

Acumulación y dirección de la escorrentía superficial a través del método del Número de Curva (nc) y SIG en una vertiente urbana de la ciudad de Trujillo-Venezuela

Runoff flow direction/accumulation through Curve number (CN) method and GIS in an urban slope, Trujillo-Venezuela

Roa-Lobo José¹ y Kearney Michael²

Recibido: marzo, 2011 / Aceptado: julio, 2012

Resumen

El objetivo de este trabajo es ilustrar cartográficamente la magnitud del patrón espacial y temporal, de acumulación y dirección de la escorrentía en una vertiente de uso urbano en la ciudad de Trujillo, Venezuela. En este análisis se integra la escorrentía superficial mensual calculada mediante el método del NC (número de curva), con el patrón de dirección y acumulación del drenaje calculado a partir de un modelo de elevación digital (MED), representando cartográficamente el trazado y magnitud del escurrimiento mensual. Este tipo de producto podría posteriormente ser incluido en los programas de conservación de cuencas y de zonificación de amenazas naturales debido a su carácter dinámico temporal.

Palabras clave: Método del número de curva; escorrentía; escurrimiento; dirección/acumulación del drenaje.

Abstract

The aim of this study is the temporal/spatial description and cartography of the runoff flow direction/accumulation pattern, in an urban land-use slope located in Trujillo city, Venezuela. In the study area, the monthly runoff is estimated by means of the CN (curve number) method, which is later integrated to the drainage direction/accumulation pattern computed from a digital elevation model (DEM), to outline the magnitude and flow direction of this runoff. This kind of product could be later included in any watershed conservation plan and as a part of any natural hazard zoning, given its temporal- dynamic nature.

Key words: Curve Number method; runoff; flow direction; flow accumulation; drainage pattern.

1 Universidad de Los Andes-Trujillo, Grupo Geociencia. Trujillo-Venezuela Correo electrónico: roajose@ula.ve; jose_roa@yahoo.com

2 Universidad de Maryland, Departamento de Geografía, College Park-EEUU. Correo electrónico: kearney@geog.umd.edu

1. Introducción

El presente trabajo surge como una contribución a la comprensión de la dirección y acumulación de la escorrentía superficial y su distribución espacio-temporal en una vertiente de uso urbano en la ciudad de Trujillo, Venezuela. Esta ciudad esta emplazada en la cuenca montañosa del río Castán, la cual, por su localización transversal al eje mayor de la cordillera de Mérida, presenta, a excepción de los abanicos aluviales de fondo de valle, un relieve quebrado con pendientes mayores a 35° . Dadas estas condiciones topográficas y al incremento de construcciones improvisadas en terrenos de vertientes, Trujillo es anualmente y durante los períodos lluviosos, afectada por movimientos de masa (Roa, 2006).

La simulación de la escorrentía superficial, tanto en su distribución espacial como temporal, es fundamental en la planificación, conservación y desarrollo de recursos hídricos (Gupta y Panigrahy, 2008), en el diseño de infraestructura hidráulica (Texas Department of Transportation, 2004) y potencialmente como factor de importancia en el análisis ambiental y prevención de amenazas asociadas a movimientos de masa y desbordes. Bien conocido y establecido en el ámbito de la ingeniería hidráulica y ciencias ambientales, el método del número de curva (NC) es usado para la estimación de la escorrentía generada por tormentas, debido a su conveniencia técnica, simplicidad y acreditado origen (Ponce y Hawkins, 1996).

En este análisis se integra la escorrentía superficial mensual calculada mediante el método del NC, con el patrón de dirección y acumulación del drenaje calculado a partir de un modelo de elevación digital (MED) de la vertiente en estudio, y de esta manera expresar cartográficamente el trazado y magnitud del escurrimiento mensual. Este tipo de producto podría posteriormente ser incluido en los programas de conservación de cuencas y de zonificación de amenazas naturales debido a su carácter dinámico temporal.

2. Objetivo

El objetivo fundamental de este trabajo es ilustrar cartográficamente la magnitud del patrón espacial y temporal, de acumulación y dirección de la escorrentía en una vertiente a través de:

- Cálculo de los valores mensuales de escorrentía superficial mediante el uso del método NC.
- Cálculo del patrón de dirección y acumulación del drenaje en la vertiente en estudio, mediante el procesamiento del modelo de elevación digital (MED) del área.
- Cálculo del Coeficiente de escorrentía (R).
- Integración de las doce capas de escorrentía superficial calculada, y el patrón de dirección y acumulación del drenaje. Generación de doce capas de magnitud relativa de acumulación y dirección de la escorrentía en el área de estudio.

3. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la vertiente sur-este de la cuña terminal del cerro Santa María-La Alameda, situado al sur del casco central de la ciudad de Trujillo, Venezuela. Esta área comprendida entre la divisoria de aguas del cerro y la avenida Cruz Carrillo, presenta respectivamente un rango de altitudes entre 894 a 761 msnm. Según el explorador de Google Earth, las coordenadas del polígono que enmarca el área de estudio son: $9^{\circ}21'53,46''$ a $9^{\circ}22'6,82''$ LN y $70^{\circ}25'52,02''$ a $70^{\circ}26'9,36''$ LO (Figura 1).

Dado que la temperatura media anual del área es mayor a 23°C (Ministerio del Poder Popular para el Ambiente-MinAmb, 2009), el piso térmico regente en el área es de tipo caluroso (Silva, 2002). El régimen de lluvias es estacional (marzo a noviembre), pero con un comportamiento bimodal propio de la cuenca del lago de Maracaibo, que genera dos períodos lluviosos alrededor de los dos picos anuales de precipitación (abril y octubre) y dos marcados descensos (enero y julio). Los meses junio, julio y agosto son considerados en este estudio como un período de transición lluvia-sequía-lluvia (Anexo



Figura 1. Localización del área de estudio, coordenadas centrales: $9,362737^{\circ}$, $-70,436090^{\circ}$ (Cortesía de Google Earth)

1). La vegetación se reduce a dos conjuntos, uno compuesto por árboles aislados en las cercanías de las casas y un arbustal / matorral denso leñoso que cubre el resto de la unidad; no existe un uso agrícola en estos terrenos.

El cerro Santa María-La Alameda es geológicamente un afloramiento altamente fracturado de filitas de la Asociación Mucuchachí, que se presenta como roca plegada, con rumbo general de la foliación de N25°E y buzamientos entre 40° a 80° (Ferrer, 1987).

La vertiente en estudio presenta un promedio de pendientes de 40° que se incrementa hasta los 70° en las franjas colindantes con la avenida Cruz Carrillo, lo cual proporciona las condiciones ideales para que se generen eventuales procesos de caída/volcamiento de rocas (derrumbes), (Roa, 2006), dado el alto fracturamiento de las filitas. Durante el período de lluvias de mayo del 2008, estos derrumbes dieron paso a un sistema de movimientos de masa más cercanos a deslizamientos superficiales traslacionales dada la presencia de escarpes de cabecera, lo cual podría asociarse a la sobresaturación hídrica del perfil por la concentración de la escorrentía que se generan desde las casas, aceras y veredas ubicadas en la parte alta de la vertiente (Anexo 2).

Hidrológicamente esta vertiente no posee drenajes permanentes ni intermitentes; las precipitaciones en el área generan un escurriendo laminar que en su avance se acomoda en las ondulaciones dadas por la reptación y el afloramiento rocoso, no existiendo entonces cauces o

surcos de escurrimiento. El área de estudio tiene 5,89 hectáreas y corresponde a una poligonal de 1.401 m de perímetro.

4. Método del Número de Curva (NC)

El Número de Curva (Curve Number en la literatura en inglés), es un método simple, efectivo y ampliamente usado para determinar aproximadamente la escorrentía generada por una precipitación o tormenta en un área particular (Purdue Research Foundation, 2004). Este método fue desarrollado en 1954 por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Soil Conservación Service, National Engineering Handbook, 1993). Es un método empírico desarrollado a partir de observaciones y análisis de la escorrentía superficial en cuencas pequeñas con diferentes tipos de suelos, condición hidrológica, cobertura vegetal y uso de la tierra, parámetros considerados fundamentales en la relación precipitación-escorrentía y originalmente tratados en los trabajos de Sherman (1949) y Mockus (1949). Aunque Ponce y Hawkins (1996), argumentan que esta metodología fue diseñada para un evento hidrológico específico, también reconocen que ha sido aplicada para simulaciones hidrológicas de largo plazo como las descritas en Woodward y Gburek (1992). Más recientemente se señala que el NC puede ser potencialmente aplicado para calcular valores de escorrentías promedio anuales (Purdue Research Foundation, 2004) e inclusive para promedios mensuales (Gupta y Panigrahy, 2008).

Dado que los parámetros usados para calibrar el NC fueron estimados de cuencas temperadas, principalmente del medio oeste norteamericano (Ponce y Hawkins, 1996), actualmente existen enfoques tendentes a mejorar su confiabilidad en otros ámbitos regionales como el propuesto en el Manual de Hidrología Indio (Ministry of Agriculture Soil Conservation Department, 1972), citado y aplicado por Kumar *et al.* (1991), y comparado exitosamente con escorrentías observadas en cuencas de uso agrícola en India por Pandey *et al.* (2002). Sin embargo, una reciente aplicación del método NC original en China (Xianzhao *et al.*, 2008), reportó igualmente una alta correlación (75%) entre la escorrentía observada y la modelada. En este análisis se aplicó el método original NC para el cálculo de la escorrentía superficial. El cuadro 1 describe algunas aplicaciones del NC por área temática y procedimientos empleados, en tanto que el cuadro 2 describe las estipulaciones generales de la ecuación del método del NC.

