



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO  
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA PRIORIZACIÓN DE  
ÁREAS DE DRENAJE CON FINES DE RESTAURACIÓN  
HIDROLÓGICA AMBIENTAL DE CUENCAS**

**ADOLFO LÓPEZ PÉREZ**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

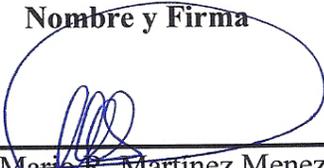
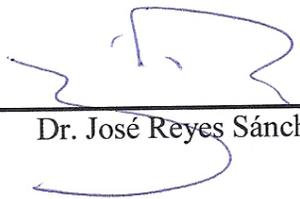
**2015**

La presente tesis, titulada “Análisis multicriterio para la priorización de áreas de drenaje con fines de restauración hidrológica ambiental de cuencas”, realizada por el alumno: Adolfo López Pérez, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**CONSEJO PARTICULAR**

<b>Cargo</b>	<b>Nombre y Firma</b>
Profesor Consejero	 Dr. Mario R. Martínez Menez
Asesor	 Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso
Asesor	 Dr. Jesús Chávez Morales
Asesor	 Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos
Asesor	 Dr. José Reyes Sánchez

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2015

## AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados que me permitió cumplir con una meta más en mi desarrollo profesional y por hacer de mí una persona de criterio y responsabilidad en cada una de las actividades que llevo y llevaré a cabo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haberme otorgado la beca que me permitió culminar con mis estudios sin problemas económicos.

Al Dr. Mario Roberto Martínez Menez por darme la oportunidad de conocer y aprender de sus experiencias relacionadas con el Manejo Integral de Cuencas y por su enorme calidad como ser humano.

Al Dr. Demetrio Salvador Fernández Reynoso por mejorar el documento de tesis con base en sus observaciones y comentarios, así como por el apoyo en la revisión de los resultados del modelo SWAT.

Al Dr. Jesús Chávez Morales por sus atinados comentarios relacionados con la investigación y por orientación y apoyo para la culminación del presente documento.

Al Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos de la Universidad Autónoma de Querétaro por formar parte de mi Consejo Particular y por apoyarme en la revisión de este documento.

Al Dr. José Reyes Sánchez de la Universidad Autónoma Chapingo por permitirme formar parte de su equipo de trabajo y su disposición para apoyarme en la culminación de esta investigación.

Al Dr. Jerónimo Aznar Bellver de la Universidad Politécnica de Valencia, España por su apoyo en la revisión de la hoja de cálculo para la aplicación del Proceso Analítico en Red.

Al Dr. Klaus D. Goepel de *Bussines Performance Management* en Singapore por sus comentarios para la orientación y el rumbo que tomó el avance de la investigación.

Al Dr. Gwo Shiung Tzeng de la Universidad de Kainan, Taiwan, quien me otorgó las facilidades para entender el funcionamiento del Proceso Analítico en Red y por el número de artículos enviados para su revisión y análisis, relacionados con la Toma de Decisiones Multicriterio.

## DEDICATORIA

*“El esfuerzo plasmado en este documento está dedicado al Dr. José Luíz Oropeza Mota<sup>†</sup>, a quien tuve la oportunidad de conocer como amigo y profesor y que siempre me apoyó para lograr mis objetivos de manera profesional y personal. Desafortunadamente ya no está con nosotros, pero siempre recordaré la calidad humana, la excelente persona y el gran maestro que siempre fue. Una persona de principios y un agudo compromiso con el manejo adecuado de los recursos naturales.”*

# ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE CON FINES DE RESTAURACIÓN HIDROLÓGICA AMBIENTAL DE CUENCAS

Adolfo López Pérez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2015

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se desarrolló una metodología para la priorización de áreas de drenaje con base en las condiciones actuales del área de estudio; se utilizaron los componentes que tienen relación directa sobre el proceso de degradación de los suelos y la alteración del sistema de drenaje tales como: morfometría, hidrología, estabilidad de laderas, grado de saturación del suelo, cobertura vegetal y condiciones socioeconómicas, combinados con el análisis multicriterio para la toma de decisiones, específicamente el Proceso Analítico en Red (ANP, *Analytic Network Process*). El estudio se realizó en la cuenca del río Huehuetán, ubicada en la región del Soconusco, Chiapas, México, la cual se delimitó en ocho subcuencas y se priorizó utilizando 18 criterios clasificados en seis componentes. La delimitación de la cuenca se realizó utilizando la metodología de Pfafstetter, con el apoyo del módulo de delimitación de cuencas del modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), la morfometría se determinó con hojas de cálculo, la hidrología se obtuvo mediante la aplicación del modelo SWAT, la estabilidad de laderas y el grado de saturación de los suelos se estimaron con el modelo SINMAP, el análisis espacio-temporal de la cobertura vegetal se realizó a través del NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para el periodo 1993-2013 y las condiciones socioeconómicas se calcularon a partir del Censo de Población y Vivienda del año 2010. Se encontró que la aplicación del Proceso Analítico en Red puede utilizarse para la priorización de áreas de drenaje a distintos niveles de intervención (región hidrológica, cuenca, subcuenca, microcuenca o unidad de escurrimiento) siempre que se tomen en consideración los componentes y criterios que más influyen sobre el proceso de degradación de los suelos y del crecimiento del sistema de drenaje. La metodología permitió definir el orden de intervención de las subcuencas, lo cual está asociado con la creación de planes de manejo con acciones específicas para cada subcuenca; esto permitirá proponer prácticas de conservación del suelo, agua y obras de control de azolves para reducir los procesos de erosión hídrica, el crecimiento del sistema de drenaje y la capacidad de transporte del flujo superficial en laderas y cauces. La metodología puede utilizarse como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones cuando se analizan diversos componentes con la finalidad de priorizar áreas de drenaje.

**Palabras clave:** Toma de decisiones multicriterio (MCDM), Proceso Analítico en Red (ANP), priorización de subcuencas, restauración hidrológica ambiental, cuenca, subcuenca.

# **PRIORITIZATION OF DRAINAGE AREAS BASED ON MULTICRITERIA ANALYSIS FOR HYDROLOGICAL AND ENVIRONMENTAL BASIN RESTORATION**

Adolfo López Pérez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2015

## **ABSTRACT**

In the present research work, a methodology was developed to prioritize drainage areas based on the current conditions of the study area. All the components that are directly related to the soil degradation process and the alteration of the drainage system were used. These processes include morphometrics, hydrology, hillside stability, degree of soil saturation, plant cover, and socioeconomic conditions, which were combined with the Multi-Criteria Decision Making, specifically the Analytic Network Process (ANP). The study was done in the Huehuetan river basin, located in the Soconusco region, Chiapas, Mexico, which was divided into eight watersheds and prioritized using 18 criteria, classified into six components. The delimitation of the basin was done using the Pfafsteter methodology, with support from the basin delimitation module of the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. Morphometrics was determined using spreadsheets, hydrology through the application of the SWAT model, hillside stability and the degree of soil saturation were estimated with the SINMAP (Stability Index MAPping) model, the space-time analysis of the plant cover was done using the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) for the 1993-2013 period, and the socioeconomic conditions were calculated from the Population and housing Census of 2010. We found that the application of the Analytic Network Process can be used to prioritize drainage areas at different levels of intervention (hydrological region, basin, watershed, sub-watershed, or hydrologic response unit), as long as we consider the components and criteria that influence most the soil degradation process and the growth of the drainage system. The methodology allowed to define the order of intervention on the drainage areas, which is associated with the creation of management plans with specific actions for each watershed. This will allow to propose soils and water conservation practices as well as sediment control works to decrease water erosion processes, the growth of the drainage system, and the runoff capacity in hillsides and streams. This methodology can be used as a support tool in decision making when analyzing several components in order to prioritize drainage areas.

**Key words:** Multicriteria Decision Making (MCDM), Analytic Network Process (ANP), watershed prioritization, hydrologic and environmental restoration, watershed, basin.



## CONTENIDO

CONTENIDO .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE CUADROS.....	x
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II. JUSTIFICACIÓN DE LA PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO III. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
3.1. METODOLOGIAS DE PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE A NIVEL CUENCA, SUBCUENCA Y MICROCUENCA .....	5
3.1.1. Priorización de Cuencas a Nivel mundial .....	5
3.1.2. Priorización de Cuencas en América Latina .....	8
3.1.3. Priorización de Cuencas en México .....	15
3.2. ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE ÁREAS DE DRENAJE .....	16
3.3. ANÁLISIS HIPSOMÉTRICO DE ÁREAS DE DRENAJE.....	22
3.4. INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIAS NORMALIZADAS (NDVI).....	23
3.5. ANÁLISIS HIDROLÓGICO UTILIZANDO EL MODELO SWAT .....	25
3.6. ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE LADERAS.....	27
3.6.1. El Modelo SINMAP ( <i>Stability INdex MAPping</i> ) .....	29
3.6.2. Modelos para el Análisis de Movimientos en Masa.....	29
3.7. TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO.....	33
3.7.1. Aplicación del Análisis Multicriterio .....	37
3.7.2. Proceso Analítico en Red (ANP) .....	38
3.7.3. Aplicaciones del Modelo ANP.....	41
3.8. IMPORTANCIA DE LA PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE.....	42
<b>CAPÍTULO IV. OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....</b>	<b>44</b>
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	44
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	44
4.3. HIPÓTESIS .....	44
<b>CAPÍTULO V. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>45</b>
5.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA .....	45
5.2. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO BIOFÍSICO .....	46
5.2.1. Fisiografía .....	46



5.2.2. Relieve .....	47
5.2.3. Climatología.....	49
5.2.4. Geología.....	52
5.2.5. Tipos de Suelo.....	52
5.2.6. Hidrología .....	54
5.3. <i>CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA</i> .....	59
5.4. <i>ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LAS ÁREAS DE DRENAJE</i> .....	63
5.5. <i>DETERMINACIÓN DEL NDVI EN LA CUENCA</i> .....	67
5.6. <i>ANÁLISIS HIDROLÓGICO MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO SWAT</i> .....	68
5.7. <i>DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTABILIDAD</i> .....	71
5.8. <i>PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE CON BASE EN EL PROCESO ANALÍTICO EN RED (ANP)</i> .....	75
5.8.1. Metodología del ANP .....	75
5.9. <i>PRIORIZACIÓN DE LA CUENCA UTILIZANDO EL MODELO ANP</i> .....	82
<b>CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>86</b>
6.1. <i>ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LAS SUBCUENCAS</i> .....	86
6.2. <i>ANÁLISIS HIDROLÓGICO CON EL MODELO SWAT</i> .....	89
6.3. <i>ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL NDVI</i> .....	91
6.4. <i>ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD Y SATURACIÓN DE LOS SUELOS EN LAS LADERAS DE LAS SUBCUENCAS</i> .....	95
6.5. <i>ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SOCIOECONÓMICA DE LA CUENCA</i> .....	99
6.6. <i>PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE UTILIZANDO EL PROCESO ANALÍTICO EN RED (ANP)</i> .....	100
<b>CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>117</b>
7.1. <i>CONCLUSIONES</i> .....	117
7.2. <i>RECOMENDACIONES</i> .....	118
<b>CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS.....</b>	<b>119</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1.	Esquema de priorización con base en indicadores de presión, estado y respuesta (CORPONARIÑO, 2008).....	10
Figura 3.2.	Esquema de priorización del IDEAM (IDEAM, 2011) .....	11
Figura 3.3.	Distribución de la curva hipsométrica. Strahler (1957) .....	23
Figura 3.4.	Evolución de la decisión multicriterio (MCDM), (Tzeng y Huang, 2011).....	35
Figura 3.5.	Evolución de MADM, (Tzeng y Huang, 2011) .....	36
Figura 5.1.	Localización de la cuenca y subcuencas hasta la EH Huehuetán.....	45
Figura 5.2.	Variación de las pendientes en la cuenca del río Huehuetán .....	47
Figura 5.3.	Distribución espacial de la precipitación (isoyetas) en la cuenca .....	50
Figura 5.4.	Climograma para la estación 7061, Finca Hamburgo .....	51
Figura 5.5.	Climograma para la estación 7075, Huehuetán.....	51
Figura 5.6.	Corte transversal sobre la cuenca del río Huehuetán y ubicación de los sitios de muestreo. Velescu, 2009 .....	54
Figura 5.7.	Red de drenaje de la cuenca del río Huehuetán .....	55
Figura 5.8.	Perfil longitudinal del cauce principal del río Huehuetán.....	58
Figura 5.9.	Curva hipsométrica obtenida para la cuenca del río Huehuetán .....	58
Figura 5.10.	Delimitación municipal de la cuenca del río Huehuetán y comunidades.....	59
Figura 5.11.	Diagrama de flujo del modelo SWAT (Adaptado de: Torres-Benites et al., 2004) .....	68
Figura 5.12.	Variación del escurrimiento medio anual en la estación Huehuetán.....	69
Figura 5.13.	Diagrama de flujo de SINMAP (Adaptado de: El Naqa y Abdelghafoor, 2006).....	71
Figura 5.14.	Área de deslizamientos en la cuenca del río Huehuetán. Google Earth, 2013.....	72
Figura 5.15.	Esquema de una estructura de decisión en red (Giner-Santoja, 2010).....	75
Figura 5.16.	Esquema metodológico implementado en la cuenca .....	82
Figura 5.17.	Esquema detallado de la interacción entre los componentes y los criterios con base en el modelo AHP .....	84
Figura 5.18.	Esquema de la interacción entre componentes y criterios tomados en consideración para la aplicación del modelo ANP .....	85
Figura 6.1.	Curvas hipsométricas para las subcuencas del río Huehuetán .....	88
Figura 6.2.	Variación espacial y temporal del NDVI en la cuenca .....	93
Figura 6.3.	Distribución de la estabilidad de laderas dentro de la cuenca del río Huehuetán .....	96
Figura 6.4.	Variación del índice de saturación en la cuenca del río Huehuetán.....	97
Figura 6.5.	Prioridad o importancia de las variables dentro de la cuenca de estudio .....	111
Figura 6.6.	Importancia de los componentes empleados por el modelo ANP.....	112
Figura 6.7.	Priorización de subcuencas con base en el Proceso Analítico en Red .....	113
Figura 6.8.	Mapa de priorización de subcuencas con base en la aplicación del Proceso Analítico en Red ....	115



## LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1.	Clasificación de los valores de NDVI.....	25
Cuadro 3.2.	Escala fundamental de Saaty de comparaciones pareadas. Saaty 1996.....	40
Cuadro 5.1.	Subcuencas delimitadas en la cuenca del río Huehuetán, hasta la EH Huehuetán .....	46
Cuadro 5.2.	Superficie ocupada en la cuenca, en función de la variación de la pendiente.....	48
Cuadro 5.3.	Estaciones meteorológicas utilizadas para la elaboración del mapa de isoyetas.....	49
Cuadro 5.4.	Propiedades físico-químicas de la capa superficial (horizonte Ah) de los suelos analizados para la cuenca del río Huehuetán. Velescu, 2009 .....	53
Cuadro 5.5.	Análisis morfométrico realizado para la cuenca del río Huehuetán.....	56
Cuadro 5.6.	Relación de bifurcación (Rb) y clasificación de las corrientes de acuerdo al número de orden ....	57
Cuadro 5.7.	Principales indicadores socioeconómicos en los municipios de la cuenca .....	60
Cuadro 5.8.	Indicadores e Índice de Desarrollo Humano.....	61
Cuadro 5.9.	Indicadores para la estimación de la Vulnerabilidad Social. Soares et al., 2010 .....	62
Cuadro 5.10.	Categorías del Índice de Vulnerabilidad Social, IVS. Soares et al., 2010 .....	62
Cuadro 5.11.	Parámetros morfométricos determinados en las áreas de drenaje.....	63
Cuadro 5.12.	Características principales de las subcuencas delimitadas.....	64
Cuadro 5.13.	Uso actual del suelo presente en la cuenca del río Huehuetán.....	70
Cuadro 5.14.	Clases de estabilidad con base en el factor de seguridad (FS). Pack et al., 2005.....	73
Cuadro 5.15.	Matriz de dominación interfactorial .....	76
Cuadro 5.16.	Influencia de $e_{12}$ y $e_{13}$ sobre $e_{11}$ .....	77
Cuadro 5.17.	Influencia de $e_{11}$ y $e_{13}$ sobre $e_{12}$ .....	77
Cuadro 5.18.	Matriz de dominación interfactorial donde aparecen las influencias de $C_1$ sobre $C_1$ cuantificadas .....	78
Cuadro 5.19.	Influencia de $e_{22}$ , $e_{23}$ y $e_{24}$ sobre $e_{11}$ .....	78
Cuadro 5.20.	Influencia de $e_{21}$ , $e_{23}$ y $e_{24}$ sobre $e_{12}$ .....	78
Cuadro 5.21.	Influencia de $e_{21}$ , $e_{22}$ , $e_{23}$ y $e_{24}$ sobre $e_{13}$ .....	78
Cuadro 5.22.	Matriz de dominación interfactorial con las influencias de $C_1$ y $C_2$ sobre $C_1$ .....	79
Cuadro 5.23.	Influencia de $e_{11}$ y $e_{12}$ sobre $e_{21}$ .....	79
Cuadro 5.24.	Influencia de $e_{11}$ , $e_{12}$ y $e_{13}$ sobre $e_{22}$ .....	79
Cuadro 5.25.	Influencia de $e_{12}$ y $e_{13}$ sobre $e_{23}$ .....	79
Cuadro 5.26.	Supermatriz original .....	80
Cuadro 5.27.	Matriz de comparación pareada de la influencia de los clústers $C_1$ y $C_2$ sobre los elementos del clúster $C_1$ .....	80
Cuadro 5.28.	Producto ponderación clústers y ponderación elementos de cada clúster.....	81
Cuadro 5.29.	Supermatriz ponderada (original estocástica).....	81
Cuadro 5.30.	Supermatriz límite .....	81
Cuadro 6.1.	Valores de los parámetros morfométricos para las subcuencas delimitadas.....	86



Cuadro 6.2.	Valores de la integral hipsométrica (IH) para la cuenca del río Huehuetán.....	88
Cuadro 6.3.	Valores del componente hidrológico de las subcuencas de la cuenca del río Huehuetán, según SWAT.....	89
Cuadro 6.4.	Valores de NDVI por clase de cobertura vegetal en la cuenca del río Huehuetán.....	91
Cuadro 6.5.	Superficie ocupada en cada clase de NDVI, para el año 1993.....	92
Cuadro 6.6.	Superficie ocupada en cada clase de NDVI, para el año 2013.....	92
Cuadro 6.7.	Variación del NDVI (1993-2013) en las subcuencas del río Huehuetán.....	93
Cuadro 6.8.	Superficie ocupada en función del índice de estabilidad.....	95
Cuadro 6.9.	Superficie ocupada por cada clase del grado de saturación del suelo.....	98
Cuadro 6.10.	Densidad de Población e Índice de Marginación para las subcuencas delimitadas.....	99
Cuadro 6.11.	Valores del IVS para las subcuencas dentro del área de estudio.....	99
Cuadro 6.12.	Valores de las variables utilizadas para la priorización de las subcuencas del río Huehuetán.....	101
Cuadro 6.13.	Valores obtenidos para la Supermatriz de Dominación Interfactorial.....	102
Cuadro 6.14.	Matrices de comparación pareada para el componente de morfometría, variable Dd.....	103
Cuadro 6.15.	Normalización para los valores obtenidos de $D_d$ en las subcuencas.....	103
Cuadro 6.16.	Supermatriz Original generada a partir de las matrices de comparación pareada.....	104
Cuadro 6.17.	Matriz de comparación pareada para conocer la influencia de los componentes sobre el componente MORFOMETRÍA.....	105
Cuadro 6.18.	Valores obtenidos para la Matriz de Comparación de Componentes a partir de las matrices de comparación pareadas entre componentes.....	105
Cuadro 6.19.	Supermatriz Ponderada obtenida a partir de la supermatriz original y la matriz de comparación de componentes.....	106
Cuadro 6.20.	Obtención del primer producto de la Supermatriz Límite a partir de la Supermatriz Ponderada.....	107
Cuadro 6.21.	Obtención del segundo producto de la Supermatriz Límite a partir de la Supermatriz Ponderada.....	108
Cuadro 6.22.	Obtención del tercer producto de la Supermatriz Límite a partir de la Supermatriz Ponderada.....	109
Cuadro 6.23.	Obtención del cuarto y último producto de la Supermatriz Límite a partir de la Supermatriz Ponderada.....	110



## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En México la degradación de los suelos está influenciada por las actividades antropogénicas como el crecimiento urbano, el cambio de uso del suelo y las prácticas de manejo. Este tipo de degradación, en las zonas costeras del sureste del país, se acelera con la presencia de lluvias torrenciales producto de los ciclones tropicales.

En la parte alta de la cuenca del río Huehuetán, ubicada al sureste del Estado de Chiapas y cercana a la frontera con Guatemala, en áreas con riesgo de deslizamientos, los pobladores realizan cambios de uso del suelo, establecen cultivos en laderas, efectúan sobrepastoreo y construyen centros de población. Este conflicto de uso del suelo deteriora los suelos de la cuenca y contamina sus aguas, lo cual reduce la productividad agropecuaria y fomenta la pérdida de bosques. La degradación en la parte alta de la cuenca ha aumentado la magnitud de los caudales y favorecido el crecimiento de los cauces por erosión, mientras que en la parte baja, la colmatación ha reducido la capacidad hidráulica de los cauces y ha ocasionado problemas de inundación.

Esta problemática requiere de la implementación de sistemas de restauración hidrológica y manejo de suelos en laderas vulnerables y con deterioro de los recursos naturales. Pero, debido al tamaño de la cuenca, no es posible atender toda su superficie, lo cual obliga a priorizar y delimitar zonas de atención a corto, mediano y largo plazo.

Existen diversas técnicas para identificar áreas prioritarias y, en las últimas décadas se han combinado con el uso de los Sistemas de Información Geográfica, lo cual, además de identificar áreas críticas, permite al usuario definir las acciones de manejo específicas. Del abanico de acciones que se pueden emprender en una cuenca, se necesita definir cuáles son las áreas prioritarias de atención, ya que los recursos económicos generalmente son limitados, por lo tanto se busca que la inversión tenga el mayor impacto posible en el área por atender.

La propuesta de priorización que se presenta en este documento contempla componentes relacionados directamente con la degradación de los recursos naturales, específicamente: morfometría, hidrología, cobertura vegetal, estabilidad de laderas y condiciones socioeconómicas.



En función del estado actual de la cuenca, la metodología incluye, para obtener polígonos prioritarios, el uso de los Sistemas de Información Geográfica en combinación con modelos hidrológicos y de estabilidad de laderas. La morfometría se obtuvo a partir del modelo de elevación digital de la cuenca y la red de drenaje; la hidrología se analizó aplicando el modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*); la estabilidad en laderas se realizó con el modelo SINMAP (*Stability INdex MAPping*); el análisis espacio-temporal de la cobertura vegetal se obtuvo mediante cambios de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y las condiciones socioeconómicas a partir de los índices que influyen sobre las condiciones sociales dentro de la cuenca. A partir de los resultados obtenidos, de cada componente, se aplicó el método conocido como Proceso Analítico en Red (*Analytic Network Process*) para conocer la importancia de cada uno de los componentes y criterios, así como para identificar el orden de intervención en las subcuencas.

Esta metodología permite identificar áreas de atención para la restauración hidrológica, a nivel subcuenca y/o microcuenca, para elaborar planes de manejo y seleccionar prácticas y obras para la rehabilitación de los sistemas de drenaje, atenuar la degradación de los suelos y prevenir problemas de inundación en zonas tropicales.



## CAPÍTULO II. JUSTIFICACIÓN DE LA PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE

Los entornos naturales de la región sureste de México presentan condiciones biofísicas que son alteradas por las actividades socioeconómicas de la población que incrementan el impacto de los fenómenos meteorológicos extremos; entre los principales factores están las fuertes precipitaciones, el incremento de la población que incide en la degradación de los recursos naturales, específicamente en el deterioro de la cobertura vegetal, la disminución de la fertilidad y productividad de los suelos, el cambio de uso del suelo y la contaminación de las aguas superficiales.

