



Artículo: COMEII-16026

II CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016

Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

APLICACIÓN DEL PROCESO ANALÍTICO EN RED (ANALYTIC NETWORK PROCESS) PARA LA PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE

Adolfo López Pérez^{1*}; Mario R. Martínez Menes²

¹Director General. INGENMADS, Ingeniería y Gestión del Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable, S.A. de C.V., Emiliano Zapata No. 26, Lote 63, Emiliano Zapata (U.H. ISSSTE), Texcoco, Estado de México, CP. 56227. adolfoholp@gmail.com. (*Autor para correspondencia).

²Profesor-Investigador de Tiempo Completo. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Área de Manejo de Cuencas, Carretera México-Texcoco km. 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, CP. 56230.

Resumen

En esta investigación se desarrolló una metodología para la priorización de áreas de drenaje (a distintos niveles de intervención) usando el análisis multicriterio y los componentes y variables relacionadas con el grado de degradación de los suelos y el crecimiento del sistema de drenaje, tales como: morfometría, hipsometría, hidrología, estabilidad de laderas, cobertura vegetal y condiciones socioeconómicas. La morfometría e hipsometría se determinaron con ecuaciones propuestas por diversos autores a través de hojas de cálculo, la hidrología con el modelo SWAT, la estabilidad de laderas con el modelo SINMAP, la variación espacio-temporal de la cobertura vegetal con el cálculo del NDVI y las condiciones socioeconómicas con el Censo de Población y Vivienda para el año 2010. La metodología se implementó en la cuenca del río Huehuetán, cerca de la frontera entre México y Guatemala; se encontró que el Proceso Analítico en Red es una herramienta que permite la priorización de áreas de drenaje a distintos niveles de intervención considerando los factores asociados a la degradación de los suelos y crecimiento del sistema de drenaje; además, permitió definir la prioridad de las subcuencas y determinar aquellos componentes y variables que tienen mayor influencia en la problemática de las mismas. Con estos resultados se pueden elaborar planes de manejo acordes a la situación actual de las áreas de intervención y permite a los tomadores de decisiones desarrollar proyectos en áreas prioritarias que tendrán un mayor impacto con la menor inversión.

Palabras clave: Priorización, cuenca, subcuenca, Proceso Analítico en Red.



Introducción

La degradación de los recursos naturales en México está influenciada tanto por procesos naturales como por actividades antropogénicas, entre estas últimas se incluyen el cambio de uso del suelo, agricultura de laderas y las prácticas de manejo inadecuadas. Sin embargo, aunque ésta problemática está en todo el país, en el sur se manifiestan con un mayor impacto debido a la presencia de lluvias torrenciales originadas por tormentas y huracanes que se desarrollan en el Océano Atlántico y el Pacífico.

La cuenca del río Huehuetán, ubicada en la Costa de Chiapas cerca de la frontera con Guatemala, por su localización geográfica está expuesta a la presencia de estos eventos hidrometeorológicos extremos de forma constante, los cuales generan problemas tanto en la parte alta como en la baja. En la parte alta se presentan deslizamientos en masa debido a las condiciones de relieve, intensidad de la lluvia y ausencia de la cobertura vegetal, lo cual destruye la infraestructura de caminos, de servicios y comunicaciones, inclusive de poblaciones que se encuentran establecidas en áreas vulnerables; por otro lado, en la parte baja, se tienen las inundaciones de los centros de población, de las áreas agrícolas y daños a la infraestructura de servicios, debido a la concentración de los escurrimientos superficiales en el cauce principal y al arrastre y transporte de los sedimentos hacia la parte baja lo cual azolva el cauce principal y disminuye la sección hidráulica del mismo ocasionando su desborde.

La problemática en la cuenca requiere de la implementación de programas y/o acciones encaminadas hacia la restauración hidrológica ambiental de cuencas, mediante programas integrales que permitan atender los cauces, laderas, áreas agrícolas, poblaciones, entre otras; sin embargo estas acciones deben ser específicas y dirigidas hacia áreas prioritarias para que las inversiones tengan un mayor impacto. De esta manera, se requiere de herramientas que ayuden a los tomadores de decisiones para la aplicación de las mejores prácticas y/o acciones de manejo en áreas prioritarias, con base en la situación actual de la cuenca.

La priorización de áreas de intervención se convierte entonces en una herramienta de mucha importancia en el manejo integral de cuencas ya que con base en los resultados que genera, es posible identificar aquellas áreas que requieren de la implementación de proyectos enfocados a la reducción de la degradación de los suelos y del crecimiento del sistema de drenaje en áreas específicas.

En esta investigación, la priorización de cuencas se realizó usando el análisis multicriterio, específicamente el Proceso Analítico en Red (*Analytic Network Process, ANP*), para priorizar con base en la función objetivo a partir de la interacción entre componentes y variables. Esta metodología identifica áreas de atención para la restauración hidrológica ambiental a nivel cuenca, subcuenca y/o microcuenca para elaborar planes de manejo y seleccionar prácticas y obras para

la rehabilitación de los sistemas de drenaje, mitigar la degradación de los suelos y prevenir los problemas de inundación en las partes bajas de la cuenca.

Materiales y métodos

Localización geográfica

La cuenca del río Huehuetán se ubica entre las coordenadas $14^{\circ} 52' 48''$ y $15^{\circ} 07' 58''$ Latitud Norte y $92^{\circ} 16' 12''$ y $92^{\circ} 39' 36''$ Longitud Oeste. Esta cuenca se localiza al sureste de la República Mexicana, sobre la vertiente del Océano Pacífico de la Sierra Madre de Chiapas y pertenece a la Región Hidrológica No. 23 Costa de Chiapas (Juárez *et al.*, 2009). La cuenca, hasta su salida al mar, tiene una superficie de 751.90 km^2 pero en este estudio se consideró solo el área definida por la estación hidrométrica (EH) Huehuetán (319.41 km^2) a la que en lo sucesivo se referirá como cuenca del río Huehuetán (Figura 1).