La variabilidad teórica del potencial máximo de retención (S) es $0 \leq S \leq \infty$, proyectado en el parámetro adimensional llamado NC, el cual varía en el rango $100 \geq NC \geq 0$ (Ponce y Hawkins, 1996). NC es calculada sobre la base de la condición antecedente de humedad (CAH), la cobertura vegetal, el uso de la tierra y las condiciones hidrológicas del suelo en términos de su proclividad al drenaje (Gupta y Panigrahy, 2008). Una NC = 100 describe una nula retención potencial ($S = 0$), lo que se traduce en una asociación suelo-cobertura impermeable

donde la escorrentía es igual a la precipitación. Contrariamente, una NC = 0 ($S = 100$), describe la máxima retención posible o una asociación suelo-cobertura totalmente permeable donde no se genera escorrentía (Ponce y Hawkins, 1996). Entre estos extremos es posible proyectar infinitas curvas de escorrentía que describen la relación de la precipitación con determinada asociación suelo-cobertura, cada interrelación recibe un valor llamado Número de Curva (NC) o Número Hidrológico (Gaspari *et al.*, 2007).

El NC se encuentra en las tablas ofrecidas por el SCS (1993), y se obtiene a través de la lectura de las diferentes asociaciones suelo-cobertura que se presentan ordenadas según el uso de la tierra y tipo de cobertura vegetal. Cada asociación suelo-cobertura recibe entonces un número hidrológico o NC de acuerdo a su condición hidrológica, esta última definida en el método NC en cuatro grupos hidrológicos de suelos (Wilson y Gallant, 2000), y tres condiciones hidrológicas (pobre < 30% de cobertura vegetal, regular 30% a 70% de cobertura vegetal, y buena >70% de cobertura vegetal) (Texas Department of Transportation, 2004). Los cuatro grupos hidrológicos de suelos se extrapolan de más de 8.500 series de suelos con base a sus características de infiltración (SCS, 1993), e inclusive textura del perfil tal como se ilustra en el cuadro 3.

4.1 Condición Antecedente de Humedad (CAH)

La CAH o Antecedent Moisture Conditions (AMC) como se conoce en la litera-

Cuadro 1. Resumen de algunas aplicaciones del NC por área temática, tipo, procedimiento y autores

Área Temática	Tipo De Estudio	Procedimiento	Autores
NC / Estimación de la escorrentía	Estudio comparativo sobre niveles de escurrimiento en una cuenca agrícola bajo diferentes modalidades de uso (labranza convencional y siembra directa) a través del cálculo de la NC	Se trabaja con datos de 583 tormentas y escorrentías medidas <i>in situ</i> a través de un análisis estadístico que incluyó el ajuste de modelos de regresión lineal	Chagas <i>et al.</i> , 2008
	Modelado de la escorrentía a través del método del NC en pequeñas cuencas del altiplano de loess chino	Se utiliza imágenes LANDSAT para la definición de tipos suelo-coberturas y se comparan los valores de escorrentía estimados con los valores observados	Xianzhao y Li Jiazhu, 2008
	Manual de práctica sobre el diseño de obras hidráulicas	Revisión del sistema del NC para la estimación de escorrentías particularmente en usos urbanos	Texas Department of Transportation, 2004
NC / Análisis comparativo de escorrentías	Estimación de la escorrentía de cuencas agrícolas a través de NC y SIG	Se trabaja bajo ambiente SIG y se comparan escorrentías observadas versus las estimadas por el NC. El método adaptado a las condiciones climáticas del subcontinente indio	Ashish <i>et al.</i> , 2003
	Análisis de la relación precipitación - escorrentía a través del NC bajo diferentes tipos de suelo-cobertura	Se determinaron diferentes suelo-coberturas en una cuenca con datos LANDSAT y ambiente SIG, calculando y comparando sus diferentes escorrentías	Gaspari <i>et al.</i> , 2007
	Se estudia el comportamiento del coeficiente de escorrentía instantáneo bajo diferentes coberturas de vegetación y condiciones precedentes de humedad del suelo	El coeficiente de escorrentía es definido como la relación entre las precipitaciones efectivas (calculadas como Q a través del NC) y las precipitaciones totales caídas	Pizarro <i>et al.</i> , 2006
NC / Datos e imágenes satelitales	Correlación del NC con datos de suelo-cobertura derivados del sistema satelital IRS	Los tipos suelo-cobertura, definidos en la base de datos del sistema IRS, son correlacionados con los grupos hidrológicos y suelo-cobertura previstos en el sistema NC. Se aplica en una cuenca en India y se trabaja con la versión India del NC	Kumar <i>et al.</i> , 1991
	Estimación de la escorrentía y NC con integración de datos teledetectados del satélite indio IRS-1D LISS-III		Pandey <i>et al.</i> , 2002
	Estimación de la variabilidad espacio temporal de la escorrentía a través del sistema NC y datos teledetectados	Se utilizan composiciones de 10 días NVDI basadas en imágenes SPOT-VGT, y precipitación teledetectada diaria a 10 km de resolución de NOAA, para determinar tipos de suelo-cobertura y CAH respectivamente en el subcontinente Indio	Gupta y Panigrahy, 2008
NC / Consideraciones teóricas y metodológicas	Análisis metodológico sobre el umbral crítico de escorrentía y/o porcentaje de retención máximo asumido en el sistema del NC.	Se considera que un $\alpha = 0.055$ representa mejor el umbral de escorrentía que el original $\alpha = 0.25$.	Woodward <i>et al.</i> , 2003
		Explica el origen y fundamento empírico de $\alpha = 0.25$, como umbral de escorrentía.	Plummer <i>et al.</i> , 1998
	Análisis teórico sobre la conceptualización del método del NC	Análisis conceptual y matemático del desarrollo del método del NC.	Ponce y Hawkins, 1996

Cuadro 2. Descripción general de los componentes y ecuaciones de método del NC

$Q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia) + S} \quad (1) \text{ donde:}$	<p>Q = escorrentía superficial (mm o pulg.) P = precipitación (mm op pulg.) S = potencial máximo de retención luego del comienzo de la escorrentía. Ia = pérdida inicial de la precipitación</p>
$Ia = 0,2S$	<p>Porcentaje de retención máximo asumido, debido a pérdidas por almacenamiento, interceptación e infiltración. Se considera como el umbral crítico de escorrentía (López, 1998)</p>
$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad (2)$	<p>Sustituyendo Ia por el porcentaje de retención 0,2S en la ecuación (1), ésta se reescribe como (2)</p>
<p>si $P > 0,2S \quad Q = (2)$ $P \leq 0,2S \quad Q = 0$</p>	<p>La ecuación (2) es solo aplicable si la precipitación excede el umbral crítico de escorrentía, caso contrario no se genera escorrentía</p>
$S = K * \left(\frac{100}{NC} - 1 \right)$	<p>K = 10 en el sistema inglés o 254 en el sistema métrico. (Texas Department of Transportation Cap. 5 sección 7, 2004). NC = número de curva o variable representativa del potencial de escorrentía de un determinado complejo suelo-condición hidrológica, ya calculado y provisto en las tablas del SCS (1993)</p>

Cuadro 3. Características generales de infiltración y textura para cada grupo hidrológico de suelo

Grupo Hidrológico	Infiltración / Escorrentía	Textura
A	Alta infiltración / Baja escorrentía	Arenoso, franco arenoso
B	Moderada infiltración / Regular escorrentía	Franco limoso
C	Baja infiltración / Alta escorrentía	Franco arcillo arenoso
D	Muy baja infiltración / Muy alta escorrentía	Franco arcilloso, franco arcillo limoso, areno arcilloso, arcillo limoso.

tura en inglés, es un factor de conversión final que ajusta el valor NC de acuerdo a las condiciones antecedentes de humedad en el área analizada. Este ajuste se basa en el hecho que la escorrentía superficial en una misma asociación suelo-cobertura puede variar según los niveles de saturación hídrica en su perfil. La sa-

turación en un perfil según el método NC se estima evaluando la precipitación acumulada de al menos los últimos 5 días en el área a analizar. Dado que los datos de precipitación utilizados en este análisis corresponden a su distribución promedio mensual, fue necesario clasificar empíricamente esta precipitación mensual en

diferentes CAH, tal como se ilustra en el anexo 1. El cuadro 4 describe la asignación de CAH dentro del método de NC, según el manual de diseño hidráulico estatal de Texas (Texas Department of Transportation, 2004), con la adición de una columna sobre la CAH considerada en este análisis para cada mes.

El valor NC a encontrar en las tablas ofrecidas por el SCS (1993), corresponde a un NC con CAH II por lo que los ajustes son orientados a determinar el eventual NC con CAH II o CAH III. El cuadro 5 describe el sistema de ecuaciones utilizado para el cálculo de estos ajustes, las cuales fueron desarrolladas por Sobhani (1975) y Hawkins *et al.*, (1985), ambos citados en Ponce y Hawkins, (1996).

4.2 Determinación del NC para las asociaciones suelo-cobertura presentes en el área de análisis

El cuadro 6 describe las asociaciones suelo-cobertura que se estimaron presentes en el área de análisis y su correspondiente definición en las tablas de valores NC, ofrecidas en el manual de hidrología del servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos (SCS, 1972).

Dado que este estudio plantea la descripción del potencial mensual de escorrentía en el área de análisis, el procedimiento para la asignación del NC estuvo condicionado a:

Cuadro 4. Parámetros de clasificación de la CAH según precipitación acumulada y estacionalidad de las lluvias

Condición Antecedente de Humedad (CAH)	Precipitación acumulada 5 días previos (Texas Dot, 2004)		CAH de los meses considerados en este análisis
	Temporada de Lluvias	Temporada de Sequía	
CAH I o condición seca	< 35 mm	< 12 mm	Ene, Feb, Jul, Dic
CAH II o condición promedio	35 a 53 mm	12 a 28 mm	Mar, Jun, Ago, Sep
CAH III o condición húmeda	> 53 mm	> 28 mm	Abr, May, Oct, Nov

Cuadro 5. Fuente y/o ajuste del NC según diferentes condiciones antecedentes de humedad

Condición Antecedente de Humedad (CAH)	Nc Ajustado	Fuente y/o Ajuste
CAH I o condición seca	NC (I)	$NC(I) = \frac{4,2NC(II)}{10 - 0,058NC(II)}$
CAH II o condición promedio	NC (II)	NC obtenido de las tablas del SCS (1993)
CAH III o condición húmeda	NC (III)	$NC(III) = \frac{23NC(II)}{10 + 0,13NC(II)}$

Cuadro 6. NC por tipo suelo-cobertura y condiciones hidrológicas

Descripción del uso de la tierra	Descripción del tipo suelo-cobertura y condiciones hidrológicas		Número de curva (NC) por grupo hidrológico ¹			
	Tipo suelo-cobertura	Condición hidrológica / superficie impermeable ²	A	B	C	D
Otras tierras con o sin agricultura	Mezcla de matorral denso leñoso con herbazales ³	POBRE	48	67	77	83
		REGULAR	35	56	70	77
		BUENA	30	48	65	73
Superficies impermeables / pavimentadas	Estacionamientos pavimentados, techos, vías, etc.	100%	98	98	98	98

¹Valores NC bajo CAH II

²Condiciones hidrológicas son basadas en combinación de factores que afectan la infiltración y escorrentía incluyendo: (1) densidad y superficie foliar de las áreas vegetales; (2) cantidad anual de la cobertura; (3) cantidad de hierbas-pastos; (4) porcentaje de la cobertura residual y (5) grado de rugosidad de la superficie.

