las mejores prácticas para el manejo del agua y la preservación del suelo.

References:

- Belmonte-Serrato, F. y Romero-Diaz, M.A. (1993). Instrumentos y métodos para el estudio de la capacidad de interceptación de algunas especies vegetales mediterráneas. Asociación de Geógrafos Españoles, Universidad de Sevilla, 181-186.
- FAO-UNESCO (Food and Agriculture Organization, and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). (1987). Soils of the World. Elsevier Science Publishing. New York, NY, USA.
- Granada-Isaza, C.A., Ventura-Ramos, E. Jr., and Oropeza-Mota, J.L. (2012). Reinforcement of soil imprinting with gypsum and polyacrylamide to control water erosion and runoff. *Terra Latinoamericana*, 30 (1), 69-79.
- Jane, G. T. and Green, T. G. A. (1983). Biotic influences on landslide occurrence in the Kaimai Range. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 26, 381-393.

- Marks, D., King, G. A. and Dolph, J. (1993). Implications of climate change for the water balance of the Columbia River Basin, USA. *Climate Research*, 2, 203-213.
- Schnorbus, M. and Alila, Y. (2004). Forest harvesting impacts on the peak flow regime in the Columbia Mountains of southeastern British Columbia: An investigation using long-term numerical modeling. *Water Resources Research*, VOL. 40, 1-16.
- Toy, T.J., Foster, G.R., and Renard, K. G. (2002). *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control*. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 338 pp.
- Tromble J.M. (1988). Water interception by two arid land shrubs. *Journal of Arid Environment*, 15, 65-70.
- Wallis, F.P. and James, I.L. (1972). Introduced animal effects and erosion phenomena in the Northern Urewera Forests. *New Zealand Journal of Forestry*, 17, 21.36.
- Wei, W., Chen, L., Fu, B., Huang, Z., Wu, D. and Gui, L. (2007). The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *Journal of Hydrology*, 335, 247– 258.