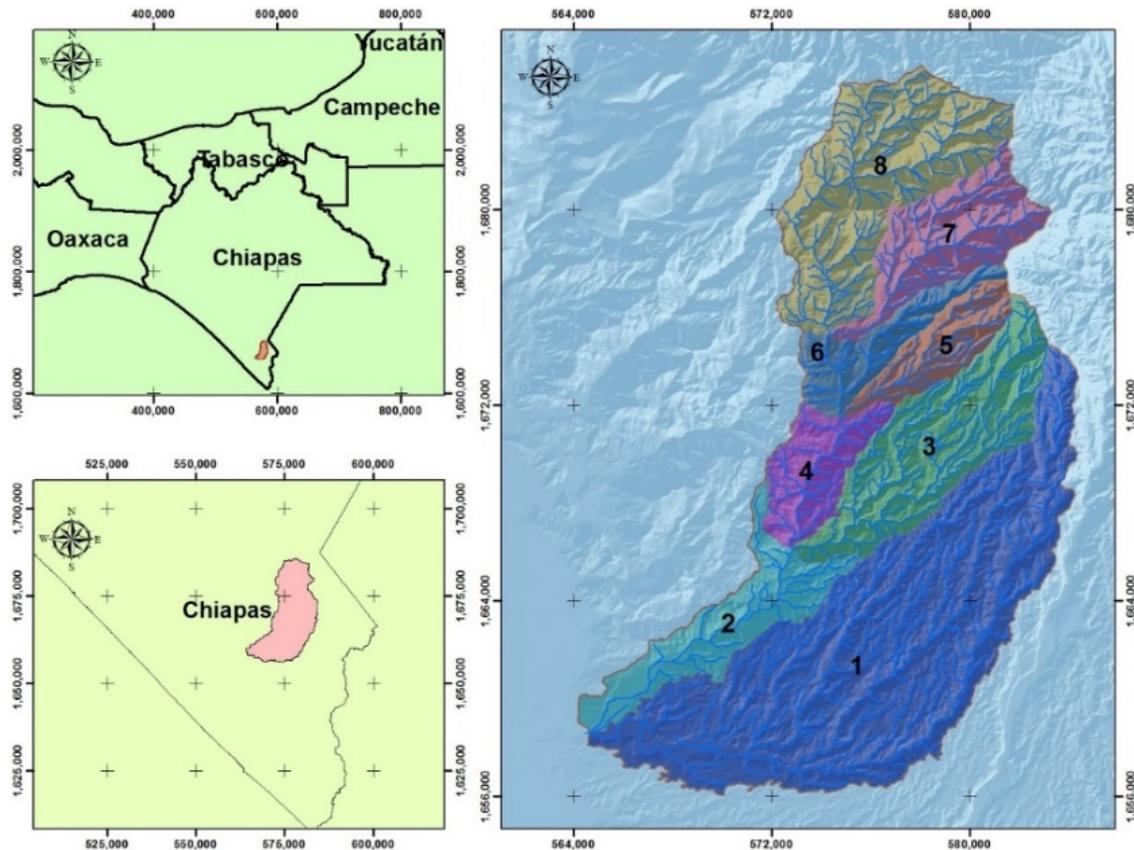


Figura 1. Localización y delimitación de la cuenca del río Huehuetán y sus subcuencas.

La delimitación de la cuenca del río Huehuetán y sus subcuencas se realizó a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con resolución de 15m obtenido de INEGI, aplicando la metodología de Otto Pfafsteter (Pfafsteter, 1989; Verdin y Verdin, 1999) con el apoyo del módulo de delimitación de cuencas del modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (Arnold *et al.*, 1998a).



Caracterización del medio biofísico

La cuenca del río Huehuetán tiene un desnivel de 2,660 m, en la parte baja se encuentran las áreas planas con pendientes menores al 3%, mientras que en la parte media y alta se encuentran relieves escarpados con pendientes que superan el 100%, lo que le confiere velocidades erosivas altas al escurrimiento superficial.

Debido a la variación altitudinal y al relieve en la cuenca, se tienen cuatro tipos de clima: (A)C(m) (semicálido húmedo), Am (cálido húmedo), Aw2 (cálido subhúmedo) y C(m) (templado húmedo). Las condiciones montañosas en la parte alta generan la presencia de lluvias de corta duración y alta intensidad, que ocasiona avenidas pico con altas probabilidades de inundación en las partes bajas. La precipitación anual varía entre 1,200 mm en la parte baja hasta los 3,500 mm en la parte media y alta; su distribución temporal está entre mayo a octubre con valores de lluvia mensuales mayores a 400 mm.

De acuerdo con la información obtenida de cartas edafológicas en escala 1:250,000 de INEGI, en la cuenca existen cuatro tipos principales de suelo: andosol, cambisol, litosol y luvisol. Los andosoles están ubicados en la parte alta donde se encuentra la vegetación forestal, los suelos cambisol y litosol se encuentran en la parte media y alta, sobre las áreas de producción del cultivo de café, principalmente. Los luvisoles están distribuidos en la parte baja de la cuenca, donde están establecidas todas las actividades agrícolas. El suelo que mayor superficie ocupa es el litosol con 11,684.81 ha (36.63%), seguido por los andosoles con 9,158.90 ha (28.71%), el 34.66% restante se distribuye entre los cambisoles y luvisoles, donde el primero tiene una superficie de 7,524.00 ha.