Estos efectos se potencializan por la acción antropogénica, que al construir centros de población rurales en regiones donde las condiciones del suelo no son aptas para esta actividad, propician la pérdida de sus viviendas, al establecerse en zonas susceptibles a deslizamientos o inundaciones, y la alteración del sistema natural que los rodea.

Las cuencas de la Costa de Chiapas, presentan en sus partes altas, una combinación de factores que las hacen vulnerables a los procesos erosivos, debido a las áreas escarpadas con pendientes superiores al 100%, suelos susceptibles a la erosión y, precipitaciones intensas y duración corta. Además, se suma un manejo inadecuado de la cobertura vegetal, deforestación, incendios forestales, sobrepastoreo de ganado en laderas, agricultura en laderas con el sistema roza-tumba-quema y construcción de caminos y carreteras.

Con el crecimiento poblacional y el paso de los huracanes en la zona costera de Chiapas se han acelerado los procesos de degradación y aumentado las pérdidas tanto económicas como humanas. En 1998, el huracán Mitch, causó graves daños que requirió una inversión de 888 millones de pesos para repararlos. En 2005, con el huracán Stan se destruyó infraestructura, viviendas, cobró vidas humanas y originó inundaciones, se requirió de una inversión de 10,149 millones de pesos para recuperar las áreas dañadas (López-Báez *et al.*, 2008). Aunado a esto, la presencia de estos ciclones causó fuertes deslizamientos en las partes altas, que aumentaron la densidad de drenaje, los escurrimientos superficiales y el riesgo de inundación, lo cual originó la implementación de programas de restauración hidrológica para atenuar estos problemas.



Un programa de restauración hidrológica requiere de planes de manejo integral de las cuencas donde se prioricen áreas de intervención. La priorización tiene como objetivo realizar una comparación entre diferentes escenarios o acciones de manejo, con el fin de elegir aquellas que optimicen el logro de los objetivos que se persiguen (Fallas y Valverde, 2008).

Actualmente existen técnicas y métodos de priorización, los cuales se han potencializado con los Sistemas de Información Geográfica que permiten conocer la variabilidad espacial de los recursos naturales, los rasgos topográficos, la cobertura vegetal, las zonas con presencia de deslizamientos en masa, sistemas de drenaje, tipos de suelos, infraestructura de caminos, centros de población, entre otros que, aunados a la distribución de la población y de sus actividades productivas, permiten identificar zonas con diferentes susceptibilidades a priorizarse para la restauración hidrológica.

La priorización de áreas de drenaje con fines de restauración hidrológica estará en función de los parámetros lineales y de forma, los escurrimientos superficiales, los cambios de cobertura vegetal, la estabilidad y saturación de los suelos de las laderas, las condiciones socioeconómicas y la disponibilidad de recursos para implementar los planes de manejo.

En esta investigación la priorización de áreas de drenaje consideró diferentes parámetros, criterios y componentes, analizados como: unicriterio (Triphati *et al.*, 2003; Pai *et al.*, 2011; Srinivasa-Raju y Nagesh-Kumar, 2011; Kumar-Tamang *et al.*, 2012; Phomcha *et al.*, 2012; Aher *et al.*, 2013; Kusre, 2013; Wandre y Rank, 2013; Fan y Shibata, 2014; Panhalkar, 2014) o multicriterio (Nooka-Ratnam *et al.*, 2005; Srdjevic y Pinto-Medeiros, 2008; Srinivasa-Vittala *et al.*, 2008; Ashari-Alias *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010; Coehlo *et al.*, 2012; Malik y Bhat, 2014) para la optimización de la función objetivo.

Debido a la interacción entre los componentes en el área de estudio, para la priorización se utilizó el Proceso Analítico en Red (ANP) desarrollado por Saaty (1996), ya que forma parte de los métodos empleados en la Toma de Decisiones Multicriterio y es uno de los más utilizados en las áreas de optimización de negocios, obteniendo mejores resultados, debido a su interdependencia y retroalimentación cuando se busca modelar problemas del mundo real.



### **CAPÍTULO III. REVISIÓN DE LITERATURA**

En éste capítulo se presentan las metodologías de priorización existentes que sirven de base para la aplicación del Proceso Analítico en Red (ANP, por sus siglas en inglés). Los criterios de priorización revisados se basan en el análisis morfométrico e hipsométrico de las áreas de drenaje asociados con procesos erosivos; en el análisis de los escurrimientos superficiales utilizando modelos hidrológicos para identificar áreas de drenaje con mayor aportación y riesgo al crecimiento del sistema de drenaje; en índices de estabilidad y grado de saturación de los suelos y su efecto sobre los deslizamientos en masa de las laderas; en la variación multitemporal de la cobertura vegetal utilizando imágenes del satélite LANDSAT y en las condiciones socioeconómicas de las áreas de intervención.

#### **3.1. METODOLOGIAS DE PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE A NIVEL CUENCA, SUBCUENCA Y MICROCUENCA**

El manejo integral de cuencas ha sido una de las principales actividades que el hombre ha trabajado desde hace siglos, a fin de mejorar las condiciones de las cuencas considerando la intervención del hombre para disminuir la presión sobre los recursos, la restauración de zonas de aptitud forestal, la conservación de los recursos naturales, el control de deslizamientos superficiales, entre otros. Para realizar el manejo, es necesario definir el objetivo que se persigue y a partir de ello, ubicar las áreas de atención ya que los criterios de priorización cambian.

Considerando los factores que intervienen y su compleja interacción, se han utilizado diferentes metodologías para priorizar áreas de drenaje en función del objetivo planteado, es decir, tomar en consideración aquellos aspectos que están relacionados con su campo de acción o sobre las actividades que pretenden desarrollar, pudiendo ser estas, sociales, económicas y/o ambientales.

##### **3.1.1. Priorización de Cuencas a Nivel mundial**

El desarrollo del sistema de drenaje y el patrón de flujo de los ríos a través del espacio y del tiempo, son influenciados por el medio biofísico como geología, geomorfología, componentes estructurales, suelo y vegetación del área por la cual se mueve el agua. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se utilizan actualmente para evaluar los parámetros de las



cuencas y subcuencas y proveen un ambiente flexible y una herramienta poderosa para la manipulación y análisis de la información espacial, particularmente para identificar y extraer información que ayude a la toma de decisiones (Vijith, 2006).

La priorización de áreas de intervención se realiza en la India con los Sistemas de Información Geográfica, a través de análisis espacial para obtener los parámetros morfométricos de las cuencas (lineales, de forma y relieve), y para interactuar con los componentes de cobertura vegetal multitemporal, condiciones socioeconómicas e importancia del área de estudio, entre otros.

Rekha *et al.* (2013), realizó una priorización de microcuencas en las subcuencas Peruvanthanam y Valiyathodu en Kerala, India, mediante parámetros morfométricos usando sensores remotos y SIG. Con la información obtenida, ponderó y clasificó cada variable y área delimitada con base en la influencia que ejerce sobre la capacidad de almacenamiento de agua.

Estudios realizados en el Distrito de Dakshina Kannada, Karnataka (Ramesh *et al.*, 2001); en el área de Pavagada, Distrito de Tumkuru, Karnataka (Vittala *et al.*, 2008); en la cuenca Kenera del Distrito Guna, Madhya Pradesh (Javed *et al.*, 2009); en la cuenca del río Tel, Bhawanipatna, Distrito de Kalahandi, Odisha (Mishra y Nagarajan, 2010); en la parte alta de la subcuenca Subernarekha, Ranchi, perteneciente a los Distritos Hazaribag y Khuti, Jharkhand (Londhe *et al.*, 2010), utilizaron sensores remotos y SIG para estimar los parámetros morfométricos considerados en la priorización de microcuencas para establecer programas de manejo de cuencas.

Srinivasa-Raju y Nagesh-Kumar (2011) realizaron una comparación de tres técnicas de clasificación conocidas como Análisis de Clústers (*K-means Cluster Analysis*, KCA), Análisis Difuso de Clústers (*Fuzzy Cluster Analysis*, FCA) y Redes Neuronales de Kohonen (*Kohonen Neural Networks*, KNN), en 25 microcuencas de la cuenca Kherthal, Rajasthan utilizando el componente morfométrico para identificar zonas homogéneas para formular proyectos y establecer prácticas de manejo y conservación del suelo.

Panhalkar y Pawar (2011), aplicaron el modelo WERM (*Watershed Erosion Response Model*) en la cuenca Vedganga para identificar sectores con distintos grados de pérdida de suelos,

ponderando cada área con base en los resultados del modelo en función de pendiente, uso del suelo, densidad de cobertura vegetal y precipitación.

Srinivasa-Vittala *et al.* (2008), priorizaron microcuencas en la cuenca North Pennar, entre Karnataka y Andhra Pradesh, India, mediante una ponderación de cada mapa temático y agrupándolas en tres categorías: alta, media y baja prioridad. Para esto, usaron imágenes de satélite y condiciones socioeconómicas, incluyendo densidad de drenaje, precipitación, pendiente, capacidad de producción de agua, disponibilidad de agua subterránea, suelo, áreas de riego, cobertura forestal, prácticas agrícolas y población.

Nooka-Ratnam *et al.* (2005), usaron un Índice de Producción de Sedimentos combinado con el análisis morfométrico para la ubicación de presas de almacenamiento en la cuenca Tarafeni, Distrito de Midnapur, West Bengal.

Badar *et al.* (2013), utilizando sensores remotos y SIG, integraron información del medio biofísico y las condiciones socioeconómicas para priorizar las cuencas de aporte de agua y sedimentos al lago Himalayan Kashmir.

Chowdary *et al.* (2013), realizaron una priorización de áreas de drenaje en la cuenca Maurakshi, India, mediante la combinación del Proceso Analítico Jerárquico, Índice de Producción de Sedimentos (AHPSYI, *Analytic Hierarchy Process based Sediment Yield Index Model*, por sus siglas en inglés) y SIG. Este método usa información básica como Erosión Potencial y Producción de Sedimentos, y se obtiene aplicando la ecuación (3.1).

$$AHPSYI_w = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i \times PEI_i \times SDR_i)}{A_w} \quad (3.1)$$

Donde N, es el número de áreas de drenaje (dependiendo del nivel de intervención, ya sea cuenca, subcuenca o microcuenca);  $A_i$ , es la superficie de la  $i^{\text{ésima}}$  área de drenaje;  $SDR_i$ , es la producción de sedimentos de la  $i^{\text{ésima}}$  área de drenaje;  $PEI_i$ , es la erosión potencial de la  $i^{\text{ésima}}$  área de drenaje y  $A_w$ , es la superficie del área de drenaje de nivel superior, se calcula con la ecuación (3.2).

$$A_w = \sum_{i=1}^N A_i \quad (3.2)$$

En China, Hlaing *et al.* (2008), realizaron una priorización de subcuencas en la cuenca del río Bago en la parte baja de Myanmar con fines de conservación de suelos empleando análisis espacial con SIG y una modelación de la pérdida de suelos (EUPS) combinada con el análisis morfométrico. Con la información obtenida, establecieron valores ascendentes en función del grado de afectación de la variable morfométrica sobre el proceso de degradación del suelo y se obtuvo un valor promedio para cada subcuenca; de esta forma, se realizó la priorización considerando el valor menor como el de mayor prioridad.

En Irán, Besalatpour *et al.* (2012), utilizaron el modelo SWAT para identificar y priorizar subcuencas de alta montaña en la cuenca Bazoft, Irán, mediante el análisis de escenarios que incluyeron información de precipitación, temperatura y escurrimiento superficial. Los autores encontraron que el modelo SWAT puede ser usado para identificar subcuencas prioritarias para propósitos de manejo, en aquellas cuencas donde se carece de información.

### 3.1.2. Priorización de Cuencas en América Latina

Fallas y Valverde (2008) realizaron una revisión extensa de diversos investigadores que han priorizado cuencas, subcuencas o microcuencas utilizando distintas metodologías en América Latina. A continuación se describen algunas de ellas.

Benegas y León (2009), definieron siete criterios generales para la priorización de cuencas en el programa FOCUENCAS II, considerando como premisa fundamental “la existencia de plataformas de concertación entre los actores locales, gobierno local y la cooperación como condición necesaria”, que fueron los siguientes:

- Necesidades de agua en calidad y cantidad (pobreza y salud humana),
- Grado de vulnerabilidad a desastres naturales causado por la falta o abundancia de agua,
- Viabilidad de las acciones prioritarias (costo-beneficio),
- Grado de organización de las organizaciones para la intervención (capital social),
- Seguridad de las inversiones (derecho de propiedad, apropiación por los actores locales),
- Aportes locales para la intervención (capital económico), y
- Equidad entre municipios u otras unidades (capital político).



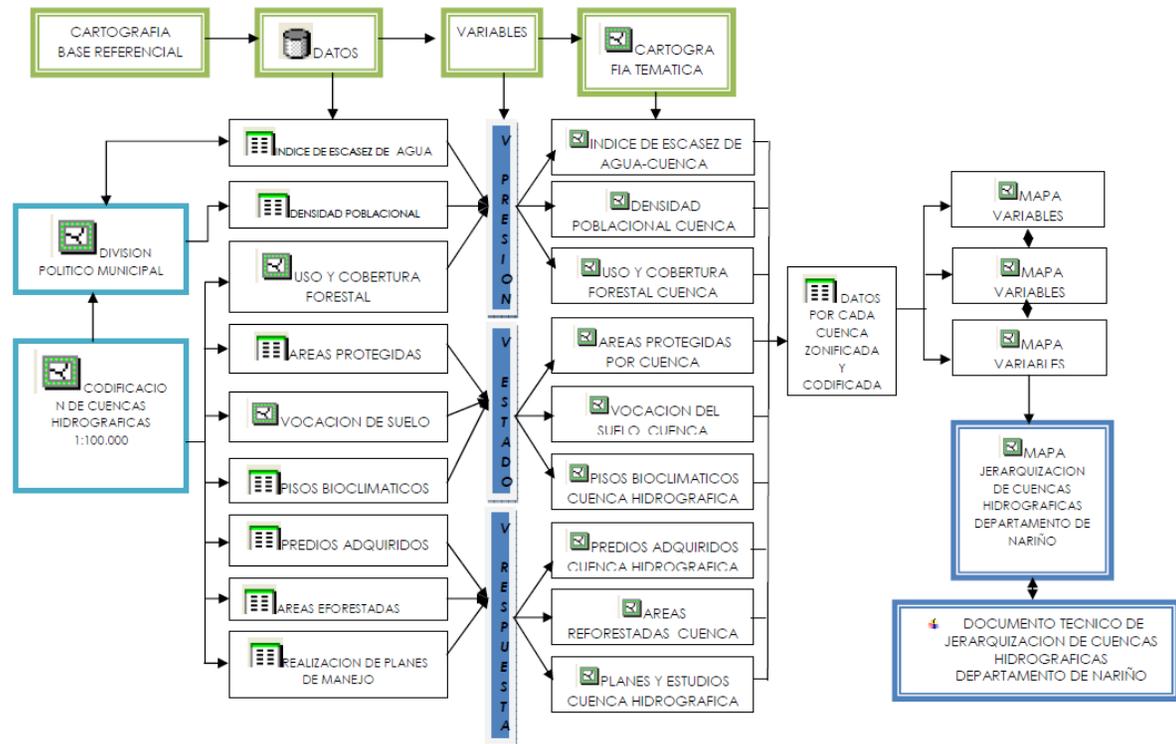
Con estos criterios se identificó la problemática en la cuenca y se plantearon acciones necesarias para su restauración, tomando como eje común el recurso agua dentro de cada subcuenca.

La *World Wildlife Foundation Centroamérica* (WWF, 2007) en Guatemala, estableció un programa de compensación equitativa por servicios hidrológicos, para contribuir a la gestión sostenible de los recursos naturales, así como a mejorar las condiciones de vida de las comunidades pobres. Los criterios planteados fueron los siguientes: para la dimensión económica utilizó los derechos de la propiedad, proveedores y usuarios con disposición a participar, usuarios con capacidad de pago y situación económica de los proveedores; para la dimensión social, se seleccionó la población, influencia de actores en el área del proyecto, usuarios y proveedores organizados y conflictos entre los actores por el uso del agua; para la dimensión ambiental, se consideraron los volúmenes de agua superficial, tamaño de la cuenca y usos del suelo. Una vez definidos los indicadores para alcanzar el objetivo, se les asignaron valores de 0 a 3, donde 0, correspondió a los indicadores que no cumplen con los parámetros establecidos en la cuenca; 1, a los que cumplen parcialmente; 2, a los que cumplían en mayor medida que el anterior pero sin cumplir completamente; y 3, a los que cumplen completamente con los parámetros definidos; finalmente se realizó la suma y se obtuvo una priorización.

El Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA-URL, 2004) realizó una priorización de cuencas y subcuencas hidrográficas en Guatemala, aplicando el método de indicadores, para estimar la recarga hídrica natural. El trabajo consistió en determinar los factores que afectan directamente el problema. Se obtuvieron 12 capas divididas en dos aspectos generales, socioeconómico que se compone de tres indicadores (vías de acceso, densidad de población y posibilidad de apoyo institucional) y biofísico que se integra por nueve indicadores (geología, precipitación, uso y cobertura del suelo, geomorfología, presencia de karst, hidrometeorología, topografía, áreas protegidas y tierras forestales). Dentro de cada indicador, se determinaron las variables que lo integran y se ponderaron, al final se realizó un análisis de las cuencas y subcuencas obteniendo el mapa clasificado desde muy baja hasta muy alta prioridad. Con este estudio se encontró que las cuencas prioritarias son las que dirigen sus escurrimientos hacia el Océano Pacífico.

La Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO, 2008), en el Departamento de Nariño en Colombia, realizó una clasificación y priorización de cuencas hidrográficas

tomando en consideración los siguientes componentes: hidrológico, físico-biótico, sociocultural, tecnológico/económico y político/institucional (Figura 3.1).



**Figura 3.1. Esquema de priorización con base en indicadores de presión, estado y respuesta (CORPONARIÑO, 2008)**

A partir de los indicadores calculados, se aplicó un sistema de clasificación del indicador en tres categorías (alto, medio y bajo), asignándoles valores de 1, 2 y 3, respectivamente. Después se desarrolló una matriz por cada uno de los indicadores (integrados en presión, estado y respuesta) y los valores se sumaron por grado de calificación. Para obtener el puntaje final de cada uno de los indicadores integrados, se calculó el promedio ponderado, asignando una ponderación a los valores obtenidos en la sumatoria. Así los valores de calificación 1 se multiplican por 3, los de calificación 2 por 2 y los de calificación 3 por 1. La matriz final, que da el orden jerárquico o de prioridad de las cuencas hidrográficas (Figura 3.1), resultó del promedio de los puntajes obtenidos para las matrices de cada uno de los indicadores (presión, estado, respuesta).

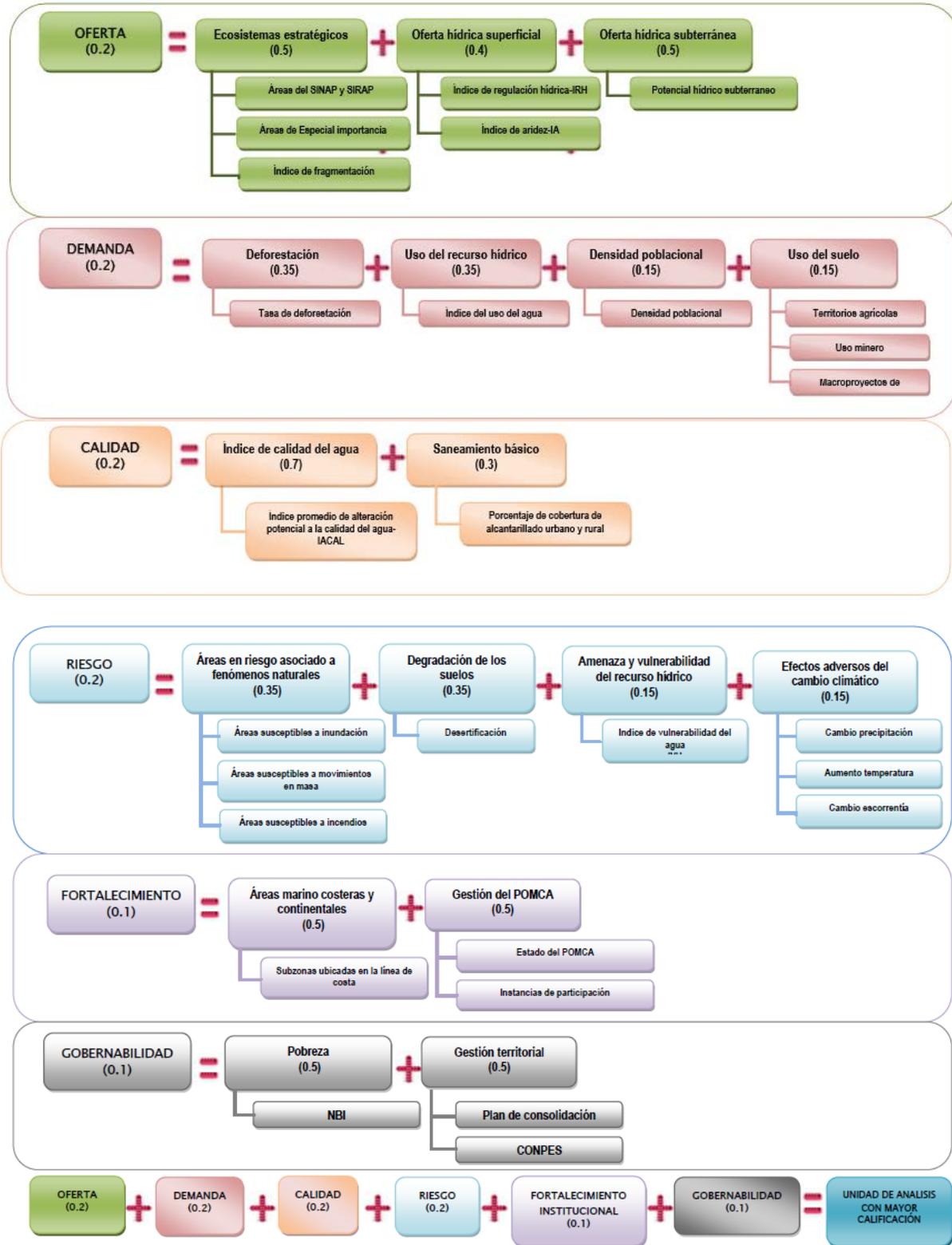


Figura 3.2. Esquema de priorización del IDEAM (IDEAM, 2011)



El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM, 2011), realizó un análisis por componentes, factores y parámetros. A cada parámetro se le asignó un peso frente a las prioridades de la ordenación de la cuenca, de esta forma, los componentes como oferta, demanda, calidad y riesgo se les asignó una ponderación de 0.2 a cada uno, debido a que estos componentes son indicadores básicos del estado y presión de los recursos naturales; al fortalecimiento institucional y gobernabilidad se les asignó un valor de 0.1, ya que son condicionantes para la gestión del recurso hídrico. Con esta información se aplicó el Proceso Analítico Jerárquico mediante los Sistemas de Información Geográfica y el álgebra de mapas (Figura 3.2).

Abreu (2001) en República Dominicana realizó un análisis, a través del uso de indicadores para describir el estado actual de las cuencas, integrando fuentes de contaminación ambiental, socioeconómica, situación ambiental, entre otras. De esta forma definió cuatro categorías que fueron: fuentes de contaminación potencial, aspectos socio-económicos y de desarrollo urbano, infraestructura y usos y recursos naturales. Cada variable analizada se clasificó según un sistema de valoración de 1 a 3, en el cual 3, indica un factor de consideración crítico; 2, moderado y 1, leve.