³Pobre < 50% de cobertura vegetal (incremento de escorrentía)

Regular 50% al 75% de cobertura vegetal

Buena > 75% de cobertura vegetal (decremento de escorrentía)

4.2.1 Sectorización de los tipos suelo-cobertura en el área de estudio

En el área se distinguen dos tipos suelo-cobertura, uno cubierto por una mezcla de arbustal/matorral denso leñoso con herbazales, y el otro por la superficie impermeable representada por las construcciones antrópicas. En el área bajo cubrimiento vegetal, éste no es continuo debido a la presencia de deslizamientos por lo que se considera que posee una condición hidrológica regular. Aunado a esto, la condición topográfica y litológica del perfil (sustrato rocoso, filitas y altas pendientes), supone el correspondiente a un grupo hidrológico de muy baja infiltración / muy alta escorrentía, por lo que el valor NC asignado es 77. En el caso de la superficie impermeable el valor NC a asignar es 98 (Cuadro 6).

4.2.2 Ajuste de los NC asignados según las CAH, basadas en la distribución promedio mensual de las precipitaciones en el área de estudio

Tal como se explicó en el punto 4.1, ante la carencia de datos diarios de precipitación, los datos mensuales de este análisis fueron empíricamente clasificados en diferentes CAH, de acuerdo a distribución mensual y períodos estacionales de lluvias. El cuadro 7 describe los valores NC calculados según las diferentes CAH (Cuadro 5), de los tipos suelo-cobertura presentes en el área, y consecuentes valores de potencial máximo de retención (S) y umbral crítico de escorrentía (0,2S). La asignación de los meses corresponde y se ilustra mejor según la distribución mensual de la precipitación trazada en el anexo 1.

Cuadro 7. Valores CAH, NC, S y 0,2S por meses calculados para los tipos suelo-cobertura presentes en el área de análisis

Tipo suelo-cobertura	CAH	NC	S (mm)	0,2S (mm)	meses
Mezcla de matorral denso leñoso con herbazales	CAH I	58	183,93	37	Ene, Feb, Jul, Dic
	CAH II	77	75,87	15	Mar, Jun, Ago, Sep
	CAH III	88	34,64	7	Abr, May, Oct, Nov
Superficies impermeables	CAH I	95	13,37	3	Ene, Feb, Jul, Dic
	CAH II	98	5,18	1	Mar, Jun, Ago, Sep
	CAH III	99	2,57	1	Abr, May, Oct, Nov

5. Metodología

Dado que el objetivo final de este trabajo es la ilustración cartográfica de la magnitud del patrón espacial y temporal, de acumulación y dirección de la escorrentía en la vertiente en estudio, el procedimiento básico seguido fue el cálculo de los valores mensuales de escorrentía superficial mediante el uso del método NC (ver sección 4), y su integración con el patrón de dirección y acumulación del drenaje, obtenido a través del procesamiento del MED del área. Este procedimiento, ilustrado en la figura 2, puede considerarse en tres etapas: 1) La de las fuentes de datos; 2) el pre-procesamiento de estos datos para ser convertidos en insumos para su modelado y, consecuentemente, 3) los productos preliminares y finales de dirección/acumulación de la escorrentía.

5.1 Fuentes

Los datos iniciales que sustentan este análisis fueron:

- Datos puntuales de precipitación. Son registros mensuales (por estación

meteorológica o climatológica) provenientes del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, 2009). Para este análisis se utilizaron los registros de seis estaciones cercanas al área de estudio con rango temporal mayor a 40 años.

- Información de campo sobre suelo-cobertura. Mediante recorridos se determinaron, localizaron y describieron las clases de suelo-cobertura.
- Levantamiento topográfico, que corresponde al plano topográfico obtenido de la Alcaldía de Trujillo del año 2005, escala 1:1.000, con curvas de nivel cada 5m.

5.2 Insumos

Los datos iniciales son entonces preprocesados mediante el SIG *ILWIS 3.6* (52° North initiative for geospatial open source software GmbH, 2012), de libre adquisición en la red, obteniéndose:

- Interpolación de la distribución mensual de la precipitación. Los datos puntuales de registros mensuales

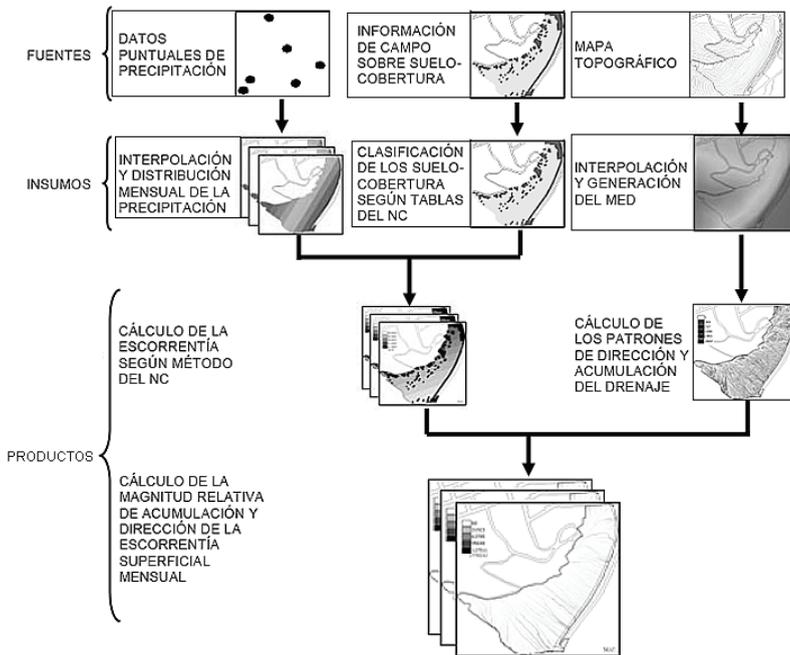


Figura 2. Diagrama procedimental de las fuentes, insumos y productos, utilizados en este análisis para el cálculo de la magnitud relativa de acumulación y dirección de la escorrentía superficial

de precipitación son interpolados a través del método de la distancia inversa, generándose doce mapas de distribución mensual de la precipitación en el área de estudio.

- Clasificación del suelo-cobertura, según tablas de NC. Las clases de suelo-coberturas encontradas son asociadas a las ya definidas por el método NC, tal como se explica en la sección 4.2.1
- Interpolación y generación del MED, que se produce a partir de la digitalización del mapa topográfico del área escala 1:1.000, al cual se adicionan puntos de control obtenidos con un sistema de posicionamiento global GPSMAP 60CSx de Garmin. La reso-

lución espacial de la celda fue ajustada a 1m^2 .

5.3 Productos

Los productos finales representan los resultados obtenidos en este análisis en cuanto al cálculo de la escorrentía superficial con la aplicación exhaustiva del método del NC, y su posterior uso en la representación de la magnitud relativa de acumulación y dirección de la escorrentía superficial en el área de estudio. Estos productos son:

- Cálculo de la escorrentía según el método del NC. La escorrentía fue calculada a nivel de celda y según la distri-

bución mensual de la precipitación, mediante la aplicación de la ecuación 2 descrita en el cuadro 2. La determinación de los valores NC asociados a los suelos-cobertura y necesarios para este computo, fueron explicados en la sección 4, punto 4.2.2.

- Cálculo de los patrones de dirección y acumulación del drenaje. Dado que la topografía es un factor de primer orden en el control de la variación espacial de las condiciones hidrológicas (Sorensen *et al.*, 2005), en este trabajo se utilizó el MED del área para ejecutar una evaluación hidrológica basada en la topografía, que permita determinar el trazado de potenciales corredores de escorrentía en la vertiente en análisis.

La mayoría de los modelos hidrológicos de distribución espacial hacen uso directo de los MED y de capas derivadas tales como dirección de flujos, inclinación de la pendiente y área de contribución (Peckham, 2008). Del MED del área de estudio se derivaron capas espaciales de entrada como pendientes, tangente de la pendiente, dirección y acumulación de flujos, usando el descenso más inclinado o algoritmo D8 (Jenson y Domingue, 1988), el cual se basa en el conteo acumulativo de las unidades de áreas que drena hacia una dirección (dirección del flujo) y sitio común (acumulación del flujo), permitiendo definir el patrón de drenaje y su intensidad potencial. El mapa resultante contiene valores acumulativos que representan para cada celda el número de iguales

contribuyentes a un determinado flujo o patrón hidrológico (Anexo 3).

- Cálculo de la magnitud relativa de la acumulación y dirección de la escorrentía superficial mensual. Finalmente, cada uno de los doce mapas de escorrentía superficial calculadas con el NC, es multiplicada con el mapa de patrones de dirección y acumulación del drenaje del área, y de esta manera generar los mapas mensuales de magnitud de dirección/acumulación de la escorrentía. Cada celda representa un valor de escorrentía de acuerdo a su posición en el flujo o patrón hidrológico determinado.