El río Huehuetán inicia cerca de los límites entre México y Guatemala, sus escurrimientos fluyen hacia el suroeste en dirección a Huehuetán, población establecida a su margen derecha. La corriente que le da origen al río Huehuetán, es el río Cuilco, al cual desemboca en su margen izquierda el río La Joya y posteriormente se unen el río Cuilco y Escocia formando la corriente principal denominada río Huehuetán (Guichard *et al.*, 2010). En su trayecto hacia la costa recibe un afluente en su margen derecha, el río Nexapa, al cual desembocan los ríos Santo Domingo, Chalito, Chalón y Caracol. Después de la confluencia con el río Nexapa, la corriente se pierde en la marisma de la costa chiapaneca y llega al Océano Pacífico (Juárez *et al.*, 2009).

Caracterización socioeconómica

La cuenca comprende los municipios de Motozintla, Huehuetán y Tapachula, siendo éste último el de mayor superficie con 23,365.40 ha que representa el 73.15%. Dentro de la cuenca se encuentran establecidas 183 comunidades, con una población total de 30,564 habitantes, siendo la ciudad de Huehuetán la más poblada con 7,755 personas censadas.

Análisis morfométrico de las áreas de drenaje

Las características de área (A), perímetro (P), longitud del cauce principal (L_c), longitud total de cauces (L_{tc}), pendiente del cauce principal (P_c), pendiente media de la subcuenca (P_{mc}), elevación mínima, media y máxima (E_{\min} , E_{med} , E_{\max}), desnivel (H), número total de cauces (L_u), tiempo de concentración (T_c) y número de orden (N_u), se obtuvieron con el modelo SWAT (Arnold *et al.*, 2012), las demás variables se estimaron utilizando hojas de cálculo. Estos valores se utilizaron para calcular los parámetros morfométricos lineales y de forma de las ocho subcuencas bajo estudio, los cuales tienen una relación estrecha con el proceso de degradación del suelo y la densidad de drenaje (Cuadro 1).

Cuadro 1. Ecuaciones utilizadas para determinar los parámetros morfométricos.

Parámetro	Ecuación	Autor	Año
Lineales			
Densidad de drenaje (km km^{-2})	$D_d = \frac{L_{tc}}{A}$	Horton	1945
Densidad hidrográfica (cauces km^{-2})	$D_h = \frac{L_u}{A}$	Horton	1945
Relación de bifurcación media	R_{bm} = promedio de la relación de bifurcación entre órdenes	Strahler	1957
Textura del drenaje (cauces km^{-1})	$R_t = \frac{L_u}{P}$	Horton	1945
Longitud del flujo superficial (km)	$L_g = \frac{1}{2D_d}$	Horton	1945
De forma			
Relación de elongación	$R_e = \frac{2}{L_c} \times \left(\frac{A}{\pi}\right)^{0.5}$	Schumn	1956
Relación de circularidad	$R_c = \frac{4\pi A}{P^2}$	Miller	1953
Coefficiente de compacidad	$C_c = 0.2821 \frac{P}{A^{0.5}}$	Gravelius	1914
Factor de forma	$R_f = \frac{A}{L_c^2}$	Horton	1932
Forma de la cuenca	$B_s = \frac{L_c^2}{A}$	Horton	1932

Las curvas hipsométricas de las subcuencas se determinaron mediante el uso de la aplicación CalHypso (Pérez-Peña *et al.*, 2009) para ArcGIS 9.3[®], la cual aplica las ecuaciones para la determinación de los momentos estadísticos (Harlin, 1978).

Obtención de los cambios de la cobertura vegetal

El NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) se obtuvo mediante dos imágenes de los satélites LANDSAT 5 TM y LANDSAT 8 OLI, de fechas 13/07/1993 y 20/07/2013, respectivamente. Se realizó la corrección atmosférica



para eliminar las interferencias debido a las condiciones atmosféricas y nubosidad. Los valores de NDVI se obtuvieron utilizando la ecuación (1) (Hayes, 1985).

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad (1)$$

Dónde: NDVI, es el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas; IRC (Infrarrojo Cercano) y R (Rojo), son las bandas usadas, siendo las bandas 4 y 3 para el sensor TM y las bandas 5 y 4 para el sensor OLI, respectivamente.

Se recortó el ráster de NDVI para cada subcuenca y se reclasificó en función de las clases de vegetación encontradas (baja, mediana y alta) para conocer la superficie ocupada por clase en cada uno de los periodos de tiempo. Con esta información se determinó el porcentaje de cambio de los valores de NDVI para los dos periodos de tiempo analizados.

Análisis hidrológico usando el modelo SWAT

Para estimar el comportamiento hidrológico de la cuenca y las subcuencas, se aplicó el modelo SWAT para conocer el escurrimiento superficial y el gasto pico a la salida de las diferentes áreas de drenaje, ya que estas variables influyen directamente sobre el proceso de degradación del suelo.

A partir de la delimitación de subcuencas, se recopiló la información que requiere el modelo como: el uso actual del suelo, tipo de suelo, condiciones climatológicas, propiedades físico-químicas de los suelos y el modelo digital de elevaciones. Para realizar la calibración del modelo, se revisó la información de la estación hidrométrica Huehuetán para un periodo de 34 años de registro de escurrimientos (1965-1998).

El escurrimiento superficial anual registrado en la estación Huehuetán desde 1965 a 1998 muestra que el valor máximo corresponde al volumen que se presentó al paso del huracán Mitch entre el 22 de octubre y 05 de noviembre de 1998. El volumen medio anual registrado para ese año fue de 4,901'574,820 m³; mientras que el escurrimiento promedio para el periodo de medición fue de 998'562,090 m³.

Determinación del índice de estabilidad y el grado de saturación del suelo

El índice de estabilidad se determinó mediante la aplicación del modelo SINMAP (Stability INdex MAPping) usando un modelo digital de elevaciones, parámetros de conductividad hidráulica, cohesión del suelo, ángulo de fricción interna y densidad del suelo e inventario de deslizamientos, ver Figura 2, (Pack *et al.*, 1998).