Posner *et al.* (2002), desarrollaron una metodología para la jerarquización de áreas en la microcuenca La Encañada, Cajamarca, Perú. Como una aproximación a los riesgos de erosión usando un Sistema de Información Geográfica; el trabajo se basó en datos topográficos, uso actual del suelo y tipos de suelo. Los resultados indican donde actuar y qué medidas se deben tomar para disminuir esos riesgos. De las características del suelo, se consideró la profundidad, asumiendo que los suelos profundos tienen más valor por ser más productivos y merecen más inversión que los suelos someros. Además, con la profundidad del suelo se determinó la posibilidad de ejecutar medidas de control como terrazas o zanjas trinchera e identificar áreas donde es recomendable, por su condición de profundidad, establecer cobertura vegetal permanente con reforestaciones o siembra de pastos.

El Instituto de Promoción para la Gestión del Agua (IPROGA) de Perú en 1996, utilizó una serie de criterios con base en la ubicación de las cuencas. Para las cuencas de la vertiente del Pacífico, los criterios de priorización para la selección de áreas críticas, de la parte baja, fueron: disponibilidad actual y potencial del recurso hídrico, estado de conservación de la

infraestructura hidráulica, incidencia de inundaciones, organización de la junta de usuarios de la cuenca, contaminación del agua por actividades humanas contaminantes y grado de salinización de los suelos. En las cuencas de la sierra, el objetivo prioritario fue el control de la erosión hídrica y los criterios utilizados fueron: áreas cultivadas o en descanso según su pendiente, población y asentamientos rurales, organización de la población, modalidad del trabajo y receptividad a la tecnología. A partir de estos criterios, se desarrollaron cuatro indicadores: económicos, ambientales, sociales e institucionales. Con esta matriz de información se asignó una calificación a cada sub-indicador, con base en criterios de valoración, posteriormente la priorización se obtuvo mediante la suma de las calificaciones asignadas.

Hincapié y Lema (sf.), usando el concepto de Ecosistema Estratégico, establecieron áreas de importancia estratégica en microcuencas que abastecen los acueductos del municipio de Medellín, Colombia. Con la ayuda del SIG determinaron los polígonos, según su importancia, con la técnica del álgebra de mapas. El orden jerárquico de las estrategias se definió con las variables o criterios de priorización obtenidos por medio de cuestionarios Delphi aplicados a expertos. Los criterios de jerarquización resultantes fueron: el orden de la cuenca, coeficiente de rugosidad, grupo hidrológico de suelos relacionado con la capacidad de infiltración, formaciones superficiales, tiempo de concentración y pendiente.

Faustino (1986) empleó una metodología para la priorización de cuencas, subcuencas y microcuencas en conservación de suelos. Para el primer nivel (cuencas) empleó tres parámetros; nueve para el segundo (subcuencas) y doce para el tercero (microcuencas), siendo más detallados los estudios conforme se incrementaba el nivel. Cada uno de estos parámetros tuvo tres valores: un valor absoluto que mide su grado de importancia con fines de conservación, un valor relativo que mide en forma cualitativa el grado de afectación con relación al parámetro y un coeficiente de ajuste dado por la relación entre el área de influencia o área afectada por el parámetro y el área total de la microcuenca o subcuenca, según sea el caso. La evaluación a nivel cuenca se estimó con la ecuación (3.3).

$$Vc = Cr \sum_{i=1}^{i=3} (VA_i \times VR_i \times Ca_i) \quad (3.3)$$

Donde  $V_c$ , es el puntaje total de la cuenca;  $C_r$ , el coeficiente regional;  $VA_i$ , el valor absoluto del parámetro  $i$ ;  $VR_i$ , el valor relativo del parámetro  $i$ ; y  $Ca_i$ , es el coeficiente de ajuste del parámetro  $i$ .

Cuando la priorización se realiza para subcuencas y/o microcuencas, se estima con la ecuación (3.4)

$$V_{mc} \text{ ó } V_{sc} = \sum_{i=1}^{i=9 \text{ ó } 12} (VA_i \times VR_i \times Ca_i) \quad (3.4)$$

Donde  $V_{mc/sc}$ , es el puntaje total de la subcuenca/microcuenca;  $VA_i$ , el valor absoluto del parámetro  $i$  entre (0.1 a 1);  $VR_i$ , el valor relativo del parámetro  $i$  entre (1 a 10); y  $Ca_i$ , el coeficiente de ajuste del parámetro  $i$ .

El Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales de Venezuela desarrolló una metodología para priorizar cuencas hidrográficas. Dicha metodología considera siete parámetros: (1) problemas actuales de erosión y sedimentación; (2) participación campesina (población que causa problemas de talas, incendios y erosión); (3) importancia de la cuenca como abastecedora de agua; (4) obras construidas o por construir; (5) potencial de utilización de los recursos aguas arriba; (6) potencial de los recursos aguas abajo; y (7) periodicidad o amplitud de los incendios de vegetación. A las subcuencas se les asignó un valor índice obtenido de la sumatoria de las calificaciones dadas a los siete parámetros; la prioridad uno la tuvo la subcuenca con mayor valor-calificación (Ruiz, 1986).

En Brasil, Marques da Silva *et al.* (2012), utilizaron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS) y la Producción de Sedimentos para realizar una priorización de subcuencas en la cuenca Tapacurá, considerando la intensidad de la lluvia y la degradación de la cobertura vegetal como las bases de la metodología.

De acuerdo con Richters (1986), las metodologías aplicadas para priorizar áreas de intervención en cuencas hidrográficas utilizan el siguiente esquema general:

- Definición del objetivo para la priorización,
- Selección de criterios y cualidades para valorar las cuencas con relación al objetivo,

- Valoración de las cuencas según los criterios,
- Ajuste de valores absolutos según la importancia relativa de cada criterio
- Comparación de cuencas, y
- Priorización.

### 3.1.3. Priorización de Cuencas en México

Cotler *et al.* (2010) realizaron una priorización de cuencas a nivel nacional, tomando en consideración la *alteración de la dinámica funcional* y los *niveles de presión* que ejercerían el crecimiento proyectado de la población al 2030 y las tendencias de *cambio de uso del suelo*. Las variables utilizadas fueron las siguientes: Índice de Transformación Humana de los Ecosistemas (ITHE), degradación de suelos, fragmentación de ríos y deterioro de zonas riparias, presión sobre el recurso hídrico, y contaminación potencial difusa. La integración y comparación de las variables se hizo a través del diseño de un árbol de decisiones, bajo el contexto de decisiones multicriterio. Los criterios que conformaron la estructura del árbol de decisiones se jerarquizaron y cada criterio se ponderó, encontrando que el 50% de las cuencas de México presentan un grado de alteración muy alto a extremo o un nivel de presión alto.

Olguín y Pineda (2010) realizaron una priorización de microcuencas en la subcuenca del río Ayuquila, Jalisco mediante la implementación de la toma de decisiones usando dos enfoques: el de *conservación* y el de *aprovechamiento* del recurso hídrico, con el objeto de que sirva a las instituciones y asociaciones que manejan el recurso agua en la subcuenca. Cada microcuenca fue caracterizada determinando sus características hidrológicas, de relieve, forma y tamaño, pendiente y curva hipsométrica; además se obtuvo la densidad de población y el grado de marginación de las localidades; el riesgo de erosión se determinó mediante RUSLE. Se definieron cinco categorías de priorización y para cada una de ellas, se plantearon estrategias de mantenimiento y/o recuperación de la función del área de drenaje con la finalidad de fortalecer el sistema de planeación de la subcuenca con la definición precisa y priorizada de las acciones locales (microcuenca).

González (2008), realizó una priorización para la implementación de políticas ambientales en apoyo al desarrollo sustentable de la cuenca del Lago de Cuitzeo, enfocándose en dos importantes políticas: conservación y uso sustentable. La identificación y priorización se basó



en el uso de un proceso de toma de decisiones espacial multicriterio; donde, los criterios están asociados a los objetivos (definidos por las políticas ambientales) y los atributos (definidos por las características socio-ambientales de la cuenca). Aplicó el Proceso Analítico Jerárquico combinado con un análisis espacial generando cuatro escenarios para cada una de las políticas ambientales. El análisis espacial se enfocó en la identificación de los indicadores biofísicos o socioeconómicos más adecuados para evaluar y jerarquizar el potencial de los municipios y subcuencas para la aplicación de las políticas de conservación y aprovechamiento sustentable.

Con base en la información revisada a nivel internacional y nacional, los principales componentes que se utilizan para la priorización en cuencas de acuerdo a la función objetivo, se resumen en: morfometría, hidrología, estabilidad de laderas, uso actual del suelo y condiciones socioeconómicas, suele utilizarse cualquiera de estos componentes y también algunas veces, otros criterios dentro de cada componente. No existe una metodología que considere la interacción entre ellos, por esta razón, se plantea para el presente trabajo desarrollar una metodología para la priorización de áreas de drenaje mediante el análisis de los componentes y sus criterios, utilizando el Proceso Analítico en Red.

Los componentes y criterios que se van a utilizar en la metodología de priorización a desarrollarse analizan a continuación.

### **3.2. ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE ÁREAS DE DRENAJE**

La cuenca hidrográfica constituye una unidad, tanto en su geometría como en los procesos que se desarrollan en ella y es posible expresar en forma numérica sus propiedades geométricas de forma y lineales que sirven de base para comprender su evolución y dinámica. Estos parámetros contribuyen al conocimiento y evaluación de los procesos de hidrología, erosión y sedimentación (Racca, 2010). La cuenca se utiliza como unidad para estudios de geomorfología, fisiografía y procesos erosivos; este hecho se debe a las características que gobiernan en su interior todo el flujo superficial de agua (Horton, 1945). Debido a esto, la cuenca es considerada como una unidad territorial ideal para la planeación integrada de los recursos naturales (Pisarra *et al.*, 2004; Hott *et al.*, 2007; Koshak and Dawod, 2011).



Desde el punto de vista de su funcionamiento, una cuenca hidrográfica puede caracterizarse por su morfología, su cobertura vegetal y su tipo de suelo (Gaspari *et al.*, 2012). La influencia de estos factores sobre la transformación de la precipitación en escurrimiento es importante y pueden expresarse mediante parámetros sencillos; sin embargo, es posible definir cierto número de índices o parámetros, que pueden servir en la clasificación de cuencas y facilitar los estudios de semejanza.

El análisis de las formas o rasgos de la superficie terrestre se puede realizar, a través de la geomorfología o morfometría, ya que permiten cuantificar diferentes rasgos de esta, y comparar una parte de la superficie terrestre con otra (Londoño, 2001). La respuesta de la cuenca a diferentes procesos hidrológicos y su comportamiento depende de varios parámetros fisiográficos, hidrogeológicos y geomorfológicos; por lo tanto, la caracterización de la cuenca con estos parámetros permite identificar el comportamiento hidrológico de la misma (Kumar y Kumar, 2011; Malik *et al.*, 2011).

La cuantificación de los parámetros morfométricos permite interpretar y predecir el comportamiento hidrológico y la torrencialidad de los flujos superficiales en las cuencas hidrográficas. Sin embargo, los valores correspondientes para un área, tomados aisladamente del conjunto, no definen el comportamiento de la misma. Esto, debido a que el régimen hidrológico es una función compleja de numerosos factores, entre los que predominan el clima y la configuración del territorio en el cual se desarrolla el fenómeno (Londoño, 2001, Lima *et al.*, 2008).

La adecuada interpretación de los procesos hidrológicos que ocurren en las cuencas hidrográficas y su comportamiento con los cambios climáticos y de uso y manejo del suelo, han sido investigados desde hace más de cien años (Delgado, 2010). Estas investigaciones han originado distintas metodologías que relacionan parámetros físicos, biofísicos y sociales para explicar el comportamiento hidrológico de las cuencas; sin embargo, el análisis morfométrico ha recibido una amplia atención y aceptación por los hidrólogos y geomorfólogos debido a que ayudan en el análisis de los procesos físicos complejos y el comportamiento hidrológico de las áreas de drenaje. La integración de los parámetros morfométricos con las características hidrológicas de las áreas de drenaje es esencial y permite una mejor planificación y formulación



de estrategias para una adecuada conservación y establecimiento de las mejores prácticas de manejo (Raju y Kumar, 2011).

El análisis cuantitativo de los parámetros morfométricos es importante en la evaluación y priorización de cuencas para establecer medidas de conservación del suelo y agua, así como para el manejo integral de los recursos naturales a pequeñas escalas (Kanth y Hassan, 2012). La evaluación morfométrica ayuda a elaborar un diagnóstico hidrológico preliminar con el fin de predecir de forma aproximada si el comportamiento de la cuenca está relacionado con la geología y geomorfología del área de drenaje (Esper, 2008). De esta forma, la respuesta hidrológica de una cuenca está interrelacionada con las características del área de drenaje, tales como el tamaño, forma, pendiente, densidad y tamaño de la red de drenaje, longitud de los cauces, etc.; por lo tanto, el análisis morfométrico del área de drenaje es esencial para comprender la dinámica de las cuencas hidrográficas (Kanth y Hassan, 2012).

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica intrínsecamente consideran propiedades físicas espaciales que permiten realizar comparaciones entre unidades de drenaje (Gaspari *et al.*, 2012) a distintos niveles de intervención (cuenca, subcuenca, microcuenca o unidad de escurrimiento). Esta descripción morfométrica de las formas superficiales también permite obtener índices cuantitativos sobre las características ambientales del territorio útiles en estudios hidrológicos para conocer el comportamiento de los cauces durante las avenidas máximas extraordinarias, provocadas por eventos meteorológicos extremos que originan inundaciones, deslizamientos por la saturación del suelo y la modificación del sistema de drenaje.

Horton (1945) señaló que las redes de drenaje podían ser estudiadas de modo cuantitativo según un modelo de órdenes de corrientes, que posteriormente fue modificado por Strahler (1964). Según Racca (2010), los parámetros morfométricos permiten caracterizar las unidades de intervención y su correlación con otros atributos de las cuencas; esto contribuye al conocimiento y evaluación de los procesos hidrológicos, erosivos y de producción de sedimentos.

Estos índices suelen clasificarse en: *parámetros de forma*, que incluyen el área, perímetro, factor de forma, coeficiente de compacidad, relación de circularidad y relación de elongación; *parámetros de relieve* como la pendiente del área de drenaje, elevación máxima, media, y

mínima, desnivel, perfil longitudinal del cauce principal y curva hipsométrica; y parámetros de la red de drenaje (lineales) que consideran el orden de la corriente, número total de cauces, densidad de drenaje, densidad hidrográfica, textura del drenaje, pendiente del cauce principal, longitud del escurrimiento superficial, longitud del cauce principal, longitud total de cauces, relación de bifurcación y el tiempo de concentración estimado en función de longitud del cauce principal y su desnivel (Horton, 1945; Jimenez *et al.*, 1999; Viramontes-Olivas *et al.*, 2006; Londoño, 2001; Srinivasa-Vittala *et al.*, 2004; Benavides-Mora *et al.*, 2009; Santillán *et al.*, 2010; Dwivedi, 2001; Geena and Ballukraya, 2011; Mahadevaswamy *et al.*, 2011; Nag and Lahiri, 2011; Singh and Singh, 2011; Gaspari *et al.*, 2012).

Los parámetros morfométricos influyen directa o indirectamente en los procesos de degradación del suelo y en la respuesta hidrológica de la cuenca. Estos parámetros se estiman con las ecuaciones propuestas por diversos autores para diferentes unidades de drenaje (cuenca, subcuenca, microcuenca y/o unidad de respuesta hidrológica).

El área de drenaje se define como el total de la superficie proyectada sobre un plano horizontal, que contribuye con el flujo superficial a un segmento de cauce de orden dado, incluyendo los tributarios de orden menor (Horton, 1932; Londoño, 2001, Benavides-Mora *et al.*, 2009). Este parámetro tiene gran importancia e influye en la magnitud del caudal ya que crecen en forma proporcional al área de la cuenca. Sin embargo, el crecimiento del caudal promedio con respecto al área no es constante, ni igual entre regiones. Los gradientes de este crecimiento, para una zona hidrológica dependen de la variación territorial de las precipitaciones, e indirectamente de la altura.

La densidad de drenaje ( $D_d$ ) es la longitud de cauces por unidad de área (Horton, 1932; Yildiz, 2004; Pareta y Pareta, 2011). Una alta densidad refleja una alta disección del territorio de la cuenca con una respuesta hidrológica rápida a eventos de lluvia (Melton, 1958) e indica una alta capacidad para desalojar los escurrimientos, lo que permite inferir que éstas áreas son más propensas a inundaciones (Chirala *et al.*, 2012). Por otro lado, una baja densidad implica una cuenca pobremente drenada con baja respuesta hidrológica (Melton, 1958) y alta probabilidad de zonas de recarga de acuíferos (Srinivasa-Vittala *et al.*, 2008).

Horton (1932) definió a la densidad hidrográfica ( $D_h$ ) como el número de cauces por unidad de área. Generalmente valores altos están relacionados con material impermeable, vegetación escasa, condiciones de relieve montañoso, baja capacidad de infiltración (Javed *et al.*, 2011; Kanth y Hassan, 2012; Kumar-Tamang *et al.*, 2012) y escurrimiento superficial alto (Uniyal y Gupta, 2013). Los valores bajos indican bajo relieve y topografía plana que, debido a la presencia de rocas permeables, el escurrimiento superficial es menor y la capacidad de infiltración alta (Singh y Singh, 2011; Magesh *et al.*, 2013). Hipotéticamente es posible tener cuencas con la misma densidad de drenaje y distinta densidad hidrográfica, o viceversa (Srinivasa-Vittala *et al.*, 2004).

La densidad de drenaje e hidrográfica, son una medida de la textura del drenaje, del grado de disección del paisaje (Docampo *et al.*, 1989) y la evolución del mismo (Magesh *et al.*, 2013). La relación entre la densidad de drenaje y la densidad hidrográfica revela que ésta última es directamente proporcional a la primera; por lo tanto, la densidad hidrográfica es mayor y su variación se debe a la lluvia, relieve, velocidad de infiltración, resistencia inicial del suelo a la erosión, área de drenaje, la fisiografía de la región y la propia densidad de drenaje (Javed *et al.*, 2011; Rawat *et al.*, 2011; Magesh *et al.*, 2013). Valores bajos de  $D_h$  indican una red de drenaje deficiente y valores altos indican una red de drenaje eficiente para desalojar los escurrimientos superficiales (Rawat *et al.*, 2011).

La textura del drenaje se refiere al número total de segmentos de cauce de distinto orden entre el perímetro del área de drenaje (Horton, 1945). Este parámetro es uno de los más importantes en geomorfología e indica la separación entre los cauces o tributarios (Londhe *et al.*, 2010; Pareta y Pareta, 2011; Singh y Singh, 2011; Ramaiah *et al.*, 2012). Su magnitud está influenciada por la litología, capacidad de infiltración y condiciones topográficas (Pareta y Pareta, 2011; Singh and Singh, 2011; Zende and Nagrajan, 2011).

De acuerdo con Horton (1932), el factor de forma es la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud máxima o axial de la misma (Horton, 1945; Pareta y Pareta, 2011; Chirala *et al.*, 2012; Jasrotia *et al.*, 2012; Khant y Hassan, 2012; Tamang *et al.*, 2012; Tolessa y Rao, 2013). Según Londoño (2001), la longitud axial se obtiene midiendo la longitud del cauce principal, hasta llegar al parteaguas del área de drenaje en el punto más alejado. Las áreas de drenaje con valores cercanos a uno son circulares y presentan avenidas pico de corta duración,

mientras que valores bajos indican cuencas alargadas con avenidas con picos atenuados y una duración más larga (Londhe *et al.*, 2010; Geena and Ballukraya, 2011; Javed *et al.*, 2011; Tamang *et al.*, 2012).

Las cuencas largas y estrechas con grandes longitudes de cauce tienen factores de forma pequeños. Mientras que cuencas más circulares tienen factores de forma intermedios y las cuencas pequeñas y anchas generalmente tienen los factores más grandes (Magesh *et al.*, 2013).

Miller (1953) definió a la relación de circularidad como la proporción que guarda el área de la cuenca y el área de un círculo con circunferencia igual al perímetro de la cuenca. Este parámetro está influenciado principalmente por las características litológicas de la cuenca (Magesh *et al.*, 2013), además de la longitud y densidad hidrográfica, estructuras geológicas, relieve y pendiente del área de drenaje (Ramaniah *et al.*, 2012); los valores bajos, medios y altos de la relación de circularidad son indicadores del estado joven, maduro y viejo, respectivamente, del ciclo de vida de los tributarios.

El coeficiente de compacidad, conocido también como Índice de Graveluis ( $K_c$ ), relaciona el perímetro de una cuenca con el de una circunferencia de igual área (Suresh *et al.*, 2004; Javed *et al.*, 2011; Uniyal y Gupta, 2013). Este parámetro es independiente del tamaño de la cuenca y su magnitud depende de la pendiente (Pareta y Pareta, 2011). Una cuenca de forma circular, desde el punto de vista de drenaje, es más susceptible ya que los tiempos de concentración son mucho menores y los gastos pico se presentan súbitamente (Nooka-Ratman *et al.*, 2005).

La relación de elongación es la relación entre el diámetro de un círculo, que tiene la misma área que la cuenca y la longitud del cauce principal. Este índice de la forma de una cuenca muy significativo cuando se trata de conocer el comportamiento hidrológico de la misma (Schumm, 1956; Tolessa y Rao, 2013).

Horton (1945) definió a la longitud del flujo superficial como la longitud de recorrido del agua sobre la superficie del suelo antes de que se concentre en los cauces tributarios y es sinónimo de la longitud del flujo laminar en laderas. Su valor es aproximadamente igual a la mitad del recíproco de la densidad de drenaje y se relaciona inversamente con la pendiente promedio del cauce (Javed *et al.*, 2009; Ramaiah *et al.*, 2012).

La relación de bifurcación, introducida por Horton en 1932, relaciona el número de cauces de un orden dado y el número de cauces de orden inmediato superior. Para diferentes regiones o ambientes, exceptuando aquellos fuertemente influenciados por la geología, Strahler (1957) demostró que la bifurcación presenta pequeños rangos de variación.

La forma de la cuenca es la relación que existe entre la longitud del cauce principal al cuadrado y el área de la cuenca (Horton, 1945). Este parámetro, para una cuenca en particular, indica la evolución del sistema de drenaje y debe ser analizado con base en parámetros como factor de forma, relación de circularidad y relación de elongación (Jawaharaj y Sakthivel, 2012).

La información generada a partir de los parámetros morfométricos, por cada subcuenca, tiene relevancia sobre la degradación de las áreas de drenaje. Dado que los valores de cada parámetro son función de los procesos geomorfológicos, presentes en cada área, su magnitud permite priorizar las subáreas y definir el comportamiento hidrológico de las mismas.