Idealmente, el flujo hidrológico de toda el área de estudio debería confluir en una celda final o punto de desagüe, la cual representaría la escorrentía total del área. Sin embargo, como en este caso, el cálculo de los patrones de acumulación de flujos a partir de un MED presenta diferentes niveles de incertidumbre, lo cual genera en la celda final un valor de escorrentía no coincidente con el esperado y anteriormente calculado para toda el área en análisis. Esta incertidumbre, generalmente explicada por la falta de continuidad y desconexión de las celdas constituyentes de los patrones lineales de flujo, ha sido abordada por diferentes autores (García y Camarasa, 1999; Gong y Xie, 2009), quienes plantean desde métodos heurísticos, la optimización de algoritmos para mejorar la delineación de estos patrones. Igualmente, diferentes plataformas de SIG han afrontado este

problema mediante la incorporación de nuevas rutinas de cálculo y creación de módulos hidrológicos externos (Ejemplo: *ArcHydro* en *ARCGIS* 8.3; *TOPOFLOW* en *Rivertools* 3.0.3; *DEM hydro-processing* en *ILWIS* 3.6; etc.), que eventualmente perfeccionarían el trazado del flujo y acumulación de la escorrentía superficial.

A pesar de los esfuerzos hasta ahora hechos en el campo, los resultados suelen ser moderadamente satisfactorios como los reportados por Rumman *et al.* (2005), quienes utilizan el modelado *HEC-GeoHMS*, a través de *ARCVIEW* 3.3 para delineación de cuencas y cauces; o más limitados como los encontrados por Luo *et al.* (2008), quienes luego de procesar datos del SRTM 3 (\pm 90m resolución horizontal) bajo *ARCGIS* 8.0, advierten que la incertidumbre presente en el cálculo de la acumulación de flujos, particularmente en la definición del umbral de escorrentía, afecta potencialmente la objetividad del modelo hidrológico propuesto.

En este análisis se utilizó el módulo *DEM hydro-processing* del *ILWIS* 3.6 para el cálculo de los patrones de la acumulación de flujos, el cual si bien no posee la sofisticación de otras plataformas SIG, sus resultados permiten describir cartográficamente la distribución espacial y temporal de la acumulación de la escorrentía a niveles aceptables para los objetivos propuestos en este análisis.

6. Integración de la información

La magnitud relativa de la acumulación y dirección de la escorrentía puede ser descrita a través del cálculo del coeficiente de escorrentía (R) y de la representación cartográfica de sus patrones de acumulación.

6.1 Coeficiente de escorrentía (R)

Este coeficiente representa el porcentaje de la precipitación que se convierte en escorrentía (Chow *et al.*, 1988), y se expresa como:

$$R = \frac{Q}{P}$$

donde:

Q = Escorrentía superficial en área/tiempo determinado

P = Precipitación registrada en área/tiempo determinado

El coeficiente de escorrentía permite definir el escurrimiento potencial relativo del área de estudio para cada mes, CAH e inclusive según el período de lluvias. Para ello es necesario establecer un umbral de potencial de escorrentía, que en este trabajo se establece a partir de los siguientes supuestos:

- El rango dinámico del coeficiente de escorrentía varía entre valores tendientes a 0 y 1, representando 0 la no existencia de escorrentía y 1 que la totalidad de las precipitaciones se escurre sin que exista forma alguna de interceptación como infiltración, evaporación y absorción por parte de la vegetación.

- Un coeficiente de escorrentía del orden de 0,25 (25%) o menor, representa una baja escorrentía. Gupta y Panigrahy (2008), en un estudio predictivo de escorrentía en India, establece a partir de la dinámica estacional del escurrimiento en los campos arroceros del oeste de Bengala, un umbral de 0,2 (20%) como el coeficiente mínimo para ser considerado representativo de un área potencial de escurrimiento.
- En contraposición entonces, un coeficiente de escorrentía del orden de 0,75 (75%) o mayor, representaría un área de muy alto potencial de escurrimiento. El cuadro 6 describe que las áreas de superficies impermeables como techos casas y pavimentos, ambas presentes en el área de estudio, describen una condición hidrológica cercana al 100%, es decir capaz de

escurrir la totalidad del agua de lluvia que se les adicione inclusive bajo una CAH I o de sequía.

- Con base en lo anterior, en este análisis se considera que un coeficiente de escorrentía del orden de 0,5 (50%), representaría el punto de quiebre entre un potencial moderado de escorrentía (<0,5) y un área de alto potencial de escurrimiento (≥0,5).

El cuadro 8 ofrece una descripción del coeficiente de escorrentía calculado según la ecuación (3), su distribución según los meses considerados, respectiva CAH y período estacional de lluvias en el área analizada; mientras que en la figura 3, además de la distribución antes señalada, se ilustra el potencial relativo de escorrentía que representa el coeficiente clasificado según los umbrales de escorrentía potencial considerados en esta análisis.

Cuadro 8. Distribución mensual del coeficiente de escorrentía R(Q/pp), según CAH y período estacional de lluvias. Los valores de precipitación (pp) y escorrentía (Q), están expresados en total de m³ para el área de estudio durante el mes considerado

Períodos	CAH	Meses	pp(m ³)	Q(m ³)	R(Q/pp)
Periodo seco	CAH I	ENE	2153,8	335,8	0,16
		FEB	2559,9	435,4	0,17
1 ^{er} Periodo lluvioso	CAH II	MAR	4239,8	2033,0	0,48
	CAH III	ABR	6497,2	4960,2	0,76
		MAY	5427,2	3950,4	0,73
Transición lluvia-sequía	CAH II	JUN	2830,7	1051,7	0,37
	CAH I	JUL	1971,8	299,4	0,15
	CAH II	AGO	3589,7	1558,9	0,43
2 ^{do} Periodo lluvioso	CAH II	SEP	5175,5	2760,5	0,53
	CAH III	OCT	6398,2	4866,2	0,76
		NOV	6326,8	4798,5	0,76
Periodo seco	CAH I	DIC	2671,0	467,8	0,18

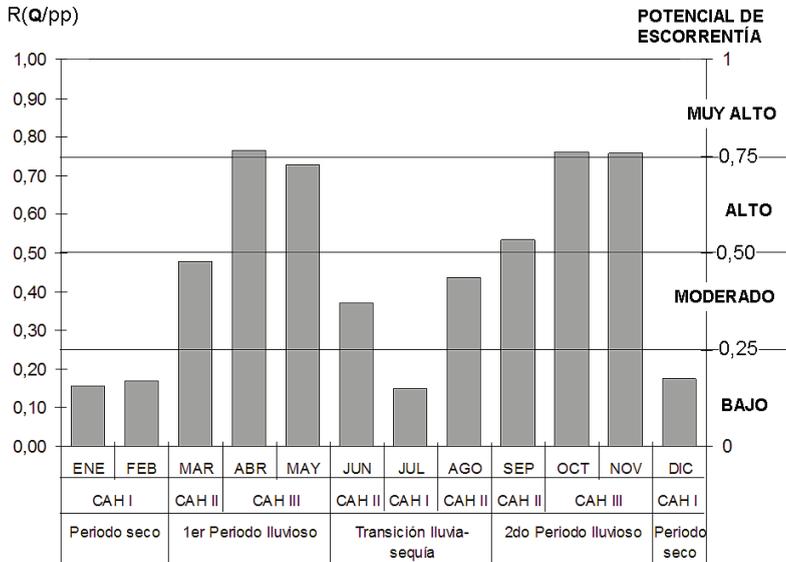


Figura 3. Distribución mensual del coeficiente de escorrentía R(Q/pp), y respectivo potencial de escorrentía, según los umbrales de escorrentía descritos en la sección 6.1

Los datos aportados por la figura 3, permiten las siguientes conclusiones preliminares:

- En el área en estudio y basado en datos promedios mensuales de precipitación, los valores extremos en cuanto a su potencial relativo de escorrentía son el mes de julio como el más bajo y los meses de abril, octubre y noviembre como los de mayor potencial.
- Los períodos de CAH I, cuyos meses enero, febrero, julio y diciembre son considerados de bajo potencial de escorrentía.
- Los coeficientes calculados para los meses de abril, octubre y noviembre franquean el umbral de muy alto potencial de escorrentía. Estos altos coeficientes se enmarcan en una CAH III, la cual pareciera ser más efectiva en

cuanto a potenciar el escurrimiento, en los meses de octubre y noviembre que durante abril y mayo, por lo que se denota que en el segundo período lluvioso existe una mayor sostenibilidad del potencial de escorrentía en el área.

- Probablemente la sostenibilidad del potencial de escorrentía y CAH III durante el segundo período lluvioso se debe a que éste es precedido por al menos dos meses (agosto, septiembre), de CAH II y coeficientes de moderado y alto de escurrimiento, mientras que en el primer período lluvioso, las CAH I de los meses inmediatos anteriores reducen la sostenibilidad del potencial de escorrentía al incrementar la capacidad de retención de los suelos del área. Merz y Blöschl

(2009), en un análisis regional del coeficiente de escorrentía, concluyen que la humedad del suelo tendría una mayor capacidad predictiva de la variabilidad temporal del coeficiente de escorrentía, que la precipitación inmediata antecedente. En tal sentido y para el área de estudio, la CAH de cada mes determina en mayor grado y en relación directa, la variación temporal del coeficiente de escorrentía que la precipitación registrada para el mismo mes.

- Como es de esperarse, la relación entre el coeficiente de escorrentía $R(Q/pp)$, la escorrentía $Q(m^3)$ y el total de precipitación $pp(m^3)$, es directa proporcional, con coeficientes de correlación de Pearson del orden de 0,95 y 0,96 para las interrelaciones coeficiente de escorrentía / precipitación total, y coeficiente de escorrentía / escorrentía total, respectivamente (Anexo 4).
- El alto grado de asociación entre el coeficiente de escorrentía, la precipitación total y la escorrentía total, se debe a que el área de estudio es relativamente pequeña, el carácter promedio mensual de la data de entrada, la poca capacidad de infiltración que tienen los tipo suelo-cobertura y su buena condición hidrológica, particularmente las áreas impermeables, lo cual implica que toda agua de lluvia adicionada generara algún nivel de escorrentía inclusive bajo CAH I o de recarga de los suelos.
- La asociación ligeramente mayor en la relación coeficiente de escorrentía/ es-

correntía total, que con la precipitación total confirma el carácter determinante de la CAH en la variación temporal del coeficiente de escorrentía.