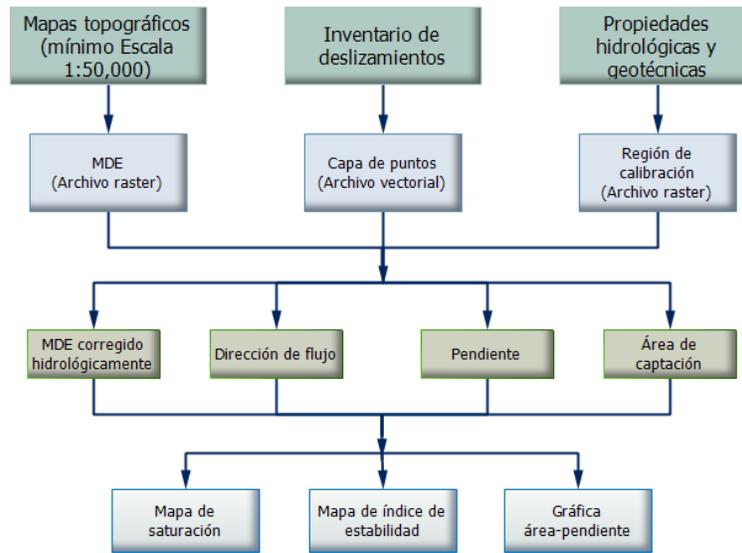


Figura 2. Diagrama de flujo de SINMAP
(Adaptado de El Naqa y Abdelghafoor, 2006).

El inventario de deslizamientos (Figura 3) se obtuvo a partir de imágenes de satélite para el año 2012, mediante verificación en campo; se usó también el programa Google Earth® en aquellos sitios en los que no se contó con imagen de satélite. Se definieron las áreas de los deslizamientos así como el tipo de deslizamiento.

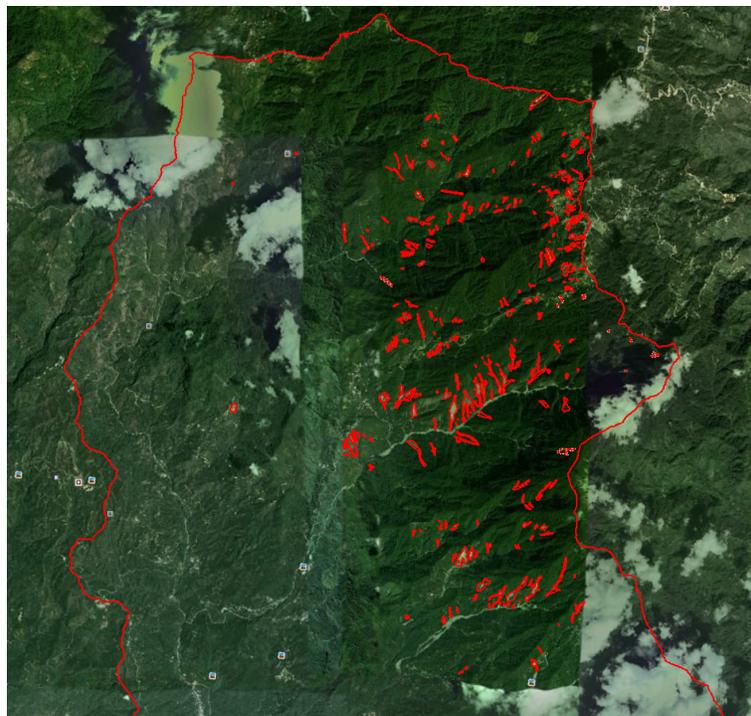


Figura 3. Área de deslizamientos en la parte alta de la cuenca del río Huehuetán.

Obtención de las condiciones socioeconómicas en la cuenca

Se utilizó la metodología desarrollada por Soares *et al.*, (2010) para determinar el Índice de Vulnerabilidad Social (IVS) en función de cuatro componentes con doce indicadores. Estos indicadores representan la vulnerabilidad de una comunidad para enfrentar las amenazas y riesgos derivados de lluvias extremas. Soares *et al.*, (2010) presenta una clasificación del IVS (Cuadro 2).

Cuadro 2. Categorías del Índice de Vulnerabilidad Social.

Clase	Categoría	Rango IVS
1	Muy Alta	0.8 – 1.0
2	Alta	0.6 – 0.8
3	Media	0.4 – 0.6
4	Baja	0.2 – 0.4
5	Muy Baja	0.0 – 0.2

De acuerdo con la información obtenida para cada uno de los componentes descritos anteriormente, se definieron los criterios que tienen influencia directa sobre el proceso de degradación. Los criterios eliminados tenían interacción con otros, lo cual permitía su obtención de forma indirecta; al eliminarlos se disminuyó el número de elementos a comparar que se utilizan en la matriz de comparaciones pareadas del Proceso Analítico en Red (Figura 4).

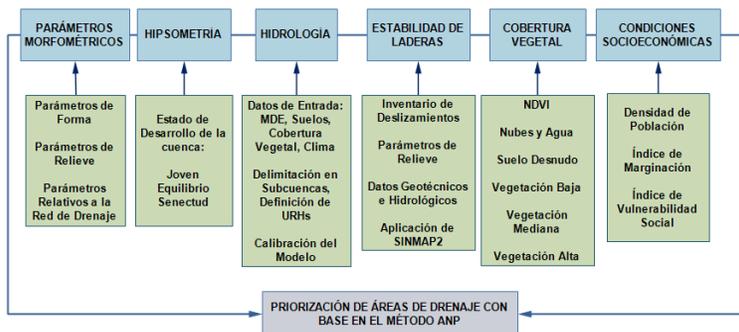


Figura 4. Esquema metodológico implementado en la cuenca

En la estructura del modelo ANP, los componentes y los criterios tienen interacción entre sí y están establecidos en un modelo en forma de red y no en orden jerárquico lineal (Saaty, 2001), de tal manera que se busca conocer el grado de dependencia e interrelación entre componentes y criterios (Figura 5); por lo tanto, con el modelo ANP es posible modelar el comportamiento del sistema hidrológico de las subcuencas cuando existe interacción entre estos.