### **3.3. ANÁLISIS HIPSOMÉTRICO DE ÁREAS DE DRENAJE**

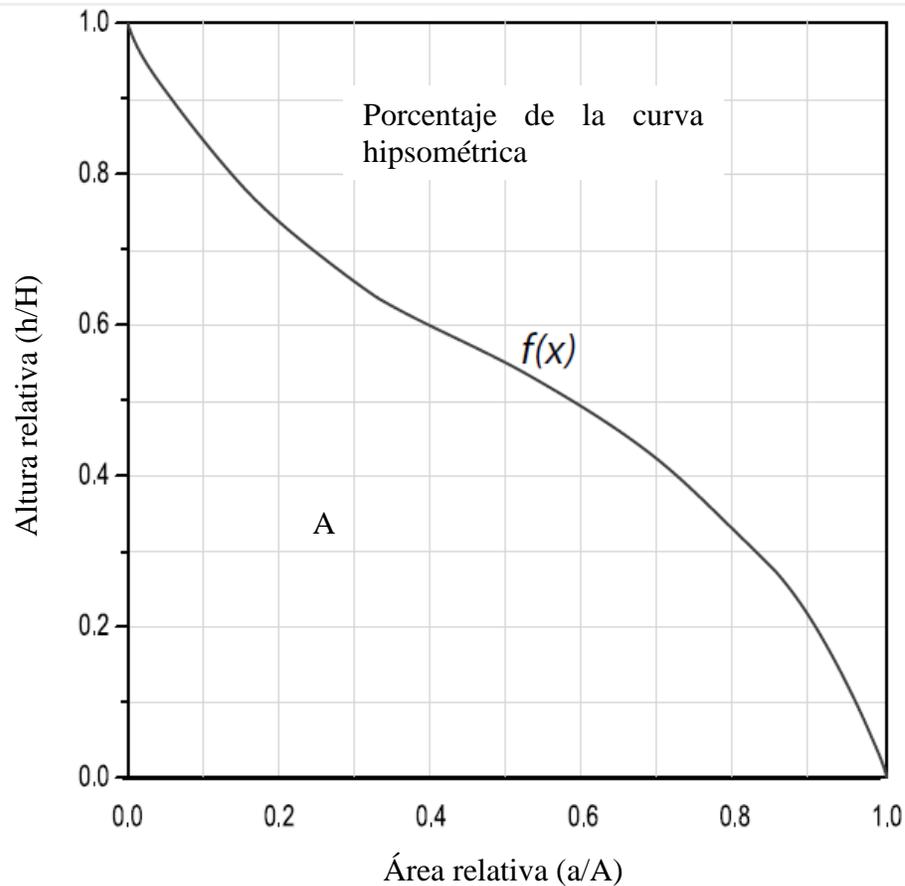
La curva hipsométrica es una representación gráfica de las alturas relativas ( $h/H$ ) y las áreas relativas ( $a/A$ ) de la cuenca (Figura 3.3), su trazo permite conocer la distribución de masas de su parte alta a la baja. Al prescindir de las dimensiones absolutas, sus valores relativos (porcentuales) permiten comparar las curvas de diferentes cuencas (Racca, 2007).

La forma de la curva hipsométrica está relacionada con el desarrollo geomorfológico de la cuenca, de esta manera, una curva convexa representa a una cuenca típica en estado joven, una curva en forma de “s”, madurez o equilibrio y una curva cóncava indica un estado de senectud (Strahler, 1952).

Howard (1990) al asociar la hipsometría e hidrología, encontró que los parámetros de la curva hipsométrica tienen una estrecha relación con la hidrología de la cuenca, particularmente con su respuesta a las inundaciones.

Pérez-Peña *et al.* (2009) desarrolló una extensión para ArcGIS® llamada CalHypso para la determinación de la curva hipsométrica a partir de un modelo digital de elevaciones y el parteaguas de la cuenca. Este programa aplica las ecuaciones desarrolladas por Harlin (1978)

para la determinación de los momentos estadísticos. Estos momentos estadísticos se pueden usar para describir y caracterizar la forma de la curva hipsométrica y cuantificar cambios en la morfología de la red de drenaje. En la mayoría de los casos, estos parámetros han sido usados para el análisis hipsométrico, específicamente en cuencas con valores similares de la integral hipsométrica pero con diferente forma.



**Figura 3.3.** Distribución de la curva hipsométrica. Strahler (1957)

### 3.4. INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIAS NORMALIZADAS (NDVI)

La detección espacial e identificación de los cambios de cobertura o uso del suelo es un elemento básico en la planificación y gestión estratégica del territorio (Sahebjalal and Dashtekian, 2013). El uso de fotografías aéreas, imágenes de satélite y sensores remotos, constituyen una herramienta importante en la determinación de la distribución espacial y temporal del uso del suelo, considerando la caracterización y formas de la cubierta vegetal y el aumento o disminución en el tiempo (Al-doski *et al.*, 2013).

Los sensores remotos han sido utilizados ampliamente para conocer los cambios de vegetación a diferentes escalas, entendiéndose los cambios de vegetación como las diferencias en la vegetación o la cobertura del suelo a través del tiempo. Los cambios en la vegetación, permiten entender el sistema terrestre y ayuda a identificar dónde y por qué han ocurrido esos cambios (Al-doski *et al.*, 2013). Existen muchas metodologías para detectar, monitorear y/o cuantificar los cambios de vegetación; razón por la cual se han propuesto y utilizado varios índices de vegetación (Sahebjalal and Dashtekian, 2013; Jomaa and Kheir, 2003). Los valores de los índices de vegetación muestran el comportamiento de la vegetación con base en su respuesta espectral en referencia a la radiación roja e infrarroja del espectro electromagnético.

El índice de vegetación comúnmente conocido como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, por sus siglas en inglés) es un indicador de la calidad y vigor de la vegetación y se ha usado para identificar los patrones de cambio que han ocurrido en un área específica para diferentes fechas (Sahebjalal and Dashtekian, 2013). Se basa en la diferencia entre la máxima absorción de radiación en la banda espectral del rojo y la máxima reflexión de radiación en la banda espectral del infrarrojo cercano (Ghorbani *et al.*, 2012). Su valor varía entre -1 a +1, siendo valores positivos para suelo y vegetación. Para suelos desnudos, dependiendo de su composición y humedad, el NDVI varía entre 0.1 y 0.2. La vegetación con alta densidad o con buen follaje tendrá valores altos de NDVI; por otro lado, los valores negativos indican nubosidad y/o agua.

Lyon *et al.* (1998) compararon siete índices de vegetación, a partir de tres diferentes fechas de imágenes del satélite LANDSAT MSS para la detección de cambio de cobertura vegetal. Los autores encontraron que el NDVI demostró ser el índice que mejor diferenciaba los cambios de vegetación.

El Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas, se calcula a partir de dos bandas espectrales, la roja y la infrarroja cercana y se obtiene con la ecuación (3.5).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3.5)$$

Donde: NIR, corresponde a la banda del infrarrojo cercano y RED, corresponde a la banda del rojo.

Gómez-Almonte (2005) y Merg *et al.* (2011) proponen una clasificación de NDVI, como se muestra en el Cuadro 3.1, para conocer el tipo de cobertura presente.

**Cuadro 3.1. Clasificación de los valores de NDVI**

<b>Clasificación</b>	<b>Valor de NDVI</b>
Nubes y Agua (NA)	< 0.01
Suelo Desnudo (SD)	0.01 - 0.1
Vegetación Baja (VB)	0.1 - 0.2
Vegetación Mediana (VM)	0.2 - 0.4
Vegetación Alta (VA)	> 0.4

Elaboración propia a partir de Gómez-Almonte, 2005 y Merg *et al.*, 2011.

Del Cuadro 3.1 y la revisión bibliográfica se concluye que el NDVI, para cada subcuenca, permite identificar el porcentaje de cobertura vegetal presente y sus cambios pueden utilizarse para priorizar las áreas de drenaje.

### **3.5. ANÁLISIS HIDROLÓGICO UTILIZANDO EL MODELO SWAT**

El modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold del Servicio de Extensión Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (ARS – USDA, por sus siglas en inglés, *Agricultural Research Service – United States Department of Agriculture*). Es un modelo de base física utilizado para conocer el comportamiento hidrológico continuo de una cuenca con base en la distribución espacial de información de relieve, uso del suelo, tipo de suelo y condiciones climatológicas. El modelo permite conocer, en largos periodos de tiempo, el impacto del manejo del suelo y la vegetación en la producción de agua, sedimentos, erosión, fuentes no puntuales de contaminación y químicos agrícolas en cuencas grandes que presentan una gran variación espacial en las condiciones de manejo de cultivos, cobertura vegetal, suelos y relieve (Arnold *et al.*, 1998; Arnold *et al.*, 2012).

Con propósitos de modelación de una cuenca hidrológica, el modelo SWAT utiliza el modelo digital de elevaciones (MDE) y la red de drenaje para delimitar subcuencas. Cada subcuenca es modelada como área homogénea, en términos de condiciones climáticas, pero al mismo tiempo se subdivide en pequeñas áreas llamadas Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus

siglas en inglés), las cuales están definidas por áreas uniformes de pendiente, cobertura vegetal y tipo de suelo (Arnold *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2010).

El modelo SWAT está integrado por los componentes de clima, hidrología, sedimentos, humedad del suelo, crecimiento del cultivo, nutrientes, manejo agrícola y plaguicidas. El subcomponente hidrología incluye escurrimiento superficial, flujo lateral subsuperficial, percolación, flujo de agua hacia los acuíferos, deshielo, evapotranspiración, pérdidas por transmisión, y reservorios (Arnold *et al.*, 1998; Srinivasan *et al.*, 1998; Neitsh *et al.*, 2002a; Arnold *et al.*, 2012).

Este modelo ha sido utilizado en varias cuencas a nivel mundial para conocer el comportamiento de las mismas por cambios de uso del suelo, condiciones meteorológicas y de suelos presentes.

Besalatpour *et al.* (2012) aplicaron el modelo SWAT para determinar subcuencas críticas en la cuenca Bazoft, al suroeste de Irán, mediante información imprecisa e incierta. Estos autores encontraron, en función del escurrimiento generado, tres subcuencas prioritarias; lo cual fue asociado a vegetación escasa, pendientes elevadas, presión sobre los recursos naturales y áreas de cultivo.

Tripathi *et al.* (2003) aplicaron el modelo SWAT en la subcuenca Nagwan, ubicada en el Distrito Hazaribaghde, del estado hindú de Bihar, para priorizar áreas críticas y elaborar un plan de manejo en función la situación actual de las mismas. Estos autores, con propósitos de manejo, caracterizaron las subcuencas mediante la pérdida de suelo en las categorías ligera, moderada y alta.

Lajiao *et al.* (2012) indican que las obras de conservación de suelo y agua son ampliamente usadas para reducir los efectos de la erosión, especialmente en subcuencas agrícolas; sin embargo, debido a los altos costos asociados a su implementación, es necesaria la priorización de áreas de intervención. Con base en esto, identificaron áreas críticas mediante el uso de información espacial de la subcuenca Yangdaogou del río Amarillo, provincia china de Shanxi, utilizando el modelo SWAT. Se identificaron 307 HRUs, de las cuales 20 fueron consideradas como áreas críticas, en función de la producción de sedimentos. Las HRUs permitieron



identificar áreas críticas con mayor detalle y representar de forma más precisa el relieve y condiciones biofísicas de la superficie.

Sathian y Syamala (2010), mencionan que los principales estudios para la planeación de una cuenca son, la conservación del suelo y agua y el desarrollo social y económico. Señalan que estos estudios deben realizarse a nivel microcuenca ya que es la unidad básica donde los procesos hidrológicos tienen efecto sobre los recursos agua y suelo. Estos autores aplicaron el modelo SWAT en el estado hindú de Kerala para priorizar microcuencas. La subcuenca la dividieron en 25 microcuencas y usaron como parámetros de priorización, la tasa de erosión y la producción de sedimentos, encontrando que la subcuenca 22, debido a las condiciones de uso del suelo, tuvo mayor prioridad con una producción de sedimentos de 19.49 t/ha.

Mishra *et al.*, (2007), aplicaron el modelo SWAT en la subcuenca Banha, ubicada en el distrito hindú de Jharkhand, para identificar sitios prioritarios para establecer presas de control de azolves. Para priorizar, delimitaron el área de drenaje en cinco microcuencas y compararon sus escurrimientos y producción de sedimentos, resultando prioritaria la microcuenca cuatro.

Marques-da Silva *et al.* (2013), utilizaron el modelo SWAT para identificar subcuencas críticas en la cuenca Mamuaba, perteneciente al río Gramame en Brasil. La cuenca se dividió en 31 subcuencas y para priorizarlas se determinó el riesgo de erosión en función de la pérdida de suelo.

### **3.6. ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE LADERAS**

La determinación de zonas de riesgo o de alta vulnerabilidad ha sido estudiada por muchos científicos a nivel mundial; sin embargo, en los últimos años, se han incrementado los desastres ocasionados por deslaves lo que ha llamado la atención por evaluar y predecir los movimientos en masa (Aleoti y Chowdhury, 1999; Chacón *et al.*, 2006). En ambientes tropicales, caracterizados por perfiles profundos y altas precipitaciones, estos eventos se presentan de improviso y súbitamente, lo que pone en riesgo vidas humanas y la infraestructura. En este sentido, un número importante de investigadores han analizado la lluvia como factor detonante de estos movimientos en masa (Montgomery y Dietrich, 1994; Terlien, 1998; Iverson, 2000; Polemio y Petrucci, 2000; Larsen, 2008).



En los últimos años se han desarrollado estudios para explicar las causas de estos procesos morfodinámicos, pero por su complejidad, aún existe gran incertidumbre sobre la predicción de su ocurrencia. Aunque actualmente se han realizado diferentes acercamientos, uno de los más importantes es a través de umbrales críticos, definidos a partir de modelos físicos o estadísticos, combinados con pronósticos de lluvia y el monitoreo en tiempo real (Aristazábal *et al.*, 2010).

Los movimientos en masa son producto de diversos elementos, donde la morfología del relieve y la evolución de las laderas desempeñan un papel determinante (Brunsden, 2002). La definición más simple y ampliamente aceptada es la de Cruden (1991), quien define el movimiento de una masa como el desplazamiento de roca, escombros o suelo a lo largo de una ladera. La clasificación de movimientos en masa más ampliamente conocida y aceptada es la propuesta por Varnes (1978), y actualizada por Cruden y Varnes (1996), quienes emplean como criterio principal el tipo de movimiento y el material. Los tipos de movimiento definidos son caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos y propagación lateral; y los materiales los dividen en suelo y roca, obteniendo una gran combinación de movimientos con ambos criterios (Aristazábal *et al.*, 2010).

Los movimientos en masa son producto del debilitamiento progresivo de las propiedades mecánicas de los materiales de las vertientes por procesos naturales tales como meteorización, movimientos tectónicos y actividades humanas que generan movimientos lentos, generalmente imperceptibles. Sin embargo, un solo factor (precipitación, sismos, cambios del nivel de agua o aumento de la erosión en los cauces) es considerado como el estímulo externo que dispara, ya sea por el rápido incremento del esfuerzo cortante o por la reducción de la resistencia, el movimiento de los materiales que conforman la ladera (Wang y Sassa, 2003; Huabin *et al.*, 2005). Los factores que controlan la ocurrencia y distribución de los movimientos en masa se dividen en: variables cuasi-estáticas o condicionantes y variables dinámicas o detonantes. Las primeras incluyen las propiedades del suelo y la topografía, que contribuyen a la susceptibilidad de las laderas y definen la distribución espacial de los movimientos en masa. Las variables dinámicas, son el grado de saturación del suelo y la cohesión que controlan los factores detonantes de las laderas susceptibles (Aristazábal *et al.*, 2010). El clima, los procesos hidrológicos y las actividades humanas, controlan las variables dinámicas y caracterizan el patrón temporal de los movimientos en masa (Crosta y Fratiini, 2003).

### 3.6.1. El Modelo SINMAP (*Stability INdex MAPping*)

El modelo SINMAP emplea el modelo de estabilidad de pendiente infinita, sin considerar los efectos en las fronteras, que realiza un balance de los componentes desestabilizadores generados por efecto de la gravedad y de los componentes de fricción y cohesión en un plano de falla paralelo a la superficie del suelo. La presión de poros debido a la humedad del suelo, estimada a partir de un modelo hidrológico, reduce el esfuerzo normal efectivo, el cual mediante el ángulo de fricción interna, se relaciona con el esfuerzo cortante. La clasificación de la estabilidad del terreno se determina mediante la pendiente, el área de aporte, el tipo de suelo (a través de parámetros cuantificables de los materiales como esfuerzo cortante y cohesión) y condiciones climáticas, principalmente la lluvia (Pack *et al.*, 1998).

Para el mapeo de la estabilidad del terreno, el modelo SINMAP considera la incertidumbre asociada a la estimación de los parámetros. El resultado se reduce a un caso determinístico, cuando los límites de incertidumbre son iguales y la cohesión de las partículas se desprecia. La humedad se determina, sin necesidad de incorporar datos meteorológicos al programa (Pack *et al.*, 1998), mediante la modelación dinámica de distintos eventos de lluvia usados por Wu y Sidle (1995).

SINMAP se usa para la planeación y manejo forestal, ingeniería forestal y otros estudios de riesgo. El nivel de detalle de los mapas generados depende de la precisión del MDE, inventario de deslizamientos, así como la determinación y análisis de la información levantada en campo.

### 3.6.2. Modelos para el Análisis de Movimientos en Masa

Se ha desarrollado una gran variedad de técnicas o enfoques para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa (Dietrich *et al.*, 1986; Montgomery y Dietrich, 1988; Montgomery y Dietrich, 1989; Carrera *et al.*, 1991; Dietrich *et al.*, 1992; Sidle, 1992; Dietrich *et al.*, 1993; Montgomery y Dietrich, 1994; Hutchinson, 1995; Pack, 1995; Wu y Sidle, 1995; Soeters y Van Westen, 1996; Guzzetti *et al.*, 1999; Barredo *et al.*, 2000; Dai y Lee, 2001), las cuales pueden agruparse en: (1) métodos heurísticos basados en el entendimiento de los procesos geomorfológicos que actúan sobre el terreno; (2) métodos estadísticos basados en predicciones estadísticas por combinación de variables generadoras de deslizamientos en el



pasado; y (3) métodos determinísticos basados en modelos de estabilidad, los cuales gracias al desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica se han utilizado en zonificaciones regionales (Pack *et al.*, 2005; Aristazábal *et al.*, 2010).

Estos enfoques se han considerado en programas para el análisis espacial de los deslizamientos mediante la incorporación de las variables que influyen en su generación. Los más usados son: (1) levantamiento de información en campo de sitios susceptibles; (2) proyección de patrones de inestabilidad a futuro a partir del inventario de deslizamientos; (3) análisis multivariado de los factores que caracterizan los sitios de observación; (4) clasificación de la estabilidad con base en criterios como pendiente, litología, formación del suelo o estructura geológica; y (5) análisis de probabilidad de fallas con base en el análisis de estabilidad de taludes y simulación con hidrología estocástica (Montgomery y Dietrich, 1994; Borga *et al.*, 1998; Pack *et al.*, 2005).

Sin embargo, ninguno considera el hecho de que el flujo de detritos está fuertemente controlado por el relieve, la concentración del flujo subsuperficial, el incremento de la saturación del suelo, la presión de poros y la resistencia al esfuerzo cortante (Montgomery y Dietrich, 1994; Pack *et al.*, 2005; Aristazábal *et al.*, 2010); por lo que los análisis con estos modelos, solo reflejan la susceptibilidad de las laderas o la ocurrencia de movimientos en masa. Caracterizar la amenaza por movimientos en masa requiere una evaluación de la susceptibilidad de la ladera a fallar y la probabilidad de ocurrencia del movimiento en términos de tiempo (Crosta y Fratiini, 2003). Para el caso de la amenaza es necesario convertir en términos de frecuencia y magnitud de los factores detonantes, parámetros específicos y dinámicos para el sitio de ocurrencia (van Westen *et al.*, 2006).

En la práctica, la incorporación de estos factores dinámicos o detonantes se realiza por métodos estadísticos o físicos. Los métodos basados en consideraciones estadísticas definen umbrales críticos que relacionan generalmente la ocurrencia del evento con la intensidad y la magnitud de la lluvia. Estos estudios dependen en gran medida de la calidad de los datos, tanto del inventario de movimientos en masa como del registro de lluvias (Aristazábal *et al.*, 2010). Por otro lado, un grupo de investigadores han afrontado este problema desde un punto de vista matemático, desarrollando modelos físicos basados en patrones geotécnicos e hidrológicos que relacionan lluvias, presión de poros y estabilidad de vertientes. Estos modelos evalúan la actividad espacial y temporal de la inestabilidad de las vertientes pero dependen de variables de

entrada y condiciones de frontera (Crosta y Frattini, 2003; Aleotti, 2004; van Beek y van Asch, 2004).

Estos métodos han permitido definir umbrales críticos necesarios, mínimos y máximos, para que un proceso ocurra (Reichembach *et al.*, 1998). El umbral mínimo corresponde al valor inferior por el cual no se registrarán movimientos, en tanto que el umbral máximo representa el umbral sobre el cual los movimientos en masa siempre ocurrirán (Glade *et al.*, 2000). Estos umbrales se establecen al considerar las condiciones específicas de cada área, tales como las características de los suelos, la morfología de la vertiente y la distribución espacial de la lluvia, entre otros (Crosta, 1998).

El modelo SINMAP ha sido aplicado en diversas partes del mundo para conocer las condiciones de riesgo en áreas susceptibles a deslizamientos, principalmente sitios que presentan pendientes escarpadas y regímenes de lluvias extremas.

Virajh-Dias y Gunathilake (2012), en Sri Lanka, identificaron áreas susceptibles a deslizamientos mediante el modelo SINMAP y el Proceso Analítico Jerárquico. La comparación de estos métodos permitió identificar y priorizar áreas con distintos potenciales de deslizamientos.

Terhorst y Kreja (2009) aplicaron el modelo SINMAP en Schönberger Kapf, Alemania, donde identificaron que en la mayoría de las laderas, la interacción entre el relieve, agua y subsuelo, genera inestabilidad e incrementa el riesgo de deslizamientos; debido a que la saturación de los suelos reduce el esfuerzo cortante del subsuelo.

Varol (2012) realizó una evaluación del riesgo de deslizamientos en el Departamento Forestal de Sökü, Turquía, donde identificó que el 32.3% de la superficie presenta deslizamientos activos y en el 14.5% existen deslizamientos pasivos.

Sulaiman y Rosli (2010) utilizaron el modelo SINMAP en la subcuenca Fraser Hill, Malaysia, para comparar distintas láminas de precipitación. Para precipitaciones entre 10 y 40 mm observaron un notable cambio en la identificación de las áreas en riesgo; sin embargo, entre 40 y 120 mm la diferencia fue mucho menor, con variaciones entre 0.04 y 0.62%. Concluyendo

que el modelo para precipitaciones mayores a 110 mm no presenta cambios significativos para identificar áreas susceptibles.

Redin-Vestena (2010) determinó con SINMAP el mapa de riesgo de deslizamientos en la cuenca del río Caeté, ubicada en el municipio de Alfredo Wagner, Brasil. El autor encontró que la asociación de la geología, geomorfología, suelos, hidrología y actividades antropogénicas son los principales condicionantes de los deslizamientos. Del estudio resultó que un 10% de la cuenca presenta áreas con elevada inestabilidad y extrema susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa. Asimismo, recomendó que, estas áreas deben aislarse de las actividades humanas y en las de baja a moderada inestabilidad pueden realizarse actividades humanas pero con cautela, pues son potencialmente inestables.

Chiaradia *et al.* (2012) aplicaron el modelo SINMAP, en una subcuenca del río Serio del Norte de Italia, para conocer el impacto que tienen las raíces sobre los deslizamientos y, para evaluar profundidades de suelo más susceptibles en la generación de deslizamientos. Encontraron que en profundidades donde la cohesión de los suelos fue menor a 5kPa, existía mayor riesgo de presentarse la falla y ocasionar deslizamientos. Estas profundidades se localizaron entre 0.55 y 0.75 m, excepto en áreas forestales perturbadas por la actividad humana donde la profundidad de falla fue de 1.45 m. Estos estudios coinciden con los de Schmidt *et al.* (2001) y Roering *et al.* (2003) quienes encontraron, en áreas forestales, profundidades de falla entre 0.5 y 1.0 m.

Bischetti y Chiaradia (2010) en una cuenca forestal, evaluaron el comportamiento del modelo mediante dos enfoques: el estado estacionario o dinámico de la presión de poros en el suelo y el efecto de la vegetación sobre la resistencia del suelo. Como resultado, propusieron una nueva clase dentro de la clasificación del factor de seguridad, denominado quasi-inestable con un rango entre  $1 < \text{Prob}(\text{FS} > 1) < 0.8$ .