6.2 Representación cartográfica de los patrones de acumulación

La cartografía efectiva de la escorrentía superficial debe señalar la dirección y magnitud de su acumulación espacial así como su distribución temporal. Tal como se describe en la sección 5.3 (cálculo de la magnitud relativa de la acumulación y dirección de la escorrentía superficial mensual), cada mapa mensual de escorrentía superficial calculada, es multiplicado por el mapa de patrones de dirección y acumulación del drenaje del área, generando los mapas mensuales de magnitud de dirección/acumulación de la escorrentía. Los anexos 5.1 al 5.4 ilustran la distribución mensual de la precipitación, escorrentía y magnitud de la dirección/acumulación del escurrimiento, en el área de estudio, durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. La unidad de medida usada en estos anexos es mm equivalente a $1L/m^2$. Para una mejor visualización, la magnitud de la dirección/acumulación del escurrimiento fue escalada, para que solo las celdas que concentran más del 90% de la escorrentía total del área sean representadas. La interpretación de los anexos 5.1 al 5.4, sugiere las siguientes conclusiones preliminares:

- Todos los gráficos de escorrentía mostrados en los anexos muestran la potenciación de la escorrentía super-

ficial por las superficies impermeables presentes en el área de estudio.

- La dirección de la escorrentía es controlada enteramente por el patrón de dirección y acumulación del drenaje (Anexo 3), pero su magnitud depende del potencial de escurrimiento el cual, tal como se expuso en la sección 6.1, esta relacionado directamente con las CAH.
- Durante los períodos de CAH I (enero, febrero), (Anexo 5.1), la acumulación y generación de escorrentía se restringe a las coberturas impermeables del área, pero carecen de continuidad debido a las condiciones de recarga que presentan los suelos-cobertura restantes.
- Caso contrario, durante los meses que presentan CAH III, se genera la mayor magnitud de escurrimiento en el área de estudio tal como se observa en los anexos 5.2, y 5.3.
- La calle ubicada al pie de la pendiente actúa como colector de gran parte del escurrimiento del área.

7. Conclusiones

El presente trabajo demuestra la versatilidad del método del NC en la simulación del potencial de escorrentía de una vertiente, a partir de datos promedios mensuales de precipitación y bajo ambiente de SIG.

Para el área de estudio, la CAH de cada mes determina en mayor grado y en relación directa la variación temporal del coeficiente de humedad (R) que la precipitación registrada para el mismo mes.

La magnitud del escurrimiento (M) en el área tiene dos picos anuales, el primero durante el mes de abril (Anexo 5.2), el cual es ligeramente mayor al escurrimiento de octubre (Anexo 5.3); sin embargo, se considera que el escurrimiento es más sostenible durante este segundo pico debido a mejores CAH y coeficientes de escorrentía (R), (Figura 3)

El cómputo de los patrones de flujo y acumulación del drenaje a partir de un MED es aún una tarea a resolver debido a la falta de continuidad y desconexión de las celdas constituyentes de los patrones lineales de flujo, lo cual genera un modelo inacabado particularmente para el cálculo final de la escorrentía del área analizada.

La representación cartográfica de la magnitud de dirección/acumulación de la escorrentía [Anexos 5.1 a 5.4, (M)], podría ser un elemento de gran utilidad para la comprensión de los procesos de infiltración y erosión de vertientes. Por ejemplo, en los procesos de deslizamiento y colapso que ha sufrido esta vertiente en su parte más baja (Anexo 2), aunque intervienen otros factores, el modelado de la escorrentía se convierte en una adición importante dado su carácter dinámico, para el estudio de las causas de sitio que determinaron este movimiento de masas.

8. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el CD-CHTA de la Universidad de Los Andes a través del proyecto NURR-C-525-10-01-B.

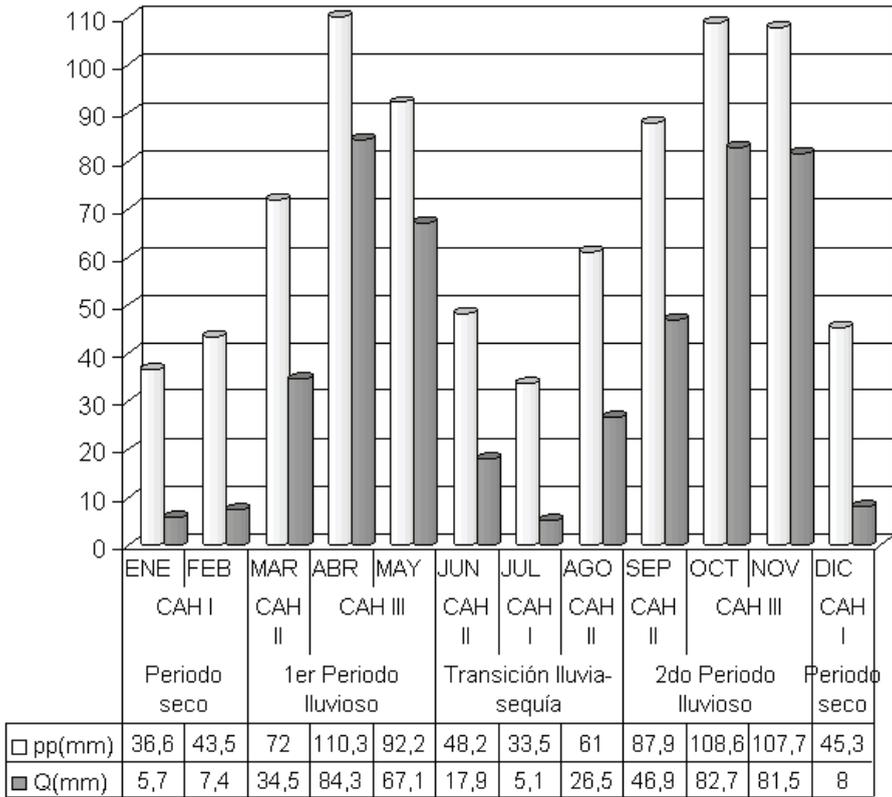
9. Referencias citadas

- ASHISH, P.; DABRAL, P. P.; CHOWDARY, V. M. & B. C. MAL. 2003. Estimation of runoff for agricultural watershed using SCS Curve Number and Geographic Information System. *Map India Conference*. Disponible en: <http://www.gisdevelopment.net/application/agriculture/soil/mi0348.htm> [última consulta, septiembre, 2009].
- CHAGAS, C. I.; SANTANATOGLIA, O.; CASTIGLIONI, M.; MASSOBRI, M.; BUJÁN, A. y C. IRURTIA. 2008. *Número de curva de escurrimiento para una microcuenca de pampa ondulada bajo labranza convencional y siembra directa*. **Ciencia del Suelo**. 26 (1): 63-69. Disponible en: http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_26n1/Chagas%2026%201.pdf [última consulta, octubre, 2009].
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R. & L. W. MAYS. 1988. **Applied Hydrology**, Series on Water Resources and Environment Engineering, McGraw Hill, 147p.
- FERRER O., C. 1987. *Influencia de las condiciones geomorfológicas en el desarrollo y expansión de la ciudad de Trujillo*. **Revista Geográfica Venezolana**. (28): 93-136.
- GARCÍA, M. & A. CAMARASA. 1999. *Use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM : Comparison between automated extraction and photointerpretation methods in the Carraixet catchment (Valencia, Spain)*, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. 1 (3-4): 187-195.
- GASPARI, F. J.; SENISTERRA, G. E. y R. MARLATS. 2007. *Relación precipitación-escoorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo: cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina*. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias**. 39 (1): 21-28. Disponible en: <http://bdigital.uncu.edu.ar/fichas.php?idobjeto=1521> [última consulta, septiembre, 2009].
- GONG JIANYA & XIE JIBO. 2009. *Extraction of drainage networks from large terrain datasets using high throughput computing*, **Computers & Geosciences**. 35(2): 337-346.
- GUPTA P. K. & S. PANIGRAHY. 2008. *Predicting the spatio-temporal variation of run-off generation in India using remotely sensed input and Soil Conservation Service curve number model*. **Current Science**. 95 (11)
- HAWKINS, R.H.; HJELMFELT, A.T. & A.W. ZEVENBERGER. 1985. *Runoff probability, storm depth and curve numbers*, **Journal of irrigation and drainage engineering**. ASCE, 111 (4): 330-340.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC-GeoHMS). Disponible en: <http://www.hec.usace.army.mil/> [última consulta, julio 2012].
- JENSON, S. K. & J. O. DOMINGUE. 1988. *Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system análisis*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. 54(11): 1593-1600.
- KUMAR, P.; TIWARI, K. N. & D. K. Pal. 1991. *Establishing SCS Runoff Curve Number from IRS Digital Data Base*. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**. 19(4): 245-251.
- LÓPEZ F. 1998. **Restauración hidrológica forestal y control de la erosión**. Inge-