Los resultados obtenidos de cada uno de los criterios y componentes, se entregó a expertos en los temas relacionados con la degradación de los recursos y el

manejo integral de cuencas, quienes emitieron juicios de valor para definir la interacción entre ellos y generar las matrices de comparaciones pareadas, respondiendo a las preguntas: ¿El criterio A tiene influencia sobre el criterio B?, como respuesta si=1, no=0, ¿Cuánta influencia tiene?, tomando en consideración la escala fundamental de Saaty (2001) que usa valores de 1 a 9.

Para la aplicación del modelo ANP en la cuenca del río Huehuetán, se programó una hoja de cálculo, se inició con la identificación de los componentes y variables así como la influencia entre estos, obteniéndose la Supermatriz de Dominación Interfactorial, después se realizaron las matrices de comparación pareadas para conocer la ponderación de las variables la cual generó la Supermatriz Original, a continuación se realizaron las matrices de comparación pareadas entre los componentes que dio como resultado la Supermatriz Ponderada; ésta última se multiplicó por sí misma para obtener la Supermatriz Límite, que muestra la priorización tanto de las subcuencas como de las variables (Aznar-Bellver y Guijarro-Martínez, 2012).

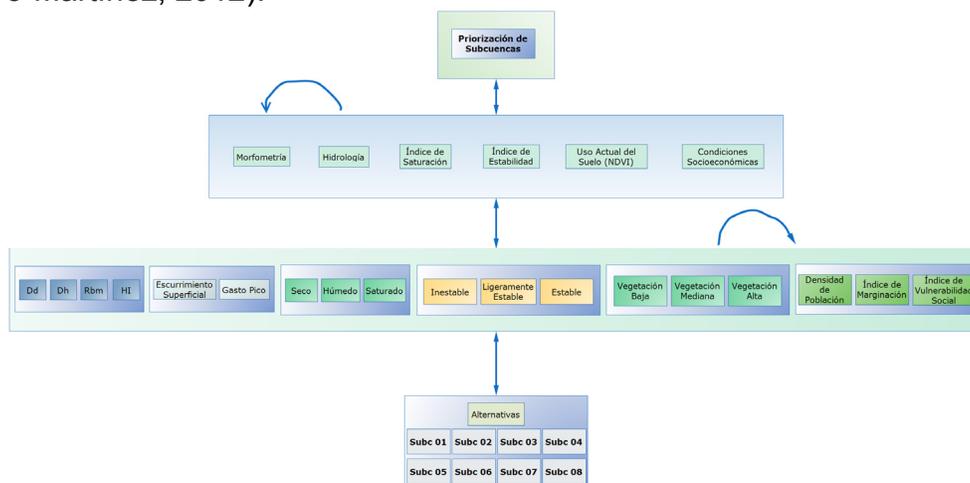


Figura 5. Interacción entre los componentes y los criterios de acuerdo al modelo ANP.

La aplicación del ANP permitió identificar las áreas prioritarias dentro de la cuenca, con base en los componentes usados y también se logró identificar a las variables que influyen en el proceso de degradación del suelo y el crecimiento de drenaje en las subcuencas.

Análisis y discusión de resultados

Resultados obtenidos para los criterios seleccionados

A partir de la implementación de los métodos para obtener los valores para cada criterio (Cuadro 3), se generaron las matrices que se requieren para la aplicación del modelo ANP y se realizó el análisis de la información obtenida.

Las subcuencas del área de estudio presentan alta densidad hidrográfica (Dh), principalmente la subcuenca siete ubicada en la parte alta, que podría estar asociada con fuertes pendientes y movimientos en masa que incrementan la red

de drenaje. Este parámetro (D_h) influye en la D_d y en la R_{bm} y finalmente en la priorización de éstas áreas. La integral hipsométrica indica que las áreas de drenaje de la cuenca están entre las fases de madurez a senectud, siendo las subcuencas maduras las que están más expuestas a los procesos erosivos en comparación con las subcuencas que se encuentran en la fase de senectud.

Con relación a la hidrología, la subcuenca cinco fue la que reportó el mayor volumen promedio anual escurrido, seguida de las subcuencas siete y tres. El gasto pico fue mayor en la subcuenca uno, lo cual está estrechamente ligado a la superficie de ésta, le sigue en orden de importancia la subcuenca dos, debido a las condiciones de uso actual del suelo y a los grandes centros de población que están establecidos en esta subcuenca.

Cuadro 3. Valores de los criterios utilizados para la priorización de subcuencas

Componente	Criterio	Subcuencas							
		01	02	03	04	05	06	07	08
Morfometría	Dd (km/km ²)	4.78	3.92	5.17	5.07	5.34	5.84	5.60	5.41
	Dh (cauces/km ²)	11.54	7.68	12.14	11.59	12.58	14.53	16.01	14.27
	Rbm (adim.)	4.99	3.45	4.57	4.35	3.99	4.38	4.30	4.14
	IH (%)	21.90	34.48	31.33	50.02	34.67	21.76	54.25	49.02
Hidrología	Esc (mm)	817.38	716.43	1,049.03	947.70	1,166.94	955.89	1,092.34	907.11
	Qp (m ³ /s)	23.52	20.19	16.58	5.62	7.11	11.85	14.38	21.46
Índice de Estabilidad	I (ha)	125.30	16.67	178.82	22.60	188.90	105.36	501.45	657.44
	LE (ha)	1,927.23	379.58	1,468.28	379.88	690.60	467.77	1,468.08	2,824.78
	Est (ha)	10,897.30	2,156.01	2,511.51	1,254.04	543.39	851.64	622.35	1,687.99
Índice de Saturación	Se (ha)	3,748.05	550.34	1,852.38	530.49	759.95	624.03	1,456.72	2,672.53
	H (ha)	5,643.32	1,194.11	1,759.75	885.54	529.42	627.92	941.73	2,047.11
	Sa (ha)	3,558.46	807.81	546.48	240.49	133.52	172.82	193.43	450.57
NDVI	VB (ha)	-4.41	45.72	1.98	5.58	29.43	28.71	147.51	189.63
	VM (ha)	382.41	115.02	195.93	41.31	105.93	82.35	603.45	970.92
	VA (ha)	-334.98	-179.64	-177.30	-48.15	-135.09	-111.15	-771.12	-1,174.59
Condiciones Socioeconómicas	DP (hab/km ²)	1.02	3.60	0.55	0.44	0.61	1.33	0.25	0.36
	IM (adim.)	15.33	15.47	18.25	18.22	16.24	14.90	18.55	17.10
	IVS (adim.)	0.52	0.52	0.50	0.49	0.43	0.53	0.45	0.55