Yilmaz y Keskin (2009) en Sebinkarahisar, Turquía, determinaron los mapas de susceptibilidad a deslizamientos mediante el método de Relación de Frecuencias (FR) y SINMAP. La validación de ambos procedimientos indicó que se obtuvieron mejores resultados con el método FR ya que al comparar el inventario de deslizamientos ocurridos en la región, un 90% de estos se ubicaron en las clases susceptibles; mientras que SINMAP ubicó un 67% en áreas inestables

y un 33% en áreas estables. Los autores atribuyen la menor correlación del modelo SINMAP por limitarse a deslizamientos traslacionales de poca profundidad.

Michel *et al.* (2014), compararon los modelos SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) y SINMAP en la cuenca del río Cunha, Santa Catarina, Brasil. Encontraron que si ambos modelos se calibran con parámetros hidrológicos, SHALSTAB es más preciso para identificar áreas susceptibles a deslizamientos; sin embargo, en áreas con deslizamientos de poca profundidad, SINMAP genera mejores resultados. En el estudio, SHALSTAB clasificó el 13% del área de la cuenca como inestable, mientras que SINMAP clasificó el 30% de la superficie en la misma clase.

### **3.7. TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO**

La Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM, *Multi Criteria Decision Making*, por sus siglas en inglés) es frecuentemente usada para solucionar aquellos problemas de la realidad que se presentan de una manera más compleja.

En situaciones del mundo real, las decisiones toman como base información incierta, vaga o imprecisa y los criterios que se utilizan no son necesariamente independientes (Givarian, *et al.*, 2012).

La incertidumbre de la realidad genera incertidumbre para los tomadores de decisiones, entonces es más apropiado desarrollar un modelo que incluya números y conjuntos difusos (Özdağoğlu, 2012), ya que durante la evaluación, los criterios raramente son independientes, y su relación frecuentemente es caracterizada por un grado de interacción, interdependencia y retroalimentación (Liou y Tzeng, 2012).

Los conjuntos difusos, para poder definir evaluaciones convencionales, trabajan con información inexacta; contrario a la lógica tradicional que trabaja con información definida y precisa (Klir, 1995).

La MCDM puede ser considerada como un proceso complejo y dinámico que incluye una parte de gestión y una parte de ingeniería. La parte de gestión define los objetivos y elige la alternativa final óptima. La naturaleza de la decisión multicriterio tiene énfasis en la gestión con base en la

opinión que los expertos o tomadores de decisiones tienen para aceptar o rechazar la solución propuesta por la ingeniería (Opricovic y Tzeng, 2004).

Para facilitar la investigación sistemática en el campo de la MCDM, Hwang y Yoon (1981) sugirieron clasificarlas en dos categorías (Figura 3.4 y 3.5): continua o multiobjetivo (*Multiple Objective Decision Making*, MODM) y discreta (*Multiple Attribute Decision Making*, MADM).

Una MODM es cuando la función objetivo toma un número infinito de valores y conduce a un número infinito de alternativas; mientras que, cuando el número de alternativas de decisión es finito, se trata de una MADM.

Cuando a estas clasificaciones se les incorpora la metodología de la lógica difusa (*fuzzy logic*), se conocen como *fuzzy MODM* y *fuzzy MADM*.

Los procesos de cambio considerados en la metodología de decisión multicriterio para diferentes atributos, han permitido la generación de nuevos modelos y metodologías aplicables a distintas líneas de investigación.

En los años sesenta surgieron un gran número de modelos que actualmente se consideran como clásicos, entre los que se destacan: la Programación por Metas o *Goal Programming*, el Método ELECTRE (*ELmination Et Choix Traduisant la Réalité*) y el Método Iterativo STEP.

A partir de la década de los ochenta tomó verdadero auge la toma de decisiones con la aplicación del análisis multicriterio mediante la informática y una división en distintas líneas de investigación.

Entre los principales investigadores, destacan el matemático Thomas L. Saaty (1980) quien desarrolló el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, *Analytical Hierarchy Process*) y Brans (1984) que formuló el Método PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations*). Éste último es uno de los métodos más recientes dentro de la categoría de los métodos de optimización, y se usa principalmente para la resolución de problemas de ubicación (Figura 3.5).

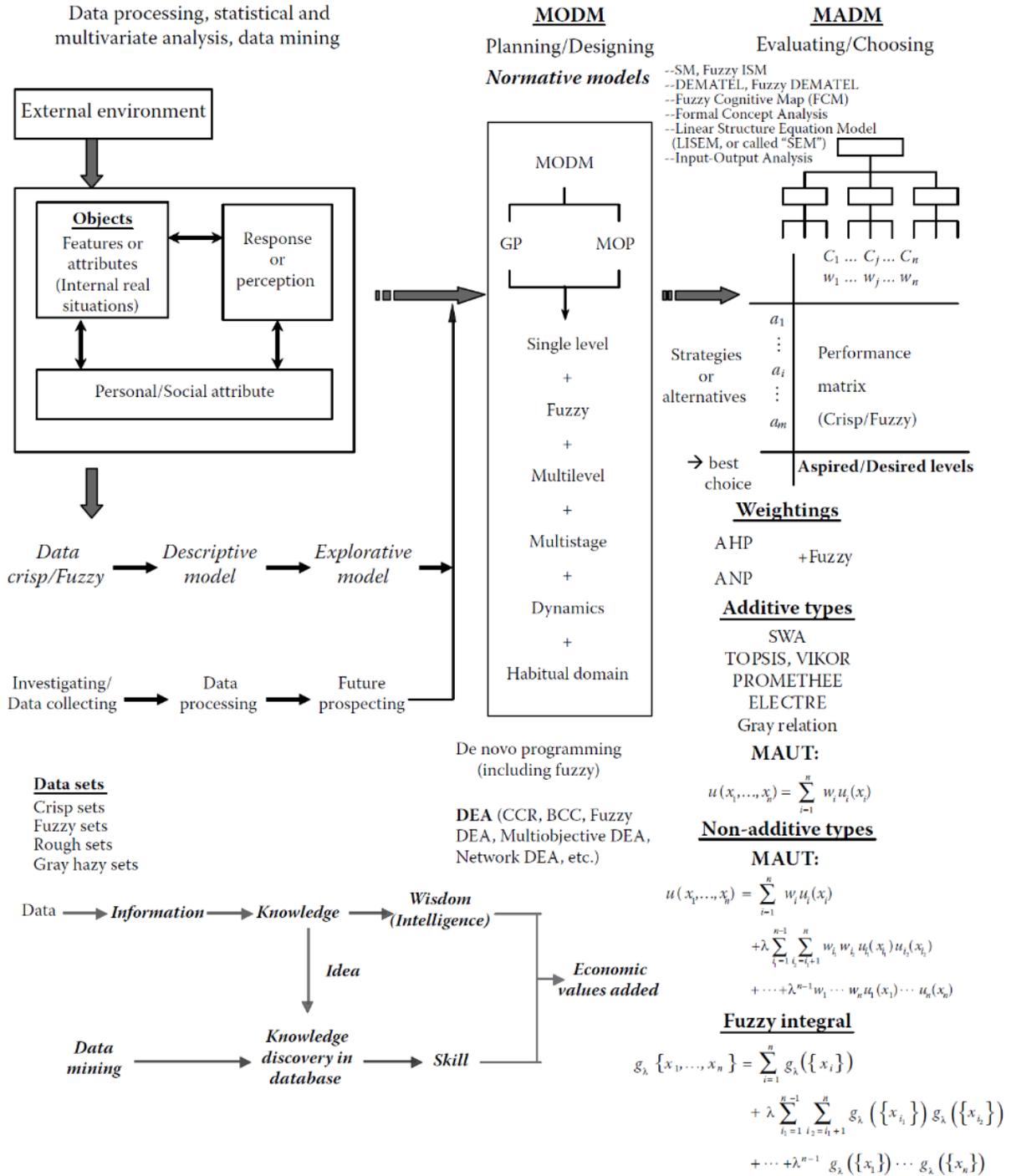


Figura 3.4. Evolución de la decisión multicriterio (MCDM), (Tzeng y Huang, 2011)

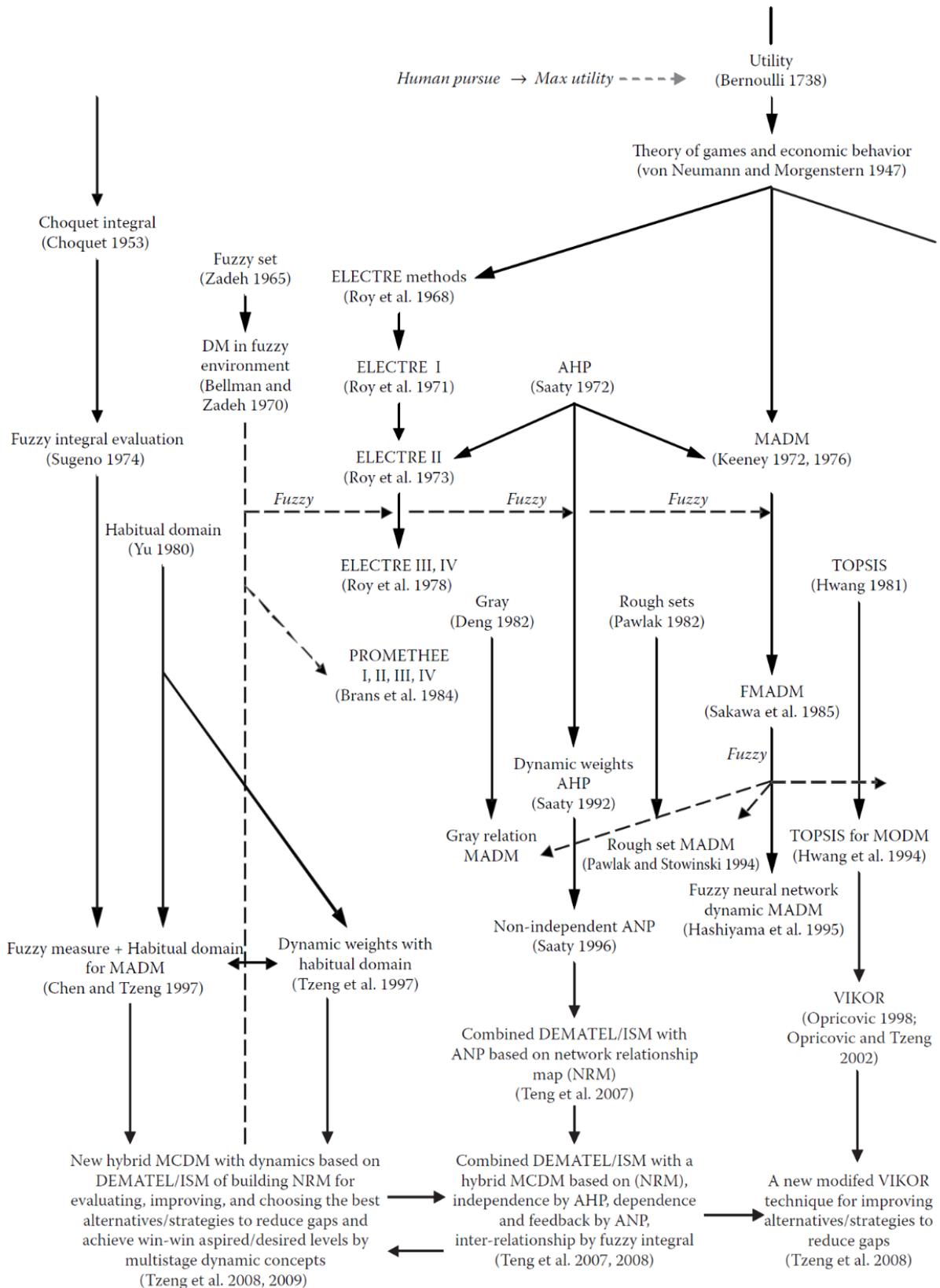


Figura 3.5. Evolución de MADM, (Tzeng y Huang, 2011)



El proceso de la toma de decisiones multicriterio (MCDM) involucra una serie de pasos para la resolución del problema planteado, estas son: identificación del problema, construcción de las preferencias, evaluación de las alternativas y selección de la mejor alternativa. La toma de decisiones es extremadamente intuitiva cuando se consideran problemas con un solo criterio, ya que solo elige la alternativa con mayor escala de preferencia. Sin embargo, cuando los tomadores de decisiones evalúan alternativas con criterios múltiples, diferentes problemas, distintas ponderaciones por criterio, dependencia de las preferencias y conflictos entre criterios, se vuelve un problema complicado que requiere la implementación de métodos más sofisticados (Tzeng y Huang, 2011).

Con el fin de resolver los problemas mediante la toma de decisiones multicriterio, el primer paso es identificar cuantos componentes y criterios tiene el problema y su comportamiento (identificación del problema), enseguida se obtiene información de los expertos con base en los criterios definidos para el problema (construcción de las preferencias); posteriormente se plantean las posibles alternativas o estrategias que garanticen alcanzar el objetivo o meta; finalmente se selecciona un método para evaluar, clasificar, priorizar o mejorar las alternativas y/o estrategias (encontrar y determinar la mejor alternativa).

El análisis del problema puede ser cualitativo o cuantitativo. El análisis es cualitativo cuando se basa en la intuición, experiencia y razonamiento de aquellos que participan en el proceso de elección, debido a que los datos disponibles son confusos e incompletos. El análisis es cuantitativo, cuando las decisiones se basan en hechos y datos relacionados con el problema, a partir de los cuales, para describir los objetivos, se establecen relaciones matemáticas, restricciones y dependencias existentes en el problema.

### **3.7.1. Aplicación del Análisis Multicriterio**

En la actualidad, los distintos métodos de la Toma de Decisiones Multicriterio no se aplican únicamente al campo de la economía sino que su uso se ha extendido, en mayor o menor medida, a otras disciplinas como agricultura de precisión (Tellaeché *et al.*, 2008), selección de proveedores (Bottani y Rizzi, 2008; Hsu *et al.*, 2012; Tas, 2012), selección de socios (Büyüközcan *et al.*, 2008), evaluación de software's (Büyüközcan y Ruan, 2008; Almulhim *et al.*, 2012), selección de proyectos (Doerner *et al.*, 2008), selección de prioridades (Hung *et al.*,

2008; Aher *et al.*, 2013), métodos de selección de control de puentes (Pan, 2008), planeación de estrategias de cambio climático (Qin, 2008), planeación del tratamiento de aguas residuales (Simonovic y Verma, 2008), selección de alternativas (Wadhwa, 2008; Torfi *et al.*, 2010), manejo de recursos hídricos (Anand-Raj y Nagesh-Kumar, 1996; Anand-Raj y Nagesh-Kumar, 1998; Srdjevic y Pinto-Medeiros, 2008; Zarghami *et al.*, 2008; Ashari-Alias *et al.*, 2009; Regulwar y Anand-Raj, 2009; Zarghami y Szidarovszky, 2009; Calizaya *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011; Jaiswal *et al.*, 2014), cadenas de suministro ecológicas (Büyüközcan y Çifçi, 2012), planeación de negocios en línea (Chiu *et al.*, 2013), susceptibilidad a deslizamientos (Muñiz-Jauregui y Hernández-Madrigal, 2012.), evaluación del riego de erosión (Nekhay *et al.*, 2009), entre muchas más.

### **3.7.2. Proceso Analítico en Red (ANP)**

El Proceso Analítico en Red (ANP, por sus siglas en inglés) es una generalización del Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) donde ANP sustituye las jerarquías por redes, permitiendo simular las condiciones reales de la toma de decisiones (Saaty, 1996; Giner-Santoja, *et al.*, 2012). Mientras que AHP es una forma simple de resolver las decisiones cotidianas, ANP es mucho más amplio y profundo y puede aplicarse a decisiones complejas con numerosas interacciones y dependencias. Se recomienda ANP para aquellos casos en los que se necesita un análisis sistemático (Saaty, 2001; Aragonés-Beltrán, *et al.*, 2014).

La diferencia entre AHP y ANP, en cuanto a las influencias de los elementos que estructuran una decisión, se puede sintetizar así: en general, las jerarquías se refieren a la distribución de una propiedad (objetivo) entre los elementos que se comparan, valorando qué elemento es preferido en mayor grado. Las redes conciernen a la distribución de preferencia/influencia de varios elementos sobre otro elemento, respecto de una propiedad dada (Giner-Pantoja, 2010).

Muchas decisiones no pueden estructurarse en jerarquías, ya que sus elementos en distintos niveles presentan interacciones y dependencias. No sólo la importancia de los criterios determina la importancia de cada alternativa, sino que además la importancia de las alternativas en sí determina la relevancia de los criterios. No se puede reducir la complejidad de ciertas decisiones a una simple estructura de dos niveles, criterios y alternativas, y esperar que los

juicios correspondientes reflejen todas las interacciones del mundo real. Los juicios deben provenir de estructuras mucho más elaboradas (Nekhay *et al.*, 2009).

Al emplear ANP, no se tiene la restricción de ordenar los componentes de la decisión en forma de cadena jerárquica. Es posible representar cualquier decisión mediante una red. Mientras que AHP tiene una estructura visiblemente más comprensible, en la que se aprecia claramente el flujo de influencia, ANP permite desarrollar estructuras más naturales, lo cual es más adecuado para describir el mundo real. Ello permite afirmar que las decisiones jerárquicas, a causa de su imposición estructural, son más propensas a ser más subjetivas y predeterminadas. Sin embargo, ANP requiere mayor trabajo para conocer todas las interacciones entre componentes, además de una mayor cantidad de algoritmos computacionales.

Decir que un elemento predomina sobre otro es una manera genérica de afirmar que es más importante, se prefiere o tiene mayor probabilidad de ocurrir. Existen dos tipos de predominancia: directa e indirecta. Para el predominio directo, se comparan parejas de elementos para determinar en cuál predomina una propiedad. Para el predominio indirecto, exclusivo de ANP, se comparan elementos por parejas para determinar la influencia en un tercer elemento con respecto a una propiedad (Saaty, 1996).

Como se ha mencionado, ANP es una extensión generalizada de AHP, donde este último utiliza como fundamentos matemáticos cuatro principales axiomas (Saaty, 1980):

**Axioma 1. Reciprocidad.** Dadas dos alternativas  $A_i$  y  $A_j$  pertenecientes a  $A_xA$ , la intensidad de la preferencia de  $A_i$  sobre  $A_j$  es inversa a la intensidad de preferencia de  $A_j$  sobre  $A_i$ .

**Axioma 2. Homogeneidad.** Cuando se comparan dos alternativas, el decisor nunca juzga, bajo ningún criterio, a una como infinitamente superior a la otra. Además, para comparar dos elementos, de acuerdo a un criterio dado, es necesario disponer de una escala acotada.

**Axioma 3. Dependencia.** Los problemas de decisión pueden ser formulados como una jerarquía.

**Axioma 4. Expectativas.** La jerarquía es un modelo que representa todos los criterios y alternativas.

Además, AHP toma en consideración la escala fundamental de comparaciones pareadas, la cual se muestra en el Cuadro 3.2.

**Cuadro 3.2. Escala fundamental de Saaty de comparaciones pareadas. Saaty 1996**

Valor	Definición	Comentarios
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente al criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	
Recíprocos de lo anterior	Si el criterio A es de importancia grande frente al criterio B, las notaciones serán las siguientes: Criterio A frente a criterio B 5/1 Criterio B frente a criterio A 1/5	

El método ANP puede ser utilizado como un instrumento eficaz cuando las interacciones entre los elementos de un sistema forman una estructura en red. Su construcción considera dos fases: la primera comprende la construcción de la red y la segunda el cálculo de las prioridades de los elementos en la red. Para construir la estructura del problema, todas las interacciones entre criterios y alternativas deben ser consideradas. Una vez que la red está completa, se realizan las comparaciones por parejas en función de las interacciones existentes entre los criterios considerados (García-Gómez, 2010).

### 3.7.3. Aplicaciones del Modelo ANP

Actualmente, ANP ha sido utilizado en diversas disciplinas que requieren modelar problemas complejos donde AHP no permite describir el comportamiento e interacción de los criterios que intervienen. A continuación se presenta una recopilación de algunos trabajos importantes en donde se ha aplicado el método ANP.

Aznar-Bellver *et al.* (2010) aplicaron el Proceso Analítico en Red para la valoración de inmuebles urbanos en España. El método ANP permitió tomar en consideración dos estrategias: a) especificar para cada vivienda la influencia de las variables que explican el valor de mercado y b) incluir relaciones de interdependencia entre variables explicativas. De esta forma, la metodología permite al evaluador abordar situaciones complejas desde enfoques distintos a los tradicionales.

Ponce *et al.* (2013), aplicaron en España el Proceso Analítico en Red para desarrollar un modelo que permite establecer la influencia de un conjunto de objetivos estratégicos a través de la red de relaciones entre los actores y los factores que interactúan en el sistema de transporte aéreo de mercancías. Encontraron que existe una influencia de los actores relacionados con la legislación, la industria de fabricación de aeronaves y las compañías aéreas en la planificación estratégica del sector, y que el objetivo estratégico más influyente está relacionado con la seguridad tanto en los procesos como con respecto a acciones externas.

Chen *et al.* (2010) combinaron los métodos DEMATEL (*Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*) y ANP para conocer, cualitativa y cuantitativamente, los efectos de los criterios considerados en los planes de manejo de cuencas en Taiwan. Encontrando que los mejores planes son aquellos que toman en consideración y en el siguiente orden, los criterios como Conservación del Medioambiente, Planeación Ambiental, Restauración Ecológica, Manejo de Cuencas y Control de la Erosión.

Lu *et al.* (2013) realizaron un análisis de alternativas en el área del cuidado a la salud para adoptar la tecnología de identificación por radiofrecuencia. Crearon un modelo con la combinación de tres métodos; DEMATEL para construir la red de influencias, ANP para ponderar las influencias tanto de los criterios como de los componentes y VIKOR

(*VIšekriterijumska Optimizacija I KOmpromisno Resenje*, Optimización Multicriterio y Solución Compromiso) para clasificar las alternativas y mejorar el rendimiento de estas. Encontraron que la integración de la tecnología es uno de los criterios que más influyen en la adopción de la tecnología de identificación por radiofrecuencia en la industria del cuidado de la salud en Taiwan.

Chiu *et al.*, (2013) evaluaron y mejoraron las estrategias para reducir los vacíos en la satisfacción del cliente, cuando se realiza la compra de productos mediante tiendas en línea, debido a problemas de interdependencia y retroalimentación causados por diversos componentes y criterios que influyen en la decisión. Aplicaron los métodos DEMATEL, ANP y VIKOR para identificar la forma de crear estrategias de mercado que reduzcan los vacíos entre los criterios y los componentes a fin de que los consumidores incrementen sus compras.

### **3.8. IMPORTANCIA DE LA PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE**

A partir de la revisión de literatura realizada sobre las metodologías existentes para la priorización de áreas de drenaje a distintos niveles de intervención, se encontró que sólo algunas utilizan métodos sustentados en una base matemática sólida; la mayoría de éstas solo establecen relaciones subjetivas en función de las variables que se utilizan, asignando ponderaciones relativas que al final definen la prioridad. Sin embargo, con el uso del modelo ANP, se elimina la subjetividad de las ponderaciones al obtener valores cuantitativos para cada uno de los criterios de las áreas de drenaje a priorizar, lo que permite conocer la influencia entre componentes o entre criterios, eliminando las asignaciones cualitativas. Además, el modelo está apoyado en el uso de matrices pareadas con valores obtenidos a partir de la escala fundamental de Saaty, facilitando la determinación de las influencias entre variables.

De las metodologías descritas en éste capítulo, no existe alguna que involucre la serie de componentes (seis) que se proponen en la metodología desarrollada en esta investigación, así como el número de criterios (dieciocho) utilizados. Además, la sistematización de la investigación está diseñada para identificar aquellas áreas con problemas de degradación de los suelos, permitiendo priorizar no sólo las subcuencas, sino también las variables o criterios que más influyen sobre la situación actual de las áreas de drenaje; con esta información será posible desarrollar planes de manejo de áreas de drenaje, acordes a las necesidades específicas de las



áreas prioritarias, logrando tener un mayor impacto y seleccionando de forma concreta las acciones necesarias por área a intervenir.