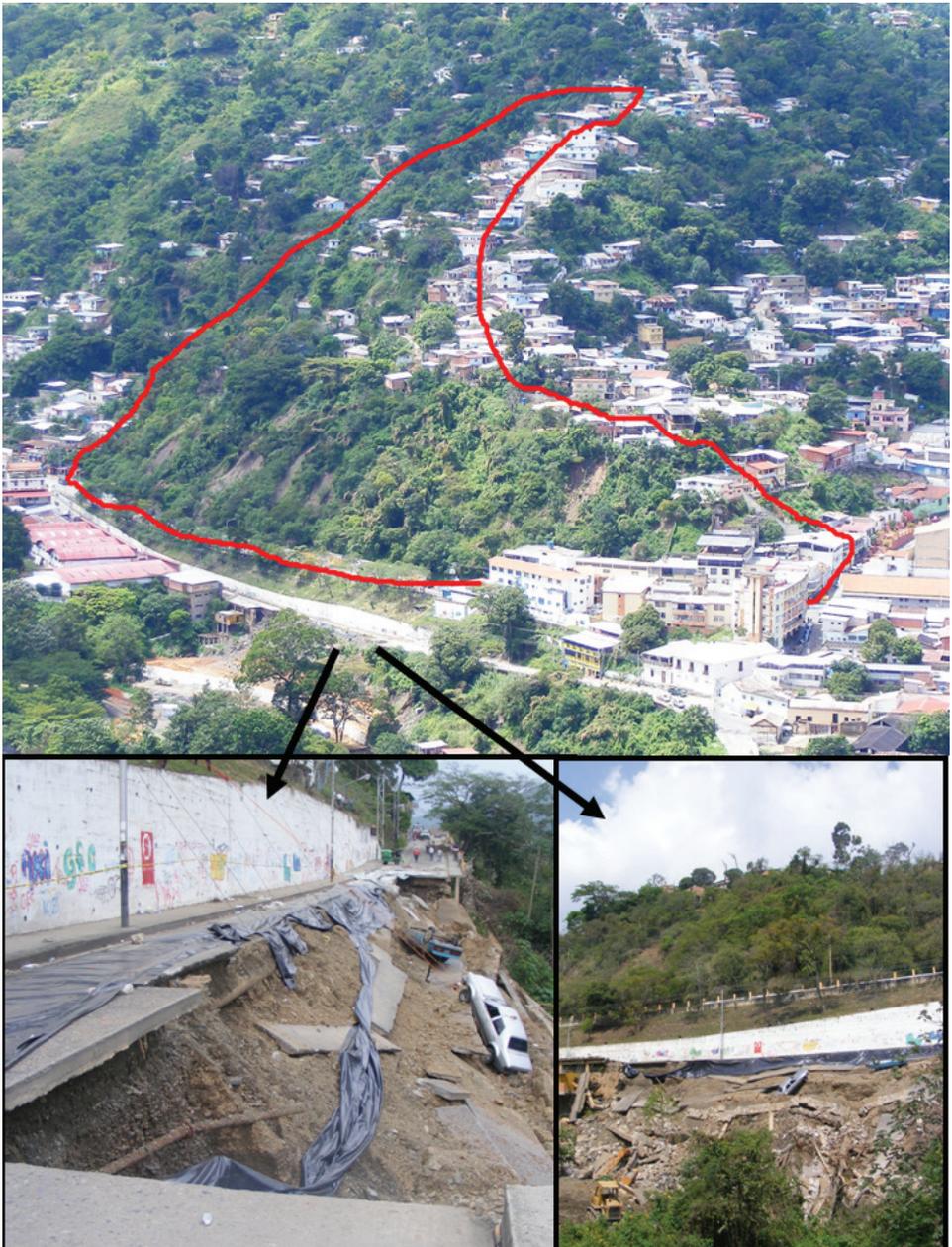
- nería Ambiental.** Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente, Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 902 p.
- LUO, M.; GUOAN, T. & D. YOUFU. 2008. Uncertainty of Flow Accumulation Threshold Influence in Hydrology Modeling - A Case Study in Qinling Mountain SRTM3 DEM Based, *Proceedings of the International Workshop on Education Technology and Training*, (2): 219-222, International Workshop on Geoscience and Remote Sensing.
- MERZ, R. & G. BLÖSCHL. 2009. A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria, **Water Resources Research**. (45) W01405, doi: 10.1029/2008WR007163.
- MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA EL AMBIENTE (MinAmb). 2009. *Datos mensuales de precipitación por estaciones, estado Trujillo, Venezuela*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Disponible en: http://www.inameh.gob.ve/web/index.php?pag=d_precipitacion&estado=trujillo [última consulta, octubre, 2009].
- MINISTRY OF AGRICULTURE SOIL CONSERVATION DEPARTMENT. 1972. **Handbook of Hydrology**, New Delhi-India.
- MOCKUS, V. 1949. *Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms*. Exhibit A in Appendix B, Interim Survey Report, Grand (Neosho) River Watershed. USDA, Washington DC.
- PANDEY, V. K.; PANDA, S. N. & S. SUDHAKAR. 2002. *Curve Number Estimation for Watershed using Digital Image of IRS-1D LISS-III*. Map Asia 2002. Diponible en: <http://www.gisdevelopment.net/technology/ip/techip013.htm> [última consulta, octubre, 2009].
- PECKHAM, S. D. 2008. *Geomorphometry and spatial hydrologic modelling*. In: Hengl, T. and Reuter, H.I. (Eds), **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Developments in Soil Science, chapter 25, (33): 461-479. Elsevier. Disponible en: http://csdms.colorado.edu/mediawiki/images/Peckham_2007_Geomorphometry_ch25.pdf [última consulta, noviembre, 2009].
- PIZARRO, R.; TAPIA, M.; ROMÁN, A.; JORDAN, C. y C. FARIAS. 2006. *Coficientes de escorrentía instantáneos para la cuenca del río Tutuvén, VII Región del Maule, Chile*. **Bosque**. 27(2): 83-91. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-92002006000200002&script=sci_arttext [última consulta, noviembre, 2009].
- PLUMMER, A. & D. WOODWARD. 1998. *The origin and Derivation of Ia/S in the Runoff Curve Number System*. **Water Resources Engineering**, American Society of Civil Engineers. Disponible en: http://www.wsi.nrcs.usda.gov/products/W2Q/H&H/docs/H&H_papers/curve_number/SCS_runoff_eqn_origin.pdf [última consulta, noviembre, 2009].
- PONCE, V. M. & R. H. HAWKINS. 1996. *Runoff curve number: Has it reached maturity?* **Journal of Hydrologic Engineering**. 1(1): 11-19.
- PURDUE RESEARCH FOUNDATION. 2004. *SCS Curve Number Method*. Disponible en: <http://www.ecn.purdue.edu/runoff/documentation/scs.htm> [última consulta, septiembre, 2009].
- ROA, J.G. 2006. *Aproximación al mapa de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos de la ciudad de Trujillo, Venezuela*. **Ágora**. 9 (17):185-205. Disponible

- en: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/17651/2/articulo8.pdf> [última consulta: octubre, 2009].
- RUMMAN, N.; LIN, G. & LI, J. 2005. Investigation of GIS-based surface hydrological modeling for identifying infiltration zones in a urban watershed, **Environmental Informatics Archives**. (3): 315-322, EIA05-040, ISEIS Publication series Number P002, ISEIS - International Society for Environmental Information Sciences. Canada.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). 1993. **National Engineering Handbook**. Section 4: Hidrology. USDA, Washington, DC.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS, now NRCS). 1972. **National Engineering Handbook**. Section 4, Hydrology. U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C.
- SHERMAN, L. K., 1949. The unit hydrograph method. In o. E. Meizner (ed.) **Physics of the Earth**, Dover Publications, Inc. New York, NY. pp. 514-525.
- SILVA, L. G. A. 2002. *Clasificaciones de pisos térmicos en Venezuela*. Mérida. **Revista Geográfica Venezolana**. 43(2): 311-328.
- SOBHANI, G. 1975. *A review of selected small watershed design methods for possible adoption to iranian conditions*, MSc thesis, Utah State University, Logan. Utah.
- SORENSEN, R.; ZINKO, U. & J. SEIBERT. 2005. *On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations*, **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, 2, 1807-1834. Disponible en: www.copernicus.org/EGU/hess/hessd/2/1807/ [última consulta, octubre, 2009].
- TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. 2004. **Hydraulic Design Manual**. Disponible en: <http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/hyd.pdf> [última consulta, septiembre, 2009].
- WILSON, J & J. GALLANT. 2000. Secondary topographic attributes, In: **Terrain Analysis: Principles and Applications**, Chapter 4, John P. Wilson and John C. Gallant (Eds), pp 87-131, ISBN: 978-0-471-32188-0, Wiley New York.
- WOODWARD, D. E.; HAWKINNS, R. H.; JIANG R.; HIELMFELT, A. T.; Van MULLEM J. A. Jr., & Q. D .QUAN. 2003. Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. *ASCE Conference Proceedings*. 118, 308, DOI: 10.1061/40685(2003)308. Disponible en: <http://frontpage.et.byu.edu/ce531/Papers/CNInitialAbstraction.pdf> [última consulta, octubre, 2009].
- WOODWARD, D. E., & W.J. GBUREK. 1992. Progress report ARS/SCS runoff curve number work group. *Resúmenes del ASCE Water Forum*. 378-382. Nueva York-USA.
- XIANZHAO, LIU. & LI JIAZHU. 2008. *Application of SCS Model in Estimation of Runoff from Small Watershed in Loess Plateau of China*, **Chinese Geographical Science**, 18 (3): 235-241.
- 52°NORTH INITIATIVE FOR GEOSPATIAL OPEN SOURCE SOFTWARE GmbH. 2012. ILWIS 3.6. Disponible en: <http://52north.org/communities/ilwis/about> [última visita, junio, 2012].