Donde: Dd, es la densidad de drenaje; Dh, es la densidad hidrográfica; Rbm, es la relación de bifurcación media; IH, es la integral hipsométrica; Esc, el escurrimiento superficial promedio anual; Qp, es el gasto pico; I, es el criterio inestable; LE, es la variable ligeramente estable; Est, es la variable estable; Se, es la variable seco; H, es la variable húmedo; Sa, es la variable saturado; VB, VM, VA, son las variables de vegetación baja, media y alta respectivamente, los valores positivos indican ganancia de cobertura en esa clase y valores negativos indican pérdida de vegetación en esa clase; DP, es la densidad de población; IM, es el índice de marginación; y IVS, es el índice de vulnerabilidad social.

La tendencia de la pérdida de cobertura vegetal, en sus diversas clases, para cada una de las subcuencas se mantuvo, ya que la variación temporal indica que todas las subcuencas disminuyeron su cobertura vegetal alta e incrementaron su vegetación mediana. Los mayores cambios ocurrieron en las subcuencas siete y ocho con pérdidas de vegetación alta de 29.76% y 22.72%, respectivamente e

incrementos de la vegetación mediana para las mismas subcuencas en 23.79% y 18.78%, respectivamente.

Las condiciones de estabilidad en cuenca indican que el 64.28% de la superficie es estable (Cuadro 3); sin embargo la estabilidad de las laderas se distribuye proporcionalmente con las condiciones de relieve; de esta forma, en la parte baja dominan áreas estables, mientras que en la parte alta existen más áreas inestables y es donde el relieve escarpado está presente.

Las áreas con mayor grado de saturación del suelo están en la parte baja y cercana a los cauces (Figura 6); sin embargo, en la parte alta, la combinación de este índice con la pendiente, precipitación, cobertura vegetal y tipo de suelo, incrementan el riesgo potencial a deslizamientos. Debido a las condiciones de relieve en la parte alta, no se presentan áreas saturadas en las laderas, lo cual indica que los procesos como escurrimiento superficial y transporte de sedimentos son mayores; mientras que en la parte baja, se presentan procesos de acumulación de los escurrimientos y sedimentos debido a las bajas pendientes.

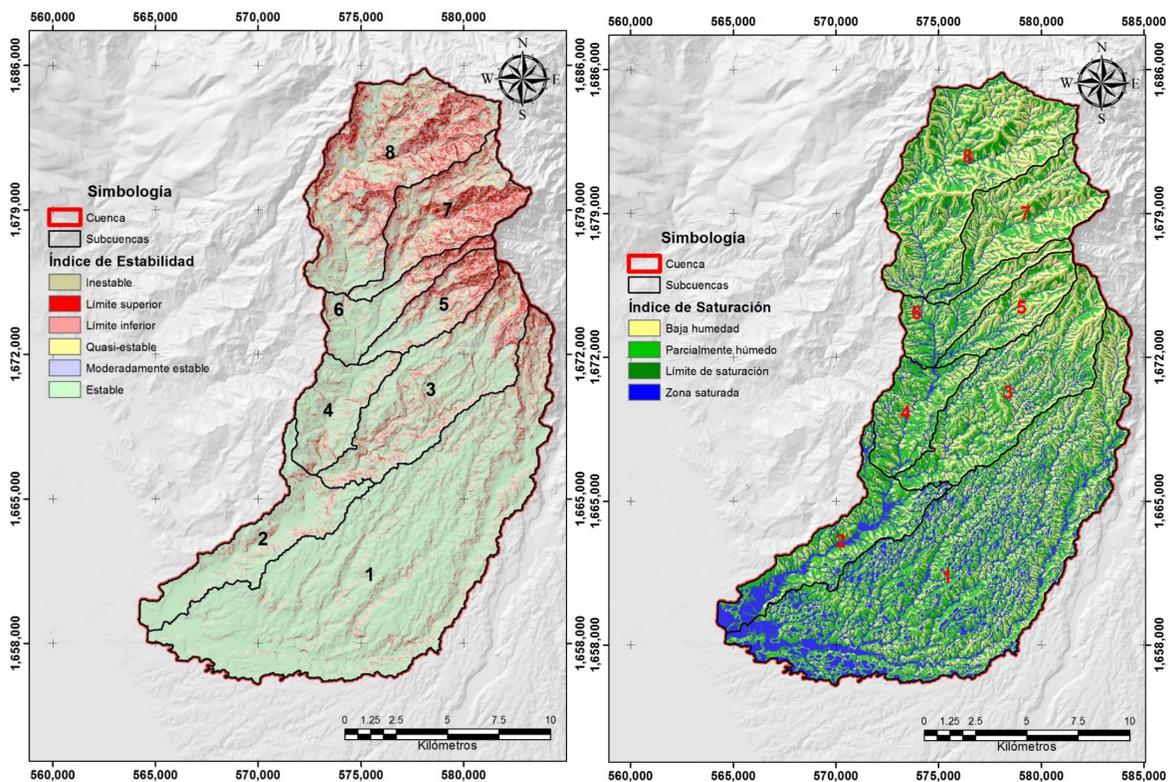


Figura 6. Distribución espacial del índice de estabilidad (izq.) y del grado de saturación del suelo (der.).