La aplicación del modelo ANP en las áreas de drenaje permitirá mejorar la calidad de los resultados para la priorización de áreas de drenaje, lo cual está asociado con un mejor análisis para la toma de decisiones cuando se requiere identificar áreas de intervención para atender la problemática de la misma.

Estas acciones focalizadas, permitirán mejorar las condiciones de las áreas de intervención y se reflejará en un mayor impacto en las áreas de atención, logrando disminuir la problemática de la región, específicamente en los procesos de degradación de los suelos como la erosión hídrica, la producción de sedimentos, la susceptibilidad de las áreas vulnerables a deslizamientos, entre otras. También será posible la elaboración de planes de manejo de áreas de drenaje que contemplen acciones estructurales y no estructurales en cauces, laderas, zonas agrícolas y en saneamiento rural y urbano cuando existan centros de población importantes.

De esta forma, el uso del modelo ANP en la priorización de áreas de intervención, es una herramienta que debe utilizarse en la gestión integrada de los recursos hídricos con enfoque de cuencas para lograr que la implementación de proyectos de diversa finalidad tengan impacto en las regiones que se prioricen.



## **CAPÍTULO IV. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una metodología para priorizar cuencas mediante componentes y criterios que relacionen la morfometría, hidrología, estabilidad de laderas, cobertura vegetal y condiciones socioeconómicas para la elaboración de planes de manejo integrales.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un análisis morfométrico e hipsométrico para integrar la matriz de priorización de áreas de intervención.
- Estimar la variación de los escurrimientos superficiales, en las áreas de intervención, como componente de la matriz de priorización.
- Determinar la estabilidad de las áreas de drenaje para utilizarlo en la matriz de priorización.
- Analizar la variación espacial y temporal de la cobertura vegetal en función del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI).
- Aplicar el Proceso Analítico en Red (ANP) para priorizar áreas de intervención.

### **4.3. HIPÓTESIS**

La morfometría, la hidrología, la estabilidad de las laderas, los cambios de la cobertura vegetal y las condiciones socioeconómicas permiten priorizar las áreas de intervención para la restauración hidrológica ambiental a nivel cuenca.

El Proceso Analítico en Red puede utilizarse para priorizar áreas de drenaje.

## CAPÍTULO V. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo presenta los materiales y la metodología de priorización de las áreas de drenaje de la cuenca del río Huehuetán, en el Estado de Chiapas, a través del Proceso Analítico en Red, considerando su localización geográfica, la delimitación de la cuenca, los parámetros morfométricos, las variables hidrológicas estimadas con SWAT, el riesgo a deslizamientos en laderas (índice de estabilidad y grado de saturación del suelo), el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) de la cobertura vegetal y los indicadores socioeconómicos.

### 5.1. 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  $751.90 \text{ km}^2$  pero en este estudio se consideró solo el área definida por la estación hidrométrica (EH) Huehuetán ( $319.41 \text{ km}^2$ ) a la que en lo sucesivo, en este documento, se referirá como cuenca del río Huehuetán o cuenca Huehuetán (Figura 5.1).

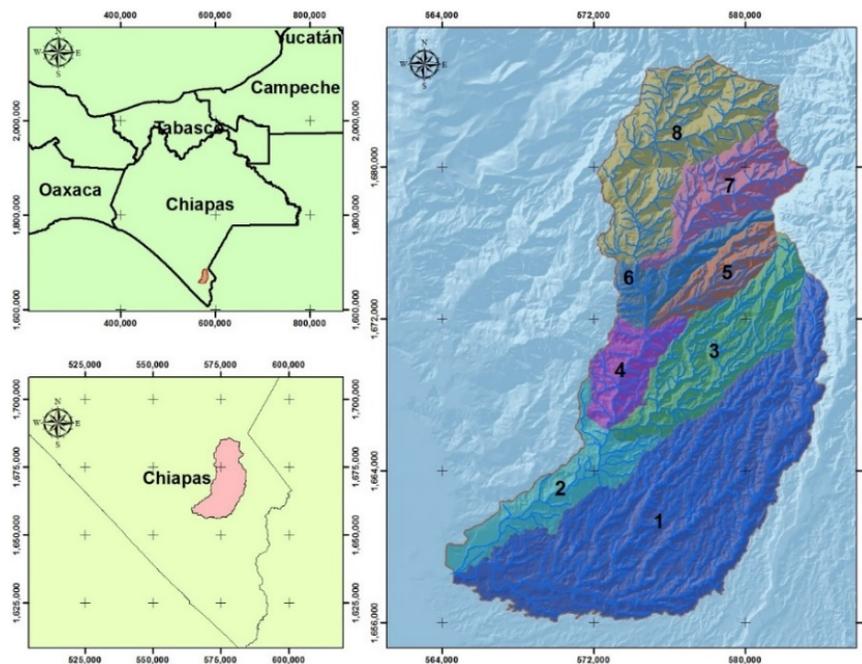


Figura 5.1. Localización de la cuenca y subcuencas hasta la EH Huehuetán



La delimitación de la cuenca del río Huehuetán y sus subcuencas, hasta la EH Huehuetán, se realizó a partir de un MDE en escala 1:20,000 (INEGI, 2013) aplicando la metodología de Otto Pfafstteter (Pfafstteter, 1989 (manuscrito inédito); Verdin, 1997) con el apoyo del módulo de delimitación de cuencas del modelo SWAT. Se definieron 8 subcuencas (Figura 5.1) con las principales características que se muestran en el Cuadro 5.1.

Para la delimitación de las áreas de drenaje se utilizó un modelo digital de elevaciones (MDE) de 10 m, generado a partir de curvas de nivel a cada 10 m con escala 1:20,000 (INGEI, 2013). La red hidrográfica se obtuvo de la página de internet del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en escala 1:50,000 y 1:20,000. El punto de salida de las subcuencas se definió con base en la unión de cauces naturales.

**Cuadro 5.1. Subcuencas delimitadas en la cuenca del río Huehuetán, hasta la EH Huehuetán**

Subc.	Área (ha)	Área (%)	Centroide		Punto de salida		Elevaciones (msnm)		
			Lat. (°)	Long. (°)	Lat. (°)	Long. (°)	Mín.	Media	Máx.
1	12,953.25	40.57	15.019	-92.307	15.002	-92.398	30.0	465.0	1,960.0
2	2,548.84	7.98	15.035	-92.350	15.002	-92.398	30.0	247.5	660.0
3	4,158.61	13.03	15.103	-92.274	15.070	-92.322	212.0	902.2	2,430.0
4	1,656.52	5.19	15.099	-92.308	15.070	-92.322	212.0	572.2	850.0
5	1,422.89	4.46	15.139	-92.271	15.118	-92.304	508.0	1,205.3	2,520.0
6	1,424.77	4.46	15.152	-92.280	15.118	-92.304	506.0	954.4	2,630.0
7	2,591.80	8.12	15.184	-92.267	15.148	-92.308	660.0	1,745.4	2,660.0
8	5,170.29	16.19	15.218	-92.283	15.148	-92.308	658.0	1,650.2	2,690.0
Total	31,926.97	100.00							

## 5.2. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO BIOFÍSICO

### 5.2.1. Fisiografía

La cuenca pertenece a la provincia denominada Cordillera Centroamericana (XV) y ocupa a las subprovincias Volcanes de Centroamérica y Llanura Costera de Chiapas y Guatemala. El territorio de la cuenca está conformado por la Sierra Alta Volcánica, Sierra Baja de Laderas Tendidas y Llanura Costera con Lomerío.

### 5.2.2. Relieve

Las condiciones de relieve de la cuenca están claramente definidas por dos zonas; la parte media-alta exhibe un relieve escarpado de montaña con pendientes mayores de 10% y elevaciones entre los 30 a los 2,690 msnm (Cuadro 5.1), que cubre la mayor parte de la cuenca; la parte baja presenta una planicie expuesta a frecuentes inundaciones provocadas por las crecientes avenidas antes de descargar al Océano Pacífico. En la Figura 5.2 se observa la variación de las pendientes, que están directamente relacionadas con las topoformas.

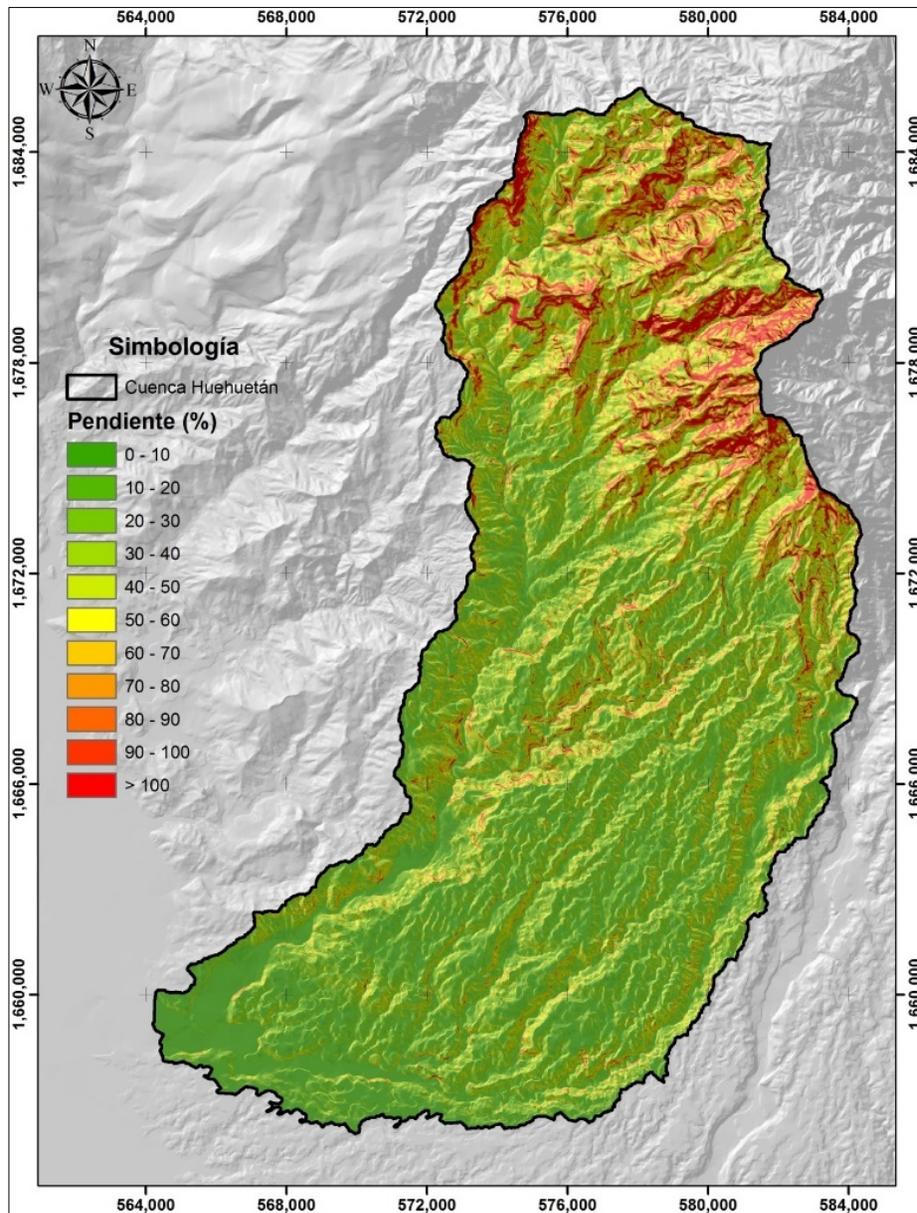


Figura 5.2. Variación de las pendientes en la cuenca del río Huehuetán

Las pendientes mayores del 10% ocupan el 83.15% (26,560.02 ha) de la superficie de la cuenca y tan sólo el 16.85% (5,381.34 ha) corresponde a pendientes mayores de 10%. Esta variación influye en la presencia de relieves escarpados, áreas expuestas a los efectos de los eventos hidrometeorológicos, generación de grandes volúmenes de escurrimiento y sedimentos producto de la erosión en laderas, cauces y los movimientos en masa en eventos extremos.

La pendiente media de la cuenca es de 35%, lo que indica su condición de zona montañosa expuesta a movimientos en masa (Cuadro 5.2). La zona con pendientes menores del 10% cubren poco más de 5 mil hectáreas, pero aguas abajo de la estación de aforo existe una planicie con pendientes menores del 2%, que cubre más de 43 mil hectáreas, con alto riesgo de inundación por la acumulación de azolves en el cauce del río y que requiere de continuos desazolves para recuperar su capacidad para desalojar los escurrimientos superficiales.

*Cuadro 5.2. Superficie ocupada en la cuenca, en función de la variación de la pendiente*

<b>Rango de pendientes (%)</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>Superficie (%)</b>
0 – 10	5,381.34	16.85
10 – 20	5,075.70	15.89
20 – 30	5,437.24	17.02
30 – 40	4,409.18	13.80
40 – 50	3,404.16	10.66
50 – 60	2,567.30	8.04
60 – 70	1,839.51	5.76
70 – 80	1,278.05	4.00
80 – 90	850.58	2.66
90 – 100	558.91	1.75
> 100	1,139.39	3.57
<b>TOTAL</b>	<b>31,941.36</b>	<b>100.00</b>

### 5.2.3. Climatología

Las variaciones del relieve y sus elevaciones influyen sobre el clima, de tal manera que en la cuenca se encuentran cuatro tipos de clima: (A)C(m) (semicálido húmedo), Am (cálido húmedo), Aw2 (cálido subhúmedo) y C(m) (templado húmedo). Esta clasificación de los climas fue obtenida con base en las modificaciones que Enriqueta García (1964) realizó a la clasificación climática de Köppen (1936).

En la cuenca, la distribución de las lluvias varía en función de las elevaciones topográficas. La precipitación promedio anual se obtuvo de las Normales Climatológicas, reportadas por el Servicio Meteorológico Nacional para el periodo de 1981 a 2010 (Cuadro 5.3), de 12 estaciones dentro y cercanas al área de estudio. Con esta información se elaboró el mapa de isoyetas (Figura 5.3).

*Cuadro 5.3. Estaciones meteorológicas utilizadas para la elaboración del mapa de isoyetas*

Clave	Nombre	Lat. (°)	Long. (°)	Altitud (msnm)	Pmed <sub>anual</sub> (mm)	Tmed <sub>anual</sub> (°C)
7333	Buenos Aires, Motozintla	15.19	-92.17	260	1,085.0	16.80
7014	Belisario Domínguez, Motozintla	15.17	-92.22	660	2,131.0	21.20
7012	Finca Argovia, Tapachula	15.09	-92.18	620	4,240.0	27.00
7061	Finca Hamburgo, Tapachula	15.08	-92.20	1,225	3,839.0	19.50
7077	Huixtla, Huixtla	15.08	-92.28	40	2,820.0	24.90
7057	Finca Chicharras, Tapachula	15.06	-92.15	1,264	4,232.0	20.80
7075	Huehuetán, Huehuetán	15.01	-92.24	44	2,273.0	25.10
7336	Plan de Iguala, Huehuetán	14.59	-92.29	38	1,362.0	25.50
7191	Malpaso, Tapachula	14.57	-92.16	303	3,802.0	21.90
-----	Cuilco	15.24	-91.57	1,120	909.0	22.10
7200	Tapachula, Tapachula	14.56	-92.16	179	1,888.0	24.00
7326	Mazatán, Mazatán	14.51	-92.26	15	1,864.0	25.70

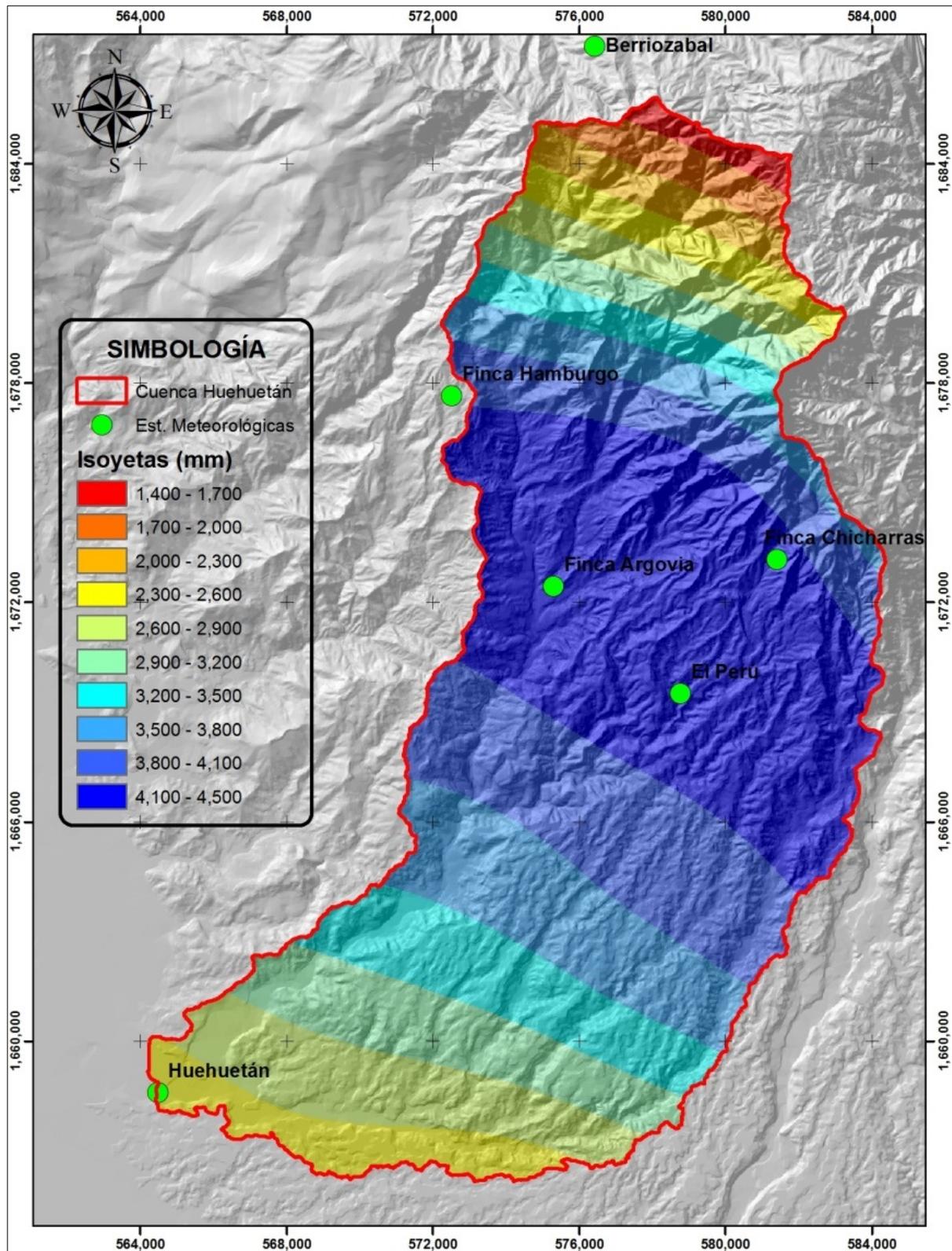


Figura 5.3. Distribución espacial de la precipitación (isoyetas) en la cuenca

La precipitación anual varía de 1,200 mm, en la parte baja, hasta más de 3,500 mm en la parte media y alta de la cuenca. La distribución temporal de la precipitación se concentra en el periodo de verano con variaciones de más de 600 mm y con épocas de secas en el invierno con menos de 100 mm en la parte media de la cuenca (Figura 5.4) y con precipitaciones menores de 400 mm en los meses más húmedos en verano y sin lluvias en invierno en la parte baja (Figura 5.5).

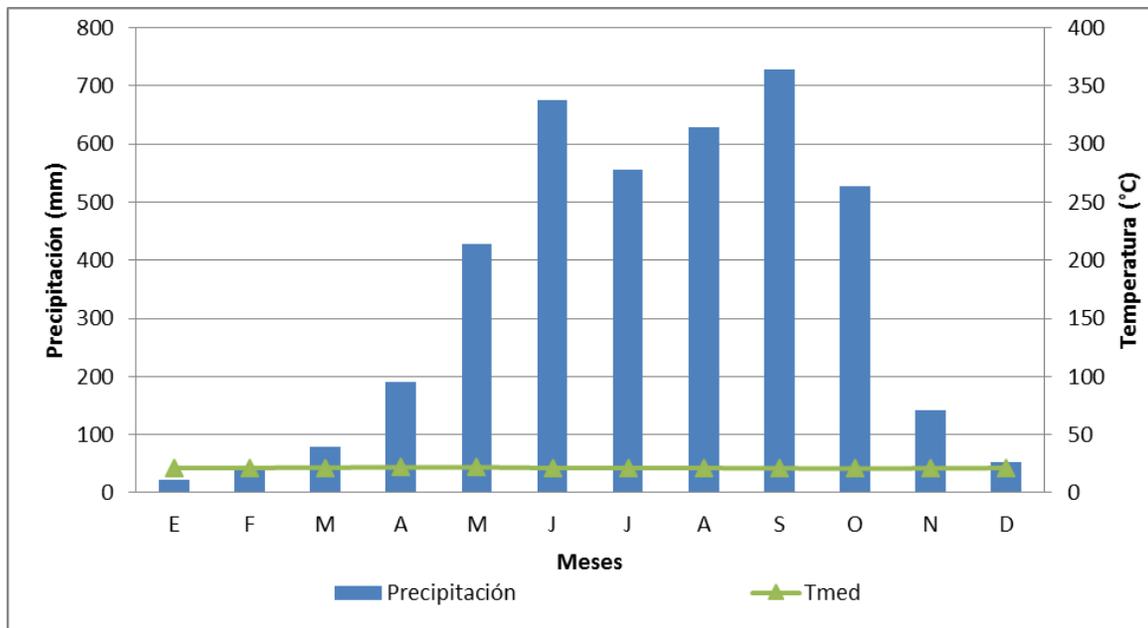


Figura 5.4. Climograma para la estación 7061, Finca Hamburgo

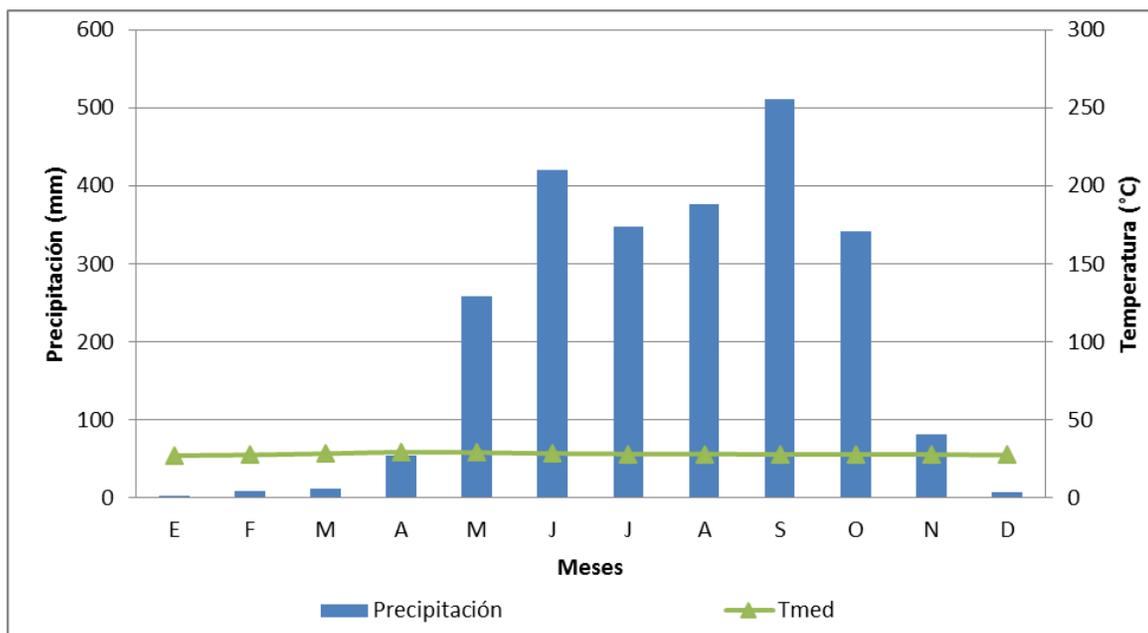


Figura 5.5. Climograma para la estación 7075, Huehuetán

Las figuras 5.4 y 5.5, muestran la variabilidad de la lluvia con respecto a la ubicación espacial de las estaciones. Así, en la parte baja de la cuenca (Figura 5.5), la temporada de lluvias ocurre entre abril y parte de noviembre con precipitaciones mensuales menores a los 600 mm, mientras que en la parte media-alta, éstas se presentan todo el año con precipitaciones que superan los 700 mm, principalmente en el mes de septiembre.