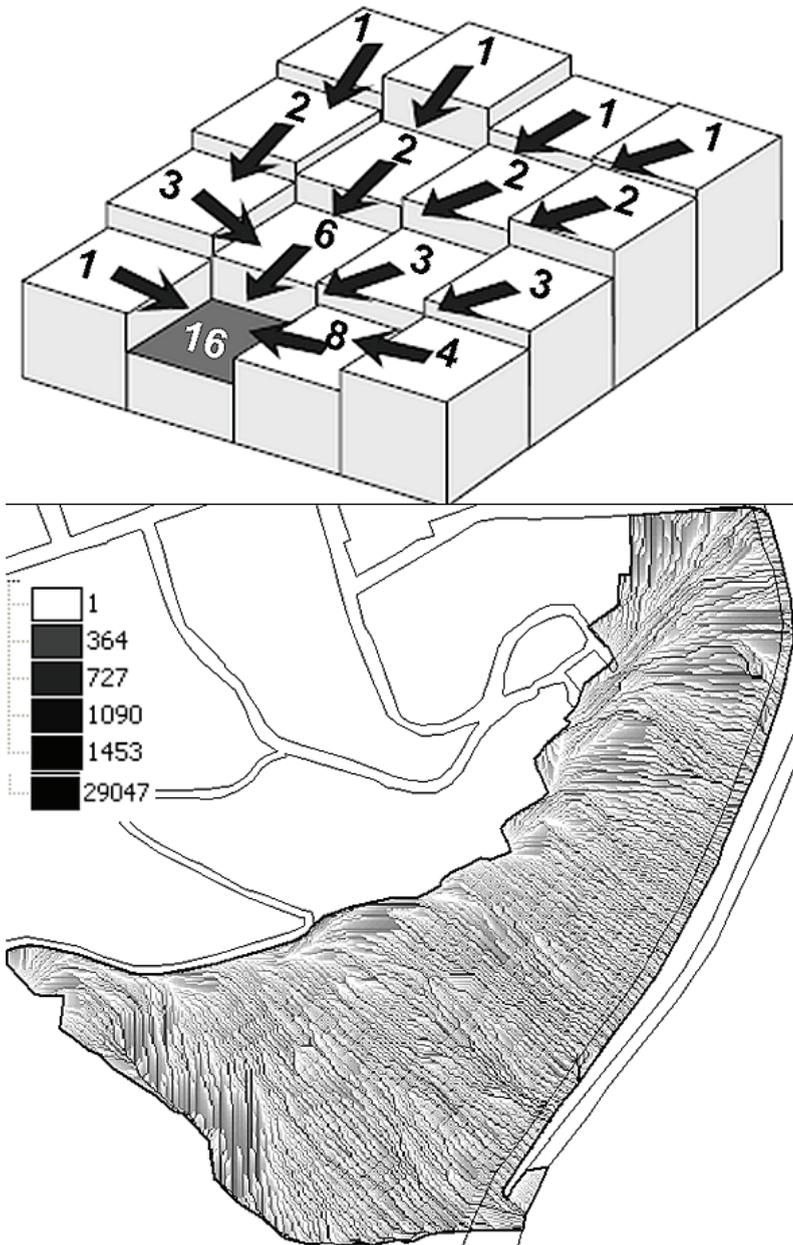
10. Anexos



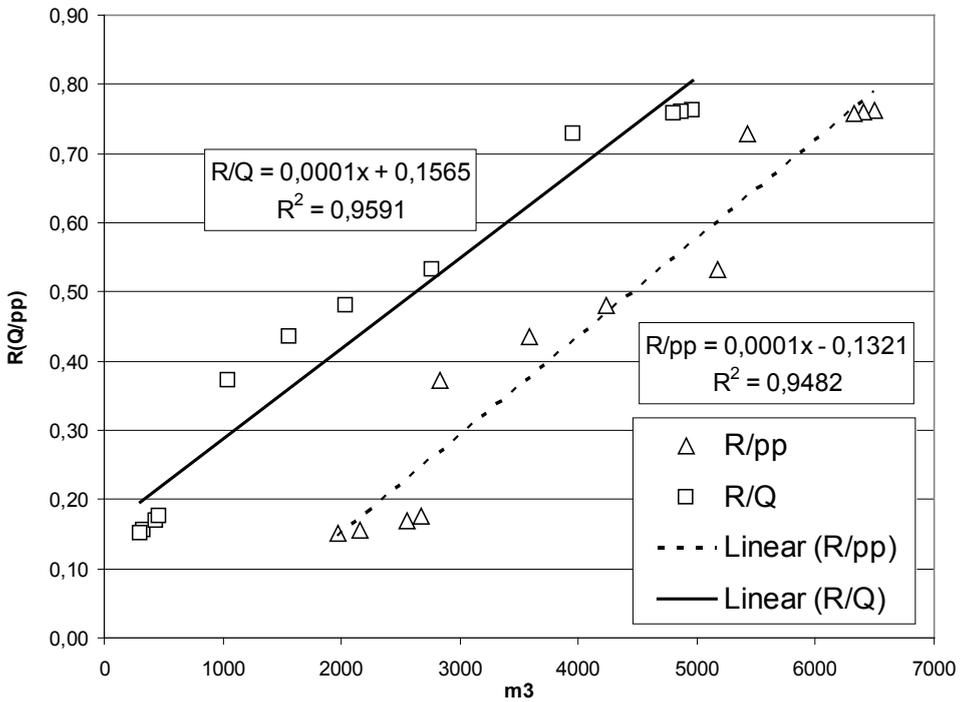
Anexo 1. Distribución media mensual de la precipitación (pp.) y escorrentía (Q) por periodos de lluvias y consecuente CAH, en el área de estudio



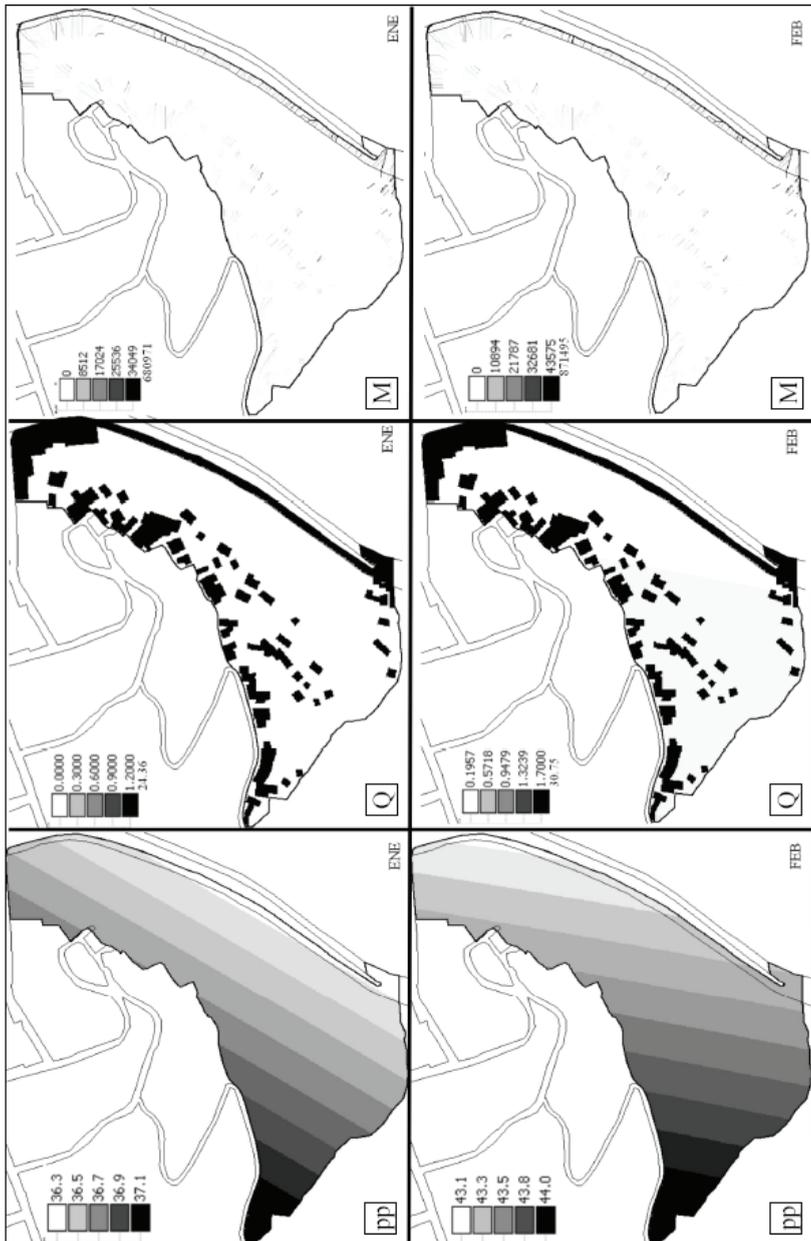
Anexo 2. Vista oblicua del área de análisis y deslizamiento traslacional (28/03/2008) al pie de la vertiente que ocasionó el colapso de la vialidad



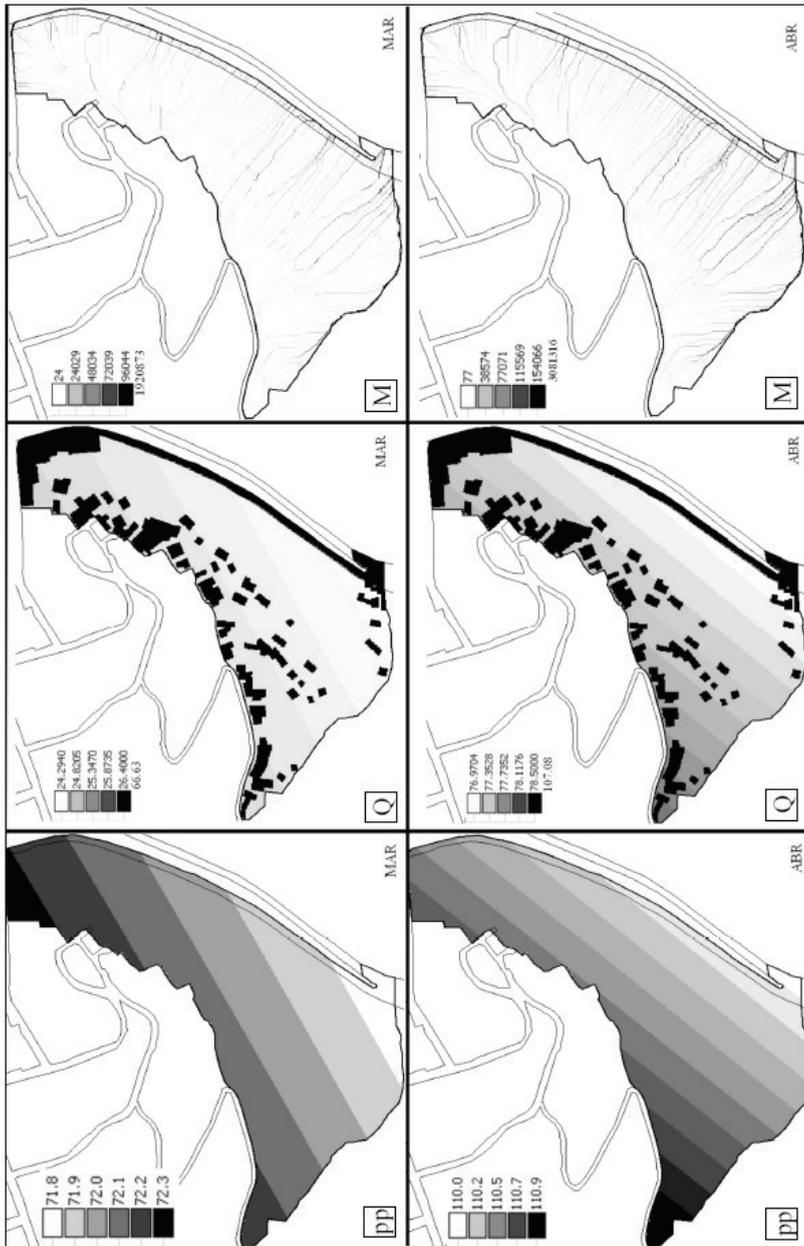
Anexo 3. En el gráfico superior un ejemplo del funcionamiento del algoritmo D8 (Jenson et al., 1988) para el cálculo de los patrones de dirección y acumulación del drenaje, el cual se basa en el conteo acumulativo de las unidades de áreas que drena hacia una dirección (dirección del flujo) y sitio común (acumulación del flujo). En el gráfico inferior la aplicación de este algoritmo en el área de estudio