Priorización de subcuencas mediante ANP

El Cuadro 4 muestra la interrelación e interdependencia que existe entre los criterios utilizados, además de la relación directa con las subcuencas o



alternativas que están asociadas con la función objetivo (priorización de subcuencas).

Cuadro 4. Valores obtenidos para la Supermatriz de Dominación Interfactorial

MATRIZ DE DOMINACIÓN INTERFACTORIAL		Morfometría				Hidrología			Índice de Estabilidad			Índice de Saturación			NDVI			Condiciones Socioeconómicas			Alternativas							
		Dd	Dh	Rbm	IH	Esc.	Qp	I	LE	E	Se	H	Sa	VB	VM	VA	DP	IM	IVS	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	
Morfometría	Dd	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Dh	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Rbm	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	IH	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hidrología	Escurrimiento (E)	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Qpico (Qp)	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
Índice de Estabilidad	Inestable (I)	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Ligeramente estable (LE)	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Estable (E)	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
Índice de Saturación	Seco (Se)	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Húmedo (H)	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Saturado (Sa)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
NDVI	Vegetación baja (VB)	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Vegetación media (VM)	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Vegetación alta (VA)	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Condiciones Socioeconómicas	Densidad de población (DP)	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Índice de marginación (IM)	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Índice de Vulnerabilidad Social (IVS)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Alternativas	Subc. 01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Subc. 02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
	Subc. 03	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	Subc. 04	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	
	Subc. 05	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	
	Subc. 06	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	
	Subc. 07	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	
	Subc. 08	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	

Con base en los resultados obtenidos por el modelo ANP, se logró identificar la importancia de las variables y de los componentes sobre el proceso de degradación de los recursos. Con esta información se encontró la **priorización de las variables** que influyen sobre las condiciones actuales de la cuenca o las subcuencas, así como la **priorización de las subcuencas**. Estos resultados permiten a los tomadores de decisiones desarrollar planes de manejo de acuerdo a las necesidades en la cuenca o del área donde se pretende llevar a cabo un proyecto.

A partir de los valores obtenidos en la Supermatriz Límite, los valores correspondientes a cada celda se graficaron para obtener la importancia de las variables (Figura 7); de la misma forma se realizó para obtener la importancia o prioridad de las subcuencas. Para graficarlos, se separaron los componentes y las

alternativas y se ordenaron de mayor a menor valor, siendo directamente proporcionales al nivel de prioridad.

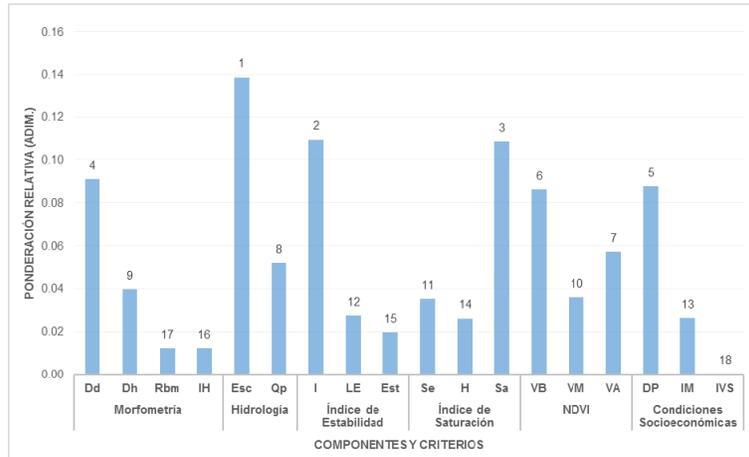


Figura 7. Prioridad o importancia de las variables dentro de la cuenca de estudio.

Esta información permite identificar hacia donde dirigir las acciones para mitigar los procesos de degradación y las necesidades de restauración hidrológica, haciendo énfasis en aquellas que estén relacionadas con la disminución de los escurrimientos, el transporte del mismo, así como la estabilidad de las laderas.

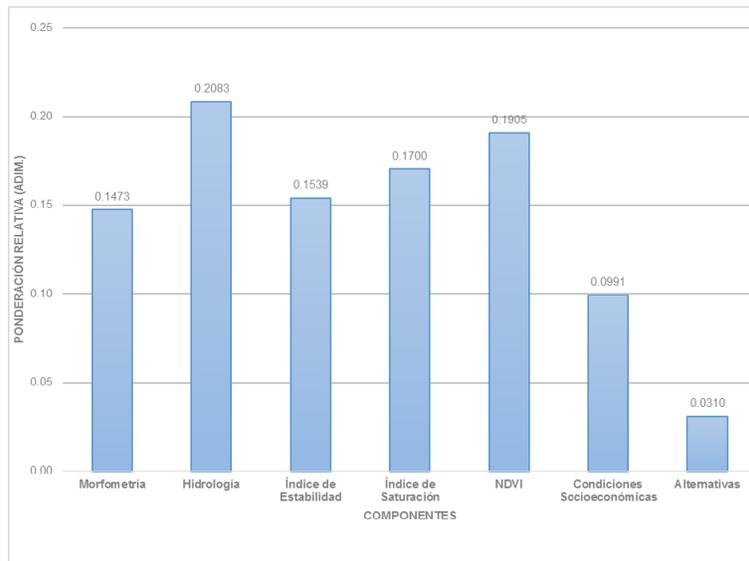


Figura 8. Importancia de los componentes empleados por el modelo ANP.