#### **5.2.4. Geología**

Con base en la información obtenida de cartas geológicas en escala 1:250,000 (INEGI, 2013), en la cuenca se identifican dos clases de rocas: sedimentarias ( $T_{s_{cg}}$ ) e ígneas, de ésta última se distinguen dos tipos que son extrusiva básica ( $T_{s_{Igei}}$ ) e intrusiva ácida ( $P_{Igia}$ ). Estas rocas están asociadas al comportamiento de los deslizamientos en masa ya que en la parte alta, la exposición del material parental es producto de los deslizamientos.

#### **5.2.5. Tipos de Suelo**

De acuerdo con la información obtenida de cartas edafológicas en escala 1:250,000 (INEGI, 2013), 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.

Para la aplicación de los modelos hidrológicos y de estabilidad de laderas, se requieren conocer las principales propiedades físicas y químicas de los suelos. Velescu (2009) realizó un estudio detallado de suelos en la cuenca del río Huehuetán, mediante el trazo de un corte longitudinal de la cuenca, donde identificó 10 perfiles de suelo a distintas profundidades. En el Cuadro 5.4, se muestran las propiedades físicas y químicas, para el primer horizonte edafológico analizado, el más importante de los suelos.

**Cuadro 5.4. Propiedades físico-químicas de la capa superficial (horizonte Ah) de los suelos analizados para la cuenca del río Huehuetán. Velescu, 2009**

Clave	Tipo de suelo	Prof. (cm)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Textura (%)			M. O. (%)	pH	C <sub>tot</sub>
				Arena	Limo	Arcilla			
LA1	Fluvisol endogleico	20	1.00	55.41	39.72	4.87	1.56	6.19	0.91
DH1	Alisol hiperálico	5	1.25	13.08	28.27	58.65	6.89	5.14	4.00
GIB1	Alisol hiperálico	8	1.11	20.28	41.00	38.73	6.00	5.89	3.49
ARG1	Cambisol háplico	20	1.09	47.81	26.20	25.99	4.01	5.55	2.33
CHI1	Andosol vítrico	25	0.80	36.73	33.64	29.63	7.05	4.92	4.10
CHA1	Andosol vítrico	15	0.79	35.57	53.26	11.17	7.85	4.71	4.56
MIR1	Andosol fúlvico	25	0.33	14.13	37.71	48.15	23.73	5.06	13.80
CEL1	Andosol fúlvico	25	0.63	22.27	39.39	38.33	11.67	5.33	6.78
BOS1	Andosol vítrico	15	0.64	24.63	41.72	33.65	14.97	4.96	8.70
SV2	Andosol úmbrico	18	0.61	28.67	37.19	34.14	13.22	5.27	7.69

Esta información sirvió de base para la aplicación de los modelos SWAT y SINMAP, ya que requieren de las condiciones específicas de los suelos para simular el comportamiento del agua en el proceso de infiltración, grado de saturación y generación de fallas. Se obtuvieron los resultados que describen las condiciones tanto en las laderas (SINMAP), así como en los cauces (SWAT), de cada una de las subcuencas analizadas, que se utilizaron para realizar la priorización de las áreas de drenaje.

En la Figura 5.6 se muestra el corte longitudinal realizado por Velescu (2009), y la ubicación de cada uno de los perfiles de suelo.

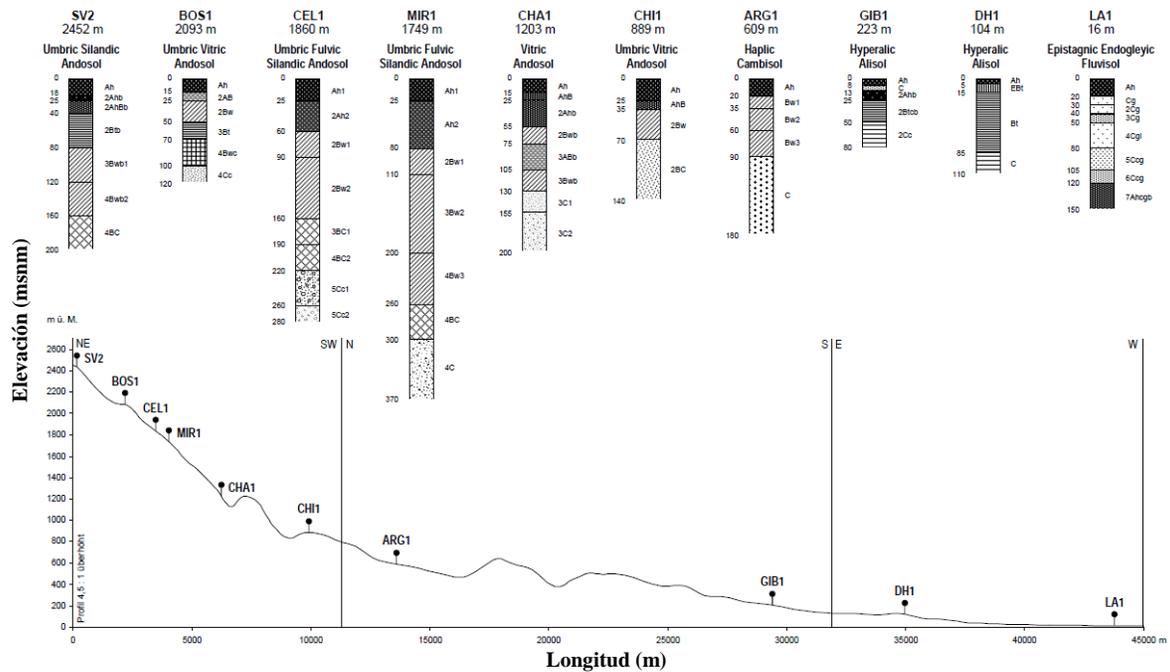


Figura 5.6. Corte transversal sobre la cuenca del río Huehuetán y ubicación de los sitios de muestreo. Velescu, 2009

### 5.2.6. Hidrología

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).

La red de drenaje se obtuvo a partir de la información de INEGI, en escala 1:50,000 y 1:20,00, y se corrigió mediante el módulo de delimitación de cuencas del modelo SWAT, utilizando un modelo digital de elevaciones (MDE) de 10 metros de resolución (Figura 5.7).

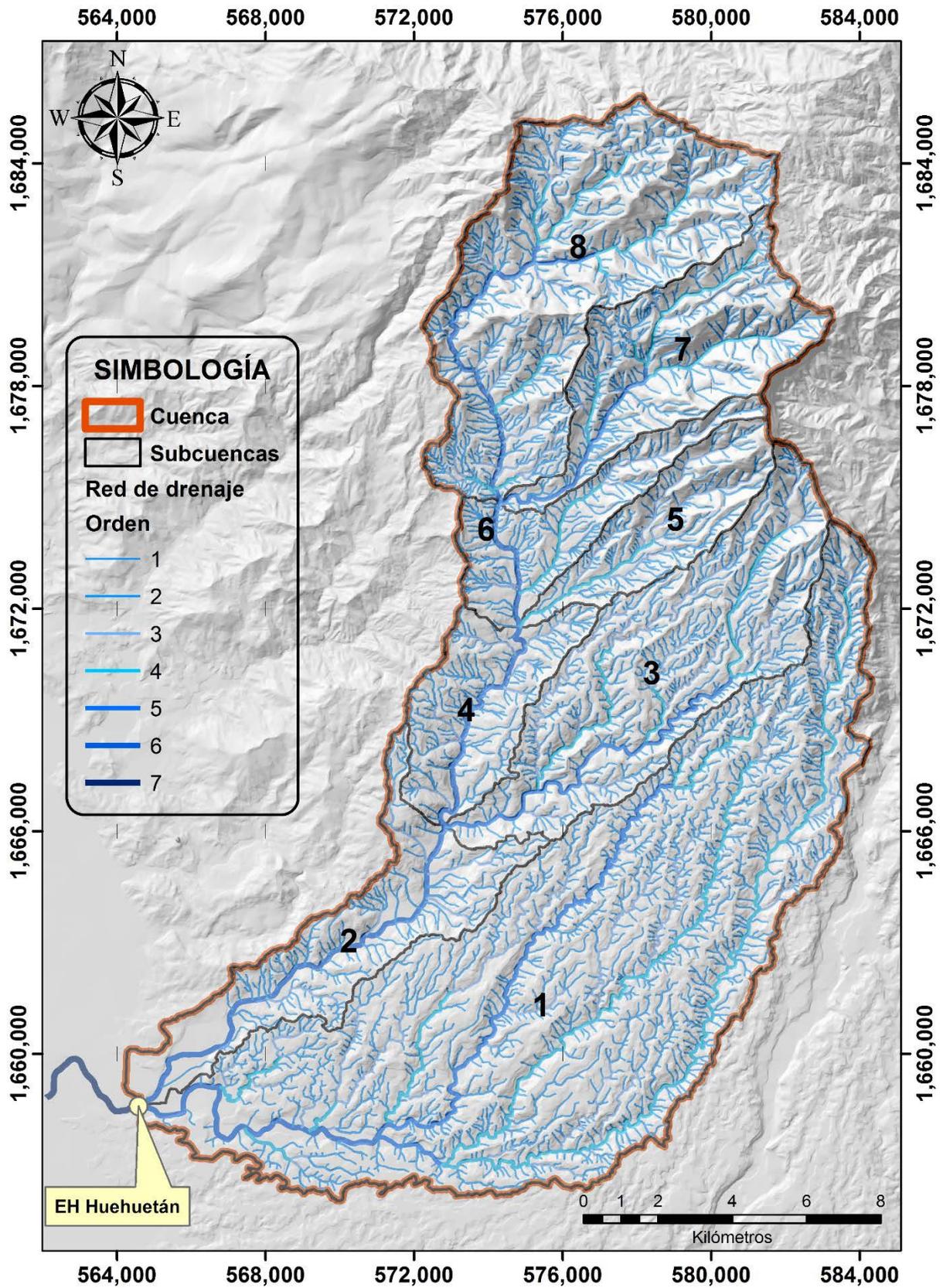


Figura 5.7. Red de drenaje de la cuenca del río Huehuetán

A partir del modelo digital de elevaciones (MDE) y de la delimitación automática de la cuenca del río Huehuetán, se calcularon los parámetros de forma, de relieve y relativos a la red de drenaje (Cuadro 5.5).

*Cuadro 5.5. Análisis morfométrico realizado para la cuenca del río Huehuetán*

Parámetro morfométrico	Valor	Parámetro morfométrico	Valor
Área (km <sup>2</sup> )	319.41	Tipo de drenaje	Dendrítico
Perímetro (km)	132.68	Tiempo de concentración (horas)	3.37
Longitud del cauce principal (km)	41.59	Densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> )	5.03
Índice de forma (adim.)	0.185	Densidad hidrográfica (cauces/km <sup>2</sup> )	19.96
Relación de circularidad (adim.)	0.23	Longitud total de corrientes (km)	1,607.24
Coefficiente de compacidad (adim.)	2.09	Número de orden	7
Relación de elongación (adim.)	0.48	Elevación mínima (msnm)	30
Pendiente de la cuenca (%)	38.79	Elevación media (msnm)	858.13
Pendiente media del cauce principal (%)	6.40	Elevación máxima (msnm)	2,690
Sistema de drenaje	Dendrítico	Relación de bifurcación media	4.02

Las características morfométricas definen de forma cuantitativa (valores numéricos) los rasgos propios de la superficie terrestre, los cuales permiten comparar una superficie terrestre con otra. Las propiedades morfométricas ayudan a documentar la analogía territorial y establecer para paisajes complejos, relaciones hidrológicas en valores simples de generalización territorial (Racca, 2007).

El comportamiento de la red hidrológica de una cuenca puede modificarse según las propiedades morfométricas de las áreas de drenaje que la conforman, ya que esta tiene relación con su capacidad para desalojar los volúmenes precipitados y escurridos. Es decir, operan para incrementar o disminuir el volumen del escurrimiento superficial, la velocidad del movimiento del agua y en la incidencia de desastres, como inundaciones en las partes bajas en caso de fuertes lluvias (Robinson, 2000).

La cuenca del río Huehuetán presenta un grado fuerte de torrencialidad en la parte alta, ya que las pendientes escarpadas ocasionan que se concentre el escurrimiento superficial y se incremente la velocidad del mismo, generando avenidas pico que inundan las partes bajas. El

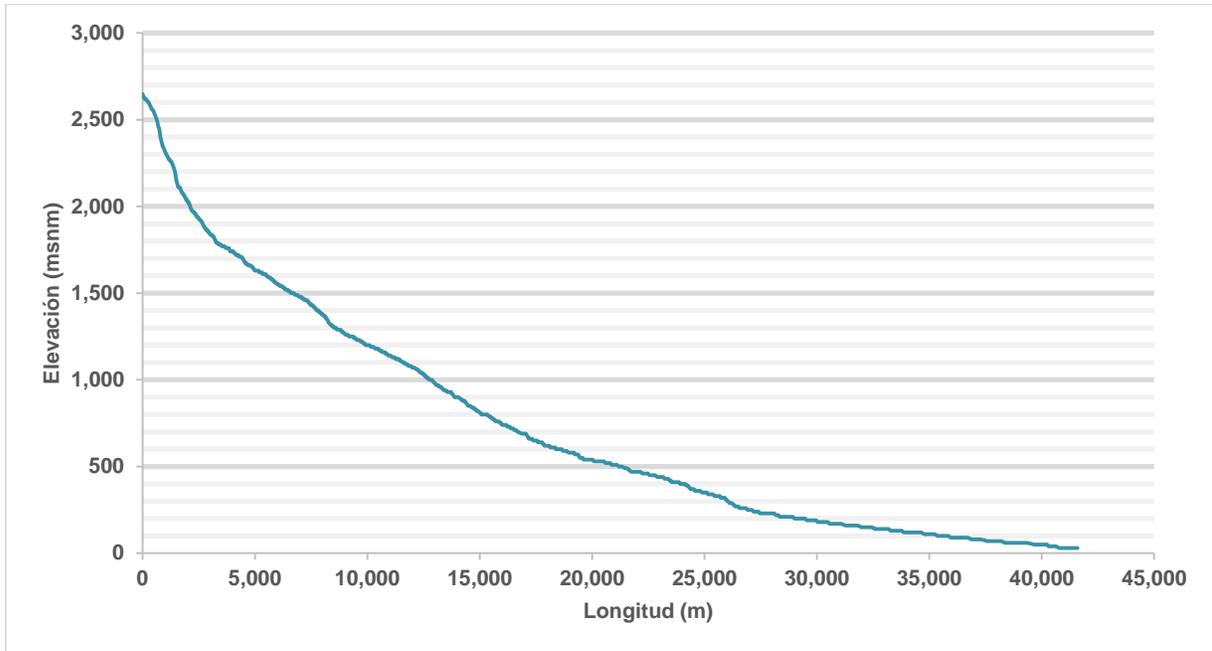
tiempo de concentración es de 3.37 horas alcanzando velocidades altas del escurrimiento superficial en sus 41.59 km de recorrido. La cuenca es de forma alargada, con una elevada densidad de drenaje e hidrográfica, el drenaje es dendrítico, el orden de corrientes es de 7 y la relación de bifurcación promedio es de 4 corrientes de un orden que descargan en una corriente de orden superior (Cuadro 5.6).

**Cuadro 5.6. Relación de bifurcación ( $R_b$ ) y clasificación de las corrientes de acuerdo al número de orden**

Orden	No. de Corrientes	$R_b$
1	3,132	5.01
2	625	4.96
3	126	4.67
4	27	4.50
5	6	3.00
6	2	2.00
7	1	

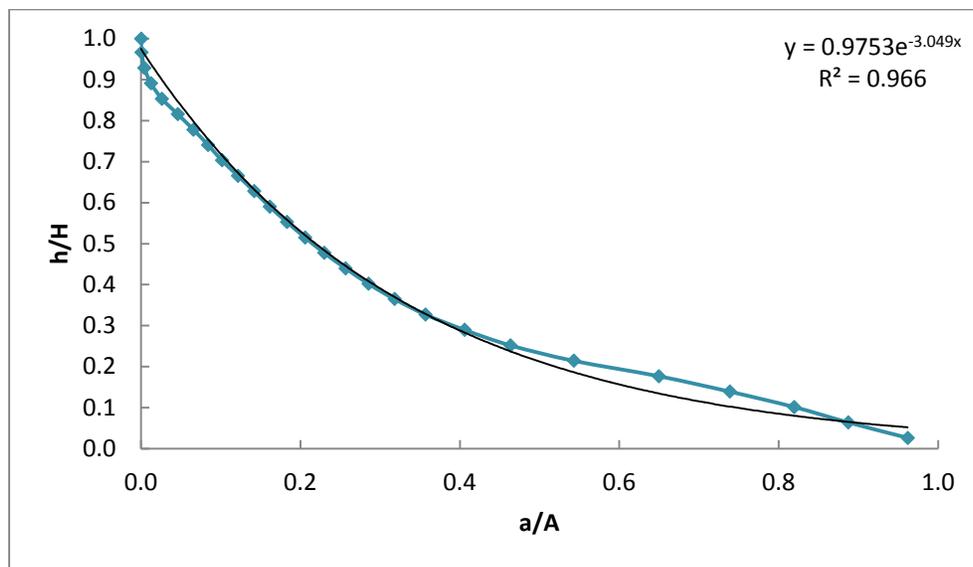
La pendiente de la cuenca es de 38.79% y los valores mayores se encuentran en la parte alta, lo que influye sobre los procesos erosivos. La pendiente media del cauce principal es de 6.4%, sin embargo este valor no refleja las velocidades erosivas que alcanza el flujo superficial en la parte alta, aunque presenta pendientes menores en la parte baja de la cuenca.

El perfil longitudinal del río Huehuetán muestra en la parte alta una elevación aproximada de 2,700 m, donde la pendiente es mayor al 100% en los primeros 10 km del cauce; siguiendo el curso del escurrimiento superficial, la pendiente disminuye en el tramo de los 10 a los 28 km aproximadamente y en el tercer tramo (entre los 28 a 42 km) se presenta una pendiente menor al 10%. Debido a estas variaciones, la pendiente promedio de la cuenca es de 6.40% sin embargo, la variación de la pendiente está relacionada con los incrementos en la longitud y la elevación (Figura 5.8). Estos valores son importantes ya que definen el potencial del escurrimiento superficial en la parte alta, que ocasiona el desprendimiento y transporte de volúmenes elevados de sedimentos a velocidades erosivas y que se depositan en las partes bajas de la cuenca.



**Figura 5.8.** Perfil longitudinal del cauce principal del río Huehuetán

La curva hipsométrica se ajustó a un modelo exponencial, el cual se integró y se encontró un área bajo la curva de 30.47%, indicando que se encuentra en la fase monadnock (senectud) de acuerdo con Strahler (1957). La morfometría y las geoformas de la cuenca, muestran que las áreas relativas, al inicio de la curva hipsométrica, reflejan procesos fuertes de degradación con velocidades erosivas que se van atenuando hacia las partes bajas y conformando zonas de acumulación de los materiales acarreados (Figura 5.9).



**Figura 5.9.** Curva hipsométrica obtenida para la cuenca del río Huehuetán

### 5.3. CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA

La información vectorial obtenida en diferentes páginas de internet (INEGI, CONABIO, CONAPO) permitió analizar la distribución espacial de los municipios y localidades dentro de la cuenca (Figura 5.10). El número de habitantes, los servicios básicos, el índice y grado de marginación y de desarrollo humano permitieron realizar una caracterización social y económica de las condiciones de la cuenca con base en: población, tasa de mortalidad infantil, tasa de alfabetización y asistencia escolar y riesgo per-cápita anual, parámetros que fueron obtenidos del Censo de Población y Vivienda (2010).

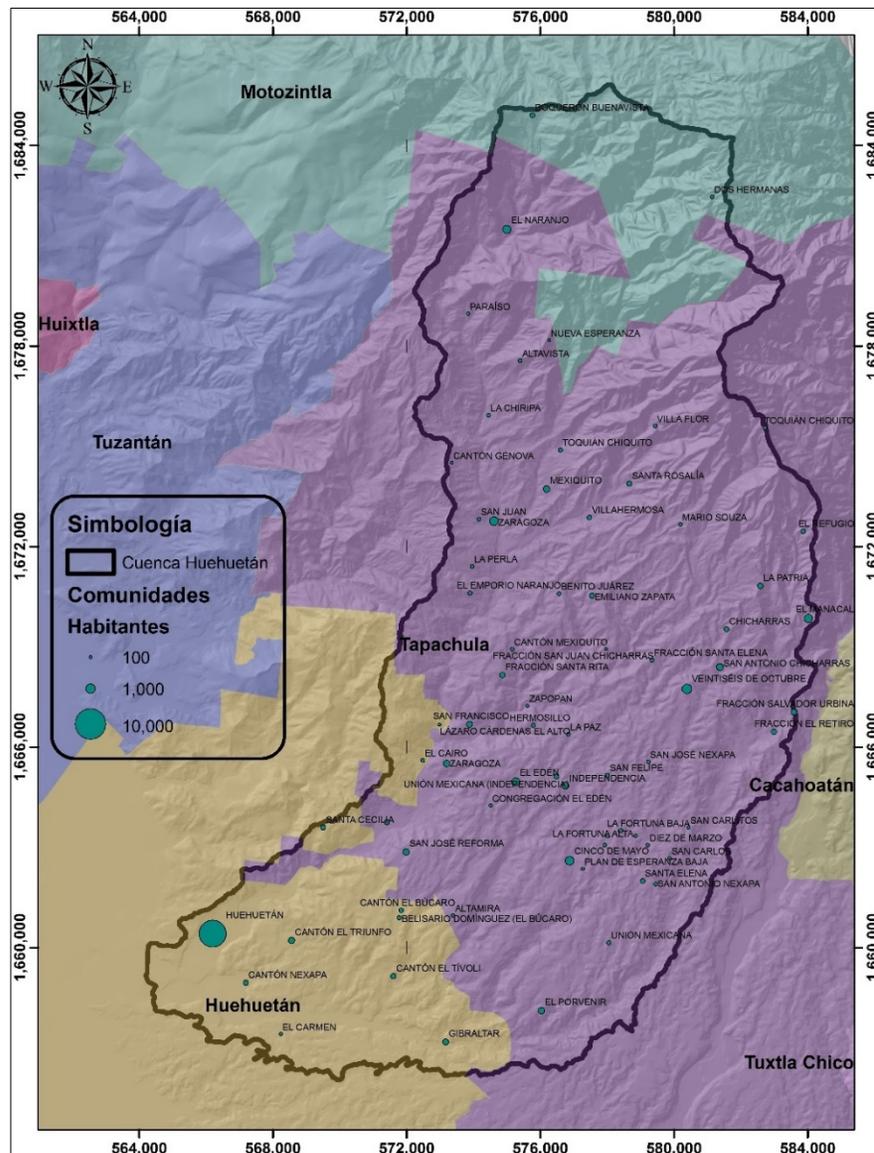


Figura 5.10. Delimitación municipal de la cuenca del río Huehuetán y comunidades



La cuenca comprende los municipios de Motozintla, Huehuetán y Tapachula, siendo éste último el de mayor superficie con 23,365.4 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.