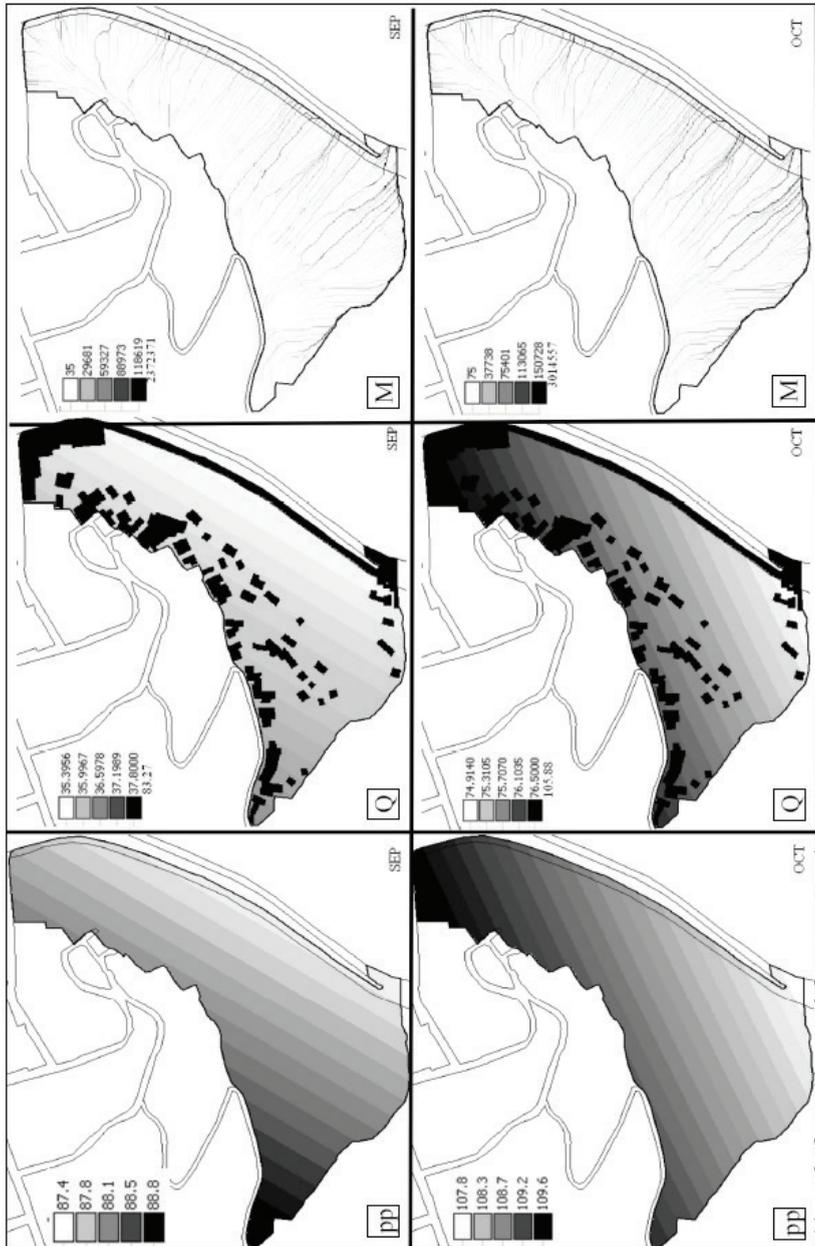
Anexo 4. Grafico relacional entre el coeficiente de escorrentía R(Q/pp), precipitación (pp) y escorrentía (Q), en el área de estudio. R/Q y R/pp son las relaciones lineales calculadas y R² el coeficiente de correlación de Pearson. Los valores de pp y Q están expresados en total de m³



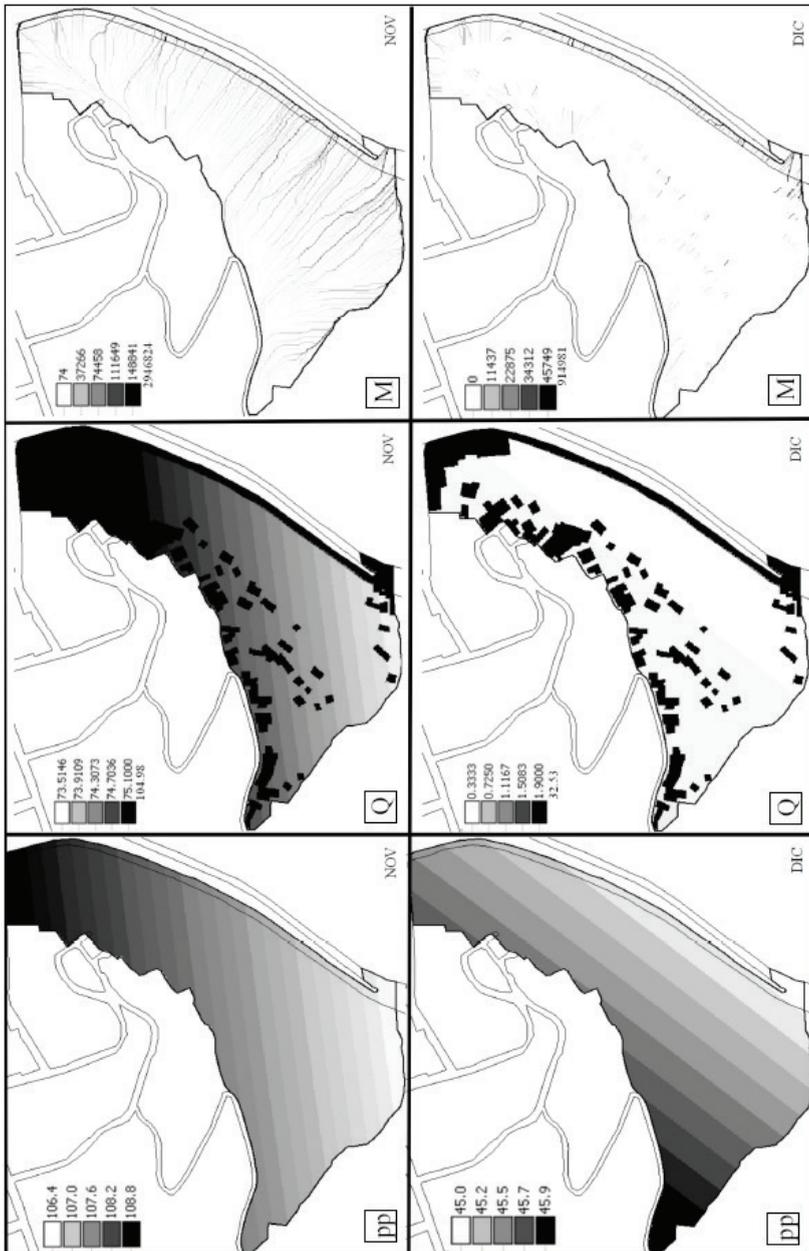
Anexo 5.1. Distribución de la precipitación (pp), escorrentía (Q) y magnitud de la dirección/acumulación del escurrimiento (M), expresada en mm (equivalente a 1L/m²), durante los meses de enero y febrero en el área de estudio. En la magnitud de la dirección/acumulación del escurrimiento se representan solo las celdas que concentran más del 90% de la escorrentía total del área para el mes determinado



Anexo 5.2. Distribución de la precipitación (pp), escorrentía (Q) y magnitud de la dirección/acumulación del escurrimiento (M), expresada en mm (equivalente a 1L/m²), durante los meses de marzo y abril en el área de estudio. En la magnitud de la dirección/acumulación del escurrimiento se representan solo las celdas que concentran más del 90% de la escorrentía total del área para el mes determinado



Anexo 5.3. Distribución de la precipitación (pp), escorrentía (Q) y magnitud de la dirección/acumulación del escurrimiento (M), expresada en mm (equivalente a 1L/m²), durante los meses de septiembre y octubre en el área de estudio. En la magnitud de la dirección/acumulación del escurrimiento se representan solo las celdas que concentran más del 90% de la escorrentía total del área para el mes determinado



Anexo 5.4. Distribución de la precipitación (pp), escorrentía (Q) y magnitud de la dirección/acumulación del escurrimiento (M), expresada en mm (equivalente a 1L/m²), durante los meses de noviembre y diciembre en el área de estudio. En la magnitud de la dirección/acumulación del escurrimiento se representan solo las celdas que concentran más del 90% de la escorrentía total del área para el mes determinado