Los componentes utilizados para el análisis de la situación actual de la cuenca del río Huehuetán se muestran en la Figura 8, donde se aprecia que las condiciones hidrológicas representan un 20.83% seguidas de la variación de la cobertura vegetal con 19.05%. Con estos resultados es posible identificar aquellas áreas en las que los procesos de degradación de los suelos y el crecimiento de la red de drenaje han sufrido cambios inducidos por la alteración de estas variables y que repercuten sobre el comportamiento del sistema de la cuenca.

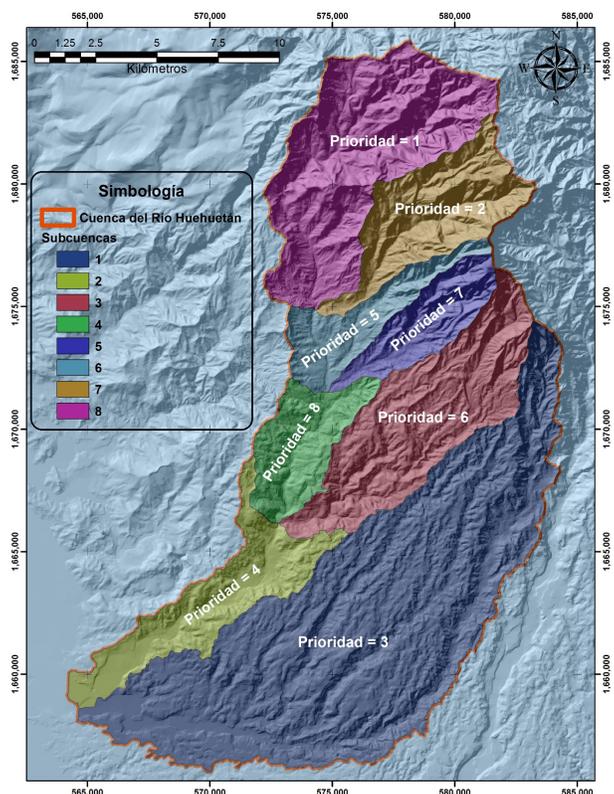


Figura 9. Mapa de priorización de subcuencas con base en la aplicación del Proceso Analítico en Red (ANP).

La importancia de la priorización de las subcuencas y de los componentes y variables que tienen influencia sobre la función objetivo (priorización de áreas de drenaje con base en el proceso de degradación y el crecimiento del sistema de drenaje) está relacionada con la identificación de acciones dirigidas a mitigar aquellos factores que ocasionan el deterioro de los recursos. Sin embargo, la metodología también permite conocer la interacción entre las variables, de tal forma que es posible analizar las cuencas adyacentes a la estudiada eliminando aquellos componentes que no tienen relación directa sobre la priorización o aquellas variables que no aportan suficiente información para la priorización. Por ejemplo, esta metodología es posible de aplicarla en las cuencas de la Costa de Chiapas, debido a la similitud de condiciones en éstas áreas.

Conclusiones

La priorización de los componentes (morfometría, hidrología, estabilidad de laderas, cobertura vegetal y condiciones socioeconómicas) se puede realizar de forma independiente; sin embargo, su análisis interactivo entre componentes se realizó utilizando el modelo ANP debido a la facilidad del método y a la precisión de sus resultados. Con los resultados obtenidos, se facilita la toma de decisiones para definir las áreas en las que se requiere implementar los proyectos así como el tipo de proyecto necesario en el área con base en los componentes que tienen mayor influencia en la misma.



Referencias bibliográficas

- Arnold, J. G.; J. R. Kiniry; R. Srinivasan; J. R. Williams; E. B. Haney, and S. L. Neitsch. 2012. Soil and Water Assessment Tool. Input/Output Documentation, Version 2012, TR-439. Texas Water Resources Institute. 650 pp.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. and Williams, J. R. 1998a. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model Development. Journal of the American Water Resources Association. 34(1): 73-89.
- Aznar-Bellver, J. y F. Guijarro-Martínez. 2012. Nuevos métodos de valoración: Modelos Multicriterio. Universidad Politécnica de Valencia, 2da Ed. 280 pp.
- Guichard, R. D., J. J. Muciño P. y J. L. Arellano M. 2010. Hidrología, disponibilidad, calidad del agua y erosión hídrica en la cuenca del río Huehuetán, Chiapas. Asociación Mexicana de Hidráulica, Memorias del XXI Congreso Nacional de Hidráulica, Guadalajara, Jalisco.
- Harlin, J. M. 1978. Statistical moments of the hypsometric curve and its density function. J. of the Int. Association of Mathematical Geology, 10(1): 59-72 pp.
- Hayes, L. (1985) The Current Use of TIROS-N Series for Meteorological Satellites for Land-Cover Studies. International Journal of Remote Sensing, 6(1), 35-45.
- Juárez M. J., L. A. Ibáñez C., S. Pérez N. y J. L. L. Arellano M. 2009. Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos superficiales en la cuenca del río Huehuetán. Ingeniería Agrícola y Biosistemas 1(2): 69-76.
- Pack, R. T., Tarboton, D. G. and Goodwin, C. N. 1998. The Sinmap approach to Terrains Stability Mapping. Proceedings of 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver. Sin número de páginas.
- Pérez-Peña, J.V., J.M. Azañón and A. Azor. 2009. CalHypso: An ArcGIS ext. to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin in SE Spain. Computers & Geosciences, 35(6):1214-1223 pp.
- Pfafstetter, O., 1989. Classification of hydrographic basins: coding methodology, unpublished manuscript, Departamento Nacional de Obras de Saneamento, Brasil.
- Saaty, T. L. 2001. The Analytic Network Process. Decision Making with Dependence and Feedback, Pittsburg, RWS Publications



Soares, D., R. Romero y R. López. 2010. Índice de Vulnerabilidad Social. En: Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático. IMTA. 9-37 pp.

Verdin, K.L. and J.P. Verdin. 1999. A topological system for delineation and codification of Earth's river basins. *Journal of Hydrology*, 218: 1-12.