En la parte baja de la cuenca, se cuenta con infraestructura de caminos, luz eléctrica, agua potable, servicios de salud, entre otros. En la parte alta y media, los servicios no son suficientes ya que la mayoría de las comunidades no cuentan con estos servicios, sobre todo caminos.

En la parte media y alta de la cuenca, la principal actividad económica es la producción de café y en la parte baja existen cultivos como: mango, limon, naranja, hortalizas, maíz, plátano, cacao, etc. La actividad ganadera es limitada en la zona.

**Cuadro 5.7. Principales indicadores socioeconómicos en los municipios de la cuenca**

	Huehuetán	Motozintla	Tapachula
<b>Indicadores de marginación, 2010</b>			
<b>Indicador</b>	<b>Valor</b>		
<b>Índice de marginación</b>	0.7292	0.4761	-0.4373
<b>Grado de marginación<sup>(*)</sup></b>	Alto	Alto	Medio
<b>Índice de marginación de 0 a 100</b>	35.91	33.05	22.73
<b>Lugar a nivel estatal</b>	65	83	115
<b>Lugar a nivel nacional</b>	575	779	1574
<b>Distribución porcentual de la población por características seleccionadas, 2010</b>			
<b>Indicador</b>	<b>%</b>		
<b>Población analfabeta de 15 años o más</b>	16.83	12.26	9.28
<b>Población sin primaria completa de 15 años o más</b>	35.71	40.11	24.78
<b>Población en localidades con menos de 5000 habitantes</b>	57.93	65.63	29.97
<b>Población Económicamente Activa ocupada, con ingresos de hasta dos salarios mínimos</b>	69.04	82.31	55.06
<b>Distribución porcentual de ocupantes en viviendas por características seleccionadas, 2010</b>			
<b>Ocupantes en Viviendas:</b>	<b>%</b>		
<b>Sin drenaje ni servicio sanitario exclusivo</b>	9.39	2.65	2.07
<b>Sin energía eléctrica</b>	3.04	1.31	1.53
<b>Sin agua entubada</b>	65.31	23.44	32.43
<b>Con algún nivel de hacinamiento</b>	52.14	62.83	42.24
<b>Con piso de tierra</b>	26.57	17.42	16.08

Nota: (\*) CONAPO clasifica el grado de marginación en: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo; esta es la información más reciente publicada por CONAPO. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, obtenida de INEGI del Censo de Población y Vivienda, 2010.

Los parámetros socioeconómicos de cada municipio muestran que Tapachula tiene mayor desarrollo económico, reduciendo su grado de marginación a medio, y cuenta con servicios ya

que es la principal ciudad dentro de la región del Soconusco, donde el cultivo del café tiene una alta contribución al desarrollo del municipio (Cuadro 5.7).

El desarrollo humano dentro de la cuenca, muestra que el municipio de Tapachula está por encima de los indicadores de los de Huehuetán y Motozintla, aunque los tres municipios han mejorado sus condiciones de desarrollo, Tapachula ha sido el municipio que ha avanzado en esta actividad de forma acelerada (Cuadro 5.8).

**Cuadro 5.8. Indicadores e Índice de Desarrollo Humano**

Indicador	Huehuetán	Motozintla	Tapachula
	Valor		
Índice de Desarrollo Humano (adim.)	0.682	0.626	0.715
Grado de Desarrollo Humano <sup>(*)</sup>	Medio	Medio	Alto
Posición a nivel nacional (adim.)	1,170	1081	381
Tasa de mortalidad infantil (%)	25.57	21.42	16.1
Tasa de alfabetismo <sup>(1)</sup> (%)	80.49	86.48	88.31
Tasa de asistencia escolar de la población de 6 a 24 años de edad (%)	68.81	61.45	67.92
Ingreso per cápita anual ajustado a cuentas nacionales (\$ PPC <sup>(2)</sup> )	7,164	5,882	9,450
Índice de salud <sup>(3)</sup> (adim.)	0.806	0.8416	0.8874
Índice de educación <sup>(4)</sup> (adim.)	0.766	0.7814	0.8151
Índice de ingreso <sup>(5)</sup> (adim.)	0.713	0.6783	0.7592

Nota: (\*)El PNUD clasifica el Grado de Desarrollo Humano en: alto, medio y bajo. (1) se refiere a la población de 15 años y más; (2) Indica el Producto Interno Bruto per cápita en Poder de Paridad de Compra; (3) Índice del componente del IDH, calculado a partir de la tasa de mortalidad infantil; (4) Índice del componente del IDH, calculado a partir de la tasa de alfabetización y la tasa de asistencia escolar; (5) Índice del componente del IDH, calculado a partir del ingreso per cápita anual. Fuente: Oficina Nacional de Desarrollo Humano, PNUD-México (2014).

Las condiciones socioeconómicas de la parte baja son adecuadas en la mayoría de las comunidades, sin embargo, en la parte alta existe un rezago social que limita el desarrollo de las comunidades rurales. Existe también un desconocimiento y descuido del medio ambiente debido al bajo nivel de educación, lo que influye en la alteración de las condiciones biofísicas de la región que repercute en la conservación de los suelos y bosques; siendo éstos últimos talados para establecer cultivos de baja producción en zonas con aptitud forestal.

Un aspecto importante desde el punto de vista socioeconómico, es la vulnerabilidad social a la que están expuestos los habitantes de las localidades, ya que repercute en la presión de los recursos naturales y sobre el grado de degradación en las áreas de drenaje. A partir de la información obtenida del Censo de Población y Vivienda (2005), Arellano-Monterrosas (2012) aplicó la metodología desarrollada por Soares *et al*, (2010) para determinar el Índice de

Vulnerabilidad Social (IVS) en función de doce indicadores que consideran cuatro componentes (Cuadro 5.9).

**Cuadro 5.9. Indicadores para la estimación de la Vulnerabilidad Social. Soares et al., 2010**

Componente	Indicador
Salud	% de población no derechohabiente (% de la población que no cuenta con servicios de salud pública)
Educación	% de analfabetismo (% de población de 15 años y más que no sabe leer ni escribir)
	% de la población de 6 a 14 años que asiste a la escuela
	Grado promedio de escolaridad
Vivienda	% de viviendas sin agua entubada
	% de viviendas sin drenaje
	% de viviendas sin electricidad
	% de viviendas con piso de tierra
Población	Razón de dependencia (% de población dependiente – menores de 15 años y menores de 65 años – en relación a la población económicamente activa)
	% de población de habla indígena
	% de jefas de familia
	Dispersión de la población (% de la población que habita en localidades menores a 2,500 habitantes)

Estos indicadores representan la vulnerabilidad de una comunidad para enfrentar las amenazas y riesgos derivados de las lluvias extremas; Soares *et al.*, (2010) presenta una clasificación del IVS, que se muestra en el Cuadro 5.10.

**Cuadro 5.10. Categorías del Índice de Vulnerabilidad Social, IVS. Soares et al., 2010**

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

#### 5.4. ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LAS ÁREAS DE DRENAJE

Los parámetros morfométricos lineales y de forma para cada una de las ocho subcuencas delimitadas con la metodología Pfafstetter (1989), se estimaron utilizando las fórmulas que se presentan en el Cuadro 5.11.

Las características de área (A), perímetro (P), longitud del cauce principal ( $L_c$ ), longitud total de cauces ( $L_{tc}$ ), pendiente del cauce principal ( $P_{1c}$ ), pendiente media de la subcuenca ( $P_{mc}$ ), elevación mínima, media y máxima ( $E_{mín}$ ,  $E_{med}$ ,  $E_{máx}$ ), 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 5.12.

**Cuadro 5.11. Parámetros morfométricos determinados en las áreas de drenaje**

Parámetro	Ecuación	Autor	Año
<b>Lineales</b>			
Densidad de drenaje (km km <sup>-2</sup> )	$D_d = \frac{L_{tc}}{A}$	Horton	1945
Densidad hidrográfica (cauces km <sup>-2</sup> )	$D_h = \frac{L_u}{A}$	Horton	1945
Relación de bifurcación media	$R_{bm}$ = promedio de la relación de bifurcación entre órdenes	Strahler	1957
Textura del drenaje (cauces km <sup>-1</sup> )	$R_t = \frac{L_u}{P}$	Horton	1945
Longitud del flujo superficial (km)	$L_g = \frac{1}{2D_d}$	Horton	1945
<b>De forma</b>			
Relación de elongación	$R_e = \frac{2}{L_c} \times \left(\frac{A}{\pi}\right)^{0.5}$	Schumm	1956
Relación de circularidad	$R_c = \frac{4\pi A}{P^2}$	Miller	1953
Coficiente 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

Dónde:  $L_{tc}$ , es la longitud total de cauces, km; A, área de drenaje, km<sup>2</sup>;  $L_u$ , número total de cauces, adim.; P, perímetro del área de drenaje, km; y  $L_c$ , longitud del cauce principal, km.

**Cuadro 5.12. Características principales de las subcuencas delimitadas**

Subc.	A (km <sup>2</sup> )	P (km)	L <sub>c</sub> (km)	L <sub>tc</sub> (km)	P <sub>lc</sub> (%)	P <sub>mc</sub> (%)	Elevaciones (msnm)			H (m)	L <sub>u</sub>	T <sub>c</sub> (h)	N <sub>u</sub>
							Mín.	Máx.	Media				
1	129.50	97.72	40.96	618.74	4.71	25.75	30	1,960	469	1,930	1,495	3.75	VI
2	25.52	53.18	16.79	99.93	3.75	23.33	30	660	246	630	196	2.06	IV
3	41.59	48.02	19.41	215.15	11.42	41.42	213	2,430	903	2,217	505	1.50	V
4	16.57	26.78	9.57	83.94	6.69	32.87	210	850	529	640	192	1.07	VI
5	14.23	26.52	10.02	76.02	20.06	57.67	510	2,520	1,205	2,010	179	0.73	IV
6	14.25	32.20	10.94	83.28	19.38	43.07	510	2,630	960	2,120	207	0.79	VI
7	25.92	37.48	13.23	145.28	15.12	66.95	660	2,660	1,745	2,000	415	1.00	V
8	51.70	47.20	18.03	279.75	11.26	58.12	660	2,690	1,651	2,030	738	1.42	VI

La diferencia entre las áreas de aporte de las subcuencas, que está directamente relacionada con la longitud del cauce y el tiempo de concentración, influye en la concentración del escurrimiento superficial y su entrega al cauce principal; por lo tanto, el análisis de las áreas de drenaje en función de la precipitación y el escurrimiento, permite identificar las condiciones de funcionamiento hidrológico de las mismas (Cuadro 5.12).

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

La curva hipsométrica puede ser representada mediante una ecuación polinomial de la forma:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (5.1)$$

Harlin (1978) encontró que la forma de la curva hipsométrica puede ser ajustada con base en un modelo polinomial de 2<sup>do</sup> o 3<sup>er</sup> orden de la forma:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (5.2)$$

La curva hipsométrica toma valores f(x) a partir de un cuadrado unitario definido por los ejes de área y altura relativas; por lo tanto, la integral hipsométrica (A) se define como el área bajo la curva de la función f(x).

$$A = \text{Área} = \iint_A dx dy = \int f(x) dx \quad (5.3)$$

$$A = \int_0^1 (a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3) dx = \left[ a_0 x + \frac{a_1 x^2}{2} + \frac{a_2 x^3}{3} + \frac{a_3 x^4}{4} \right]_0^1 = \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+1} \quad (5.4)$$

Por lo tanto, con base en la Figura 3.3, se define que A está limitada por las siguientes tres curvas  $x = 0$ ,  $y = 0$  y  $y = f(x)$ .

Siendo entonces:

$$\mu'_{10} = \left( \frac{1}{A} \right) \iint x dy dx \quad (5.5)$$

$$\mu'_{10} = \left( \frac{1}{A} \right) \int_0^1 x f(x) dx = \frac{1}{A} \left[ \frac{a_0 x^2}{2} + \frac{a_1 x^3}{3} + \frac{a_2 x^4}{4} + \frac{a_3 x^5}{5} \right]_0^1 = \frac{1}{A} \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+2} \quad (5.6)$$

Donde  $\mu'_{10}$  corresponde a la media o el centroide con respecto al eje “x”, y

$$\mu'_{01} = \left( \frac{1}{A} \right) \iint y dy dx \quad (5.7)$$

$$\mu'_{01} = \left( \frac{1}{A} \right) \int_0^1 \frac{1}{2} (f(x))^2 dx \quad (5.8)$$

Donde  $\mu'_{01}$  corresponde a la media o el centroide con respecto al eje “y”.

De la misma forma, los momentos de  $f(x)$  con respecto a la media en x pueden ser definidos como:

$$\mu_i = \frac{1}{A} \int_0^1 (x - \mu'_{10})^i f(x) dx \quad (5.9)$$

El segundo momento de la función  $f(x)$  con respecto a la media en x, se conoce como la varianza y puede expresarse como la sumatoria de las ecuaciones que tienen un desarrollo similar a las ecuaciones 5.5 y 5.7.

$$\mu_2 = \frac{1}{A} \int_0^1 (x - \mu_{01}')^2 f(x) dx = \left[ \frac{1}{A} \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+3} \right] - (\mu_{01}')^2 \quad (5.10)$$

$$\sigma = \sqrt{\mu_2} \quad (5.11)$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar.

El tercer y cuarto momento con respecto a la media en  $x$ , son conocidos como asimetría y kurtosis de una función de distribución, respectivamente y se obtienen de la siguiente forma (Harlin, 1978).

$$\mu_3 = \frac{1}{A} \int_0^1 (x - \mu_{01}')^3 f(x) dx = \left[ \frac{1}{A} \cdot \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+4} \right] - \left[ \frac{3\mu_{01}'}{A} \cdot \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+3} \right] + 2(\mu_{01}')^2 \quad (5.12)$$

$$\mu_4 = \frac{1}{A} \int_0^1 (x - \mu_{01}')^4 f(x) dx = \left[ \frac{1}{A} \cdot \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+5} \right] - \left[ \frac{4\mu_{01}'}{A} \cdot \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+4} \right] + \left[ \frac{6(\mu_{01}')^2}{A} \cdot \sum_{k=0}^3 \frac{a_k}{k+4} \right] + 3(\mu_{01}')^4 \quad (5.13)$$

Generalmente los momentos  $\mu_3$  y  $\mu_4$  no se ocupan de forma directa si no, que se usan para determinar los coeficientes de asimetría y kurtosis, respectivamente, conocidos como asimetría hipsométrica y kurtosis hipsométrica, mediante las siguientes ecuaciones:

$$Hypskew = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \quad (5.14)$$

$$HypKurtosis = \frac{\mu_4}{\sigma^4} \quad (5.15)$$

A los momentos estadísticos de la función de densidad de la curva hipsométrica, se les conoce como densidad de asimetría y densidad de kurtosis (Harlin, 1978; Luo, 2000). En estadística, estos coeficientes describen la forma de la distribución con respecto a una distribución normal. La asimetría representa el sesgo de la distribución con respecto a la media, mientras que la kurtosis se usa para indicar la variación en la forma de la distribución, es decir si es con picos altos o es aplanada, con respecto a una distribución normal. Un valor positivo del sesgo indica que una variable toma valores altos y, por lo tanto está sesgada hacia la derecha. El sesgo es

cero cuando la distribución de la variable es simétrica. Un valor de kurtosis alto ( $> 3$ ) indica que la distribución tiene un pico demasiado alto en comparación con la distribución normal (asumiendo que la kurtosis de una distribución normal es igual 3). Valores bajos de kurtosis indican distribuciones con picos más planos o achatados que la distribución normal.

De acuerdo con Harlin (1978) y Luo (2000), cuando estos valores estadísticos se aplican a la función de distribución de la curva hipsométrica, se pueden interpretar en términos de erosión y pendiente de la cuenca. El sesgo hipsométrico representa la cantidad de erosión en el tramo superior de la cuenca; mientras que la densidad del sesgo describe los cambios en la pendiente (Harlin, 1978; Luo, 2000).

Estos momentos estadísticos se pueden utilizar para describir y caracterizar la forma de la curva hipsométrica y cuantificar los cambios en la morfología de la red de drenaje de las cuencas; en la mayoría de los casos, estos parámetros se utilizan para el análisis hipsométrico, específicamente en cuencas con valores similares de la integral hipsométrica pero con diferente forma.

## 5.5. DETERMINACIÓN DEL NDVI EN LA CUENCA

El NDVI se obtuvo mediante el uso de 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 (5.16) (Hayes, 1985):

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad (5.16)$$

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.

Los valores de cambio de NDVI para el periodo de análisis, mostraron las condiciones actuales de la cuenca en lo que se refiere a las características de cobertura vegetal; esta información se utilizó para la priorización de las subcuencas en función del NDVI.

## 5.6. ANÁLISIS HIDROLÓGICO MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL 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.

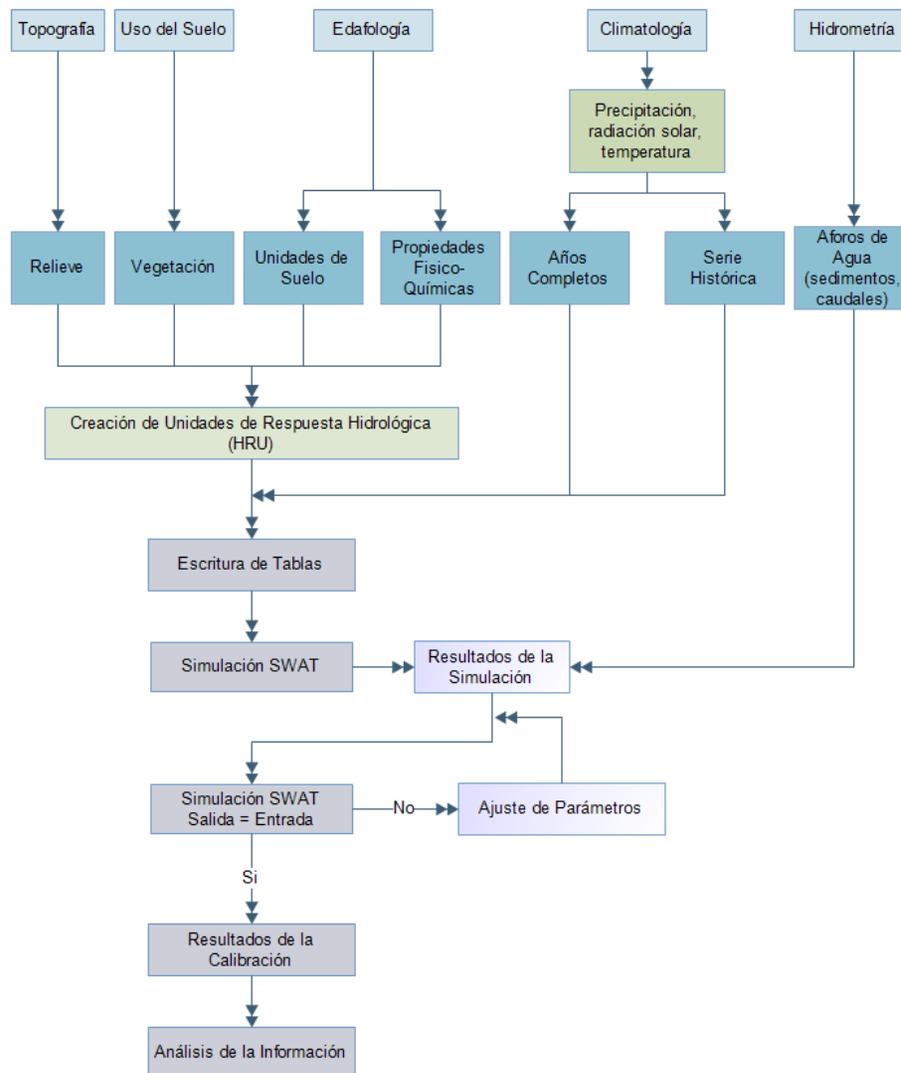
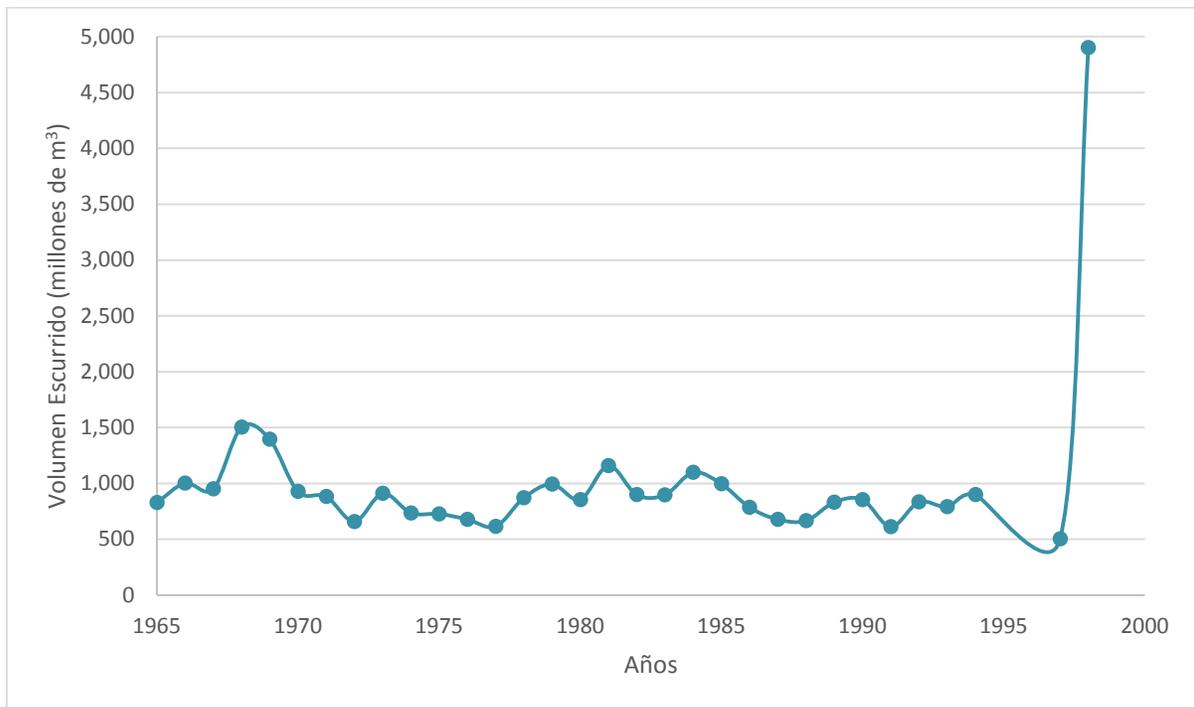


Figura 5.11. Diagrama de flujo del modelo SWAT (Adaptado de: Torres-Benites et al., 2004)

A partir de la delimitación de subcuencas, se recopiló la información que necesita el modelo (Figura 5.11). Para usar el modelo SWAT se requiere de: el uso actual del suelo, tipo de suelo, condiciones climatológicas, propiedades físico-químicas de los suelos y el modelo digital de elevaciones. Esta información se ingresó a los formatos que requiere el modelo para simular los procesos hidrológicos.

La información requerida para el modelo SWAT fue procesada para incluirla al modelo, de esta manera, la información de suelos en escala 1:250,000 se integró al modelo, identificando las principales propiedades como: textura, profundidad del perfil del suelo, contenido de materia orgánica, conductividad hidráulica, albedo, valor del factor K, entre otros. 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 m<sup>3</sup>; mientras que el escurrimiento promedio para el periodo de medición fue de 998'562,090 m<sup>3</sup> (Figura 5.12).



**Figura 5.12. Variación del escurrimiento medio anual en la estación Huehuetán**

Esta información permitió identificar las variaciones de los parámetros del modelo durante la calibración para obtener los valores de escurrimiento y gasto pico para las subcuencas en estudio. A partir de estos valores, se realizó la priorización de las subcuencas con base en el componente hidrológico.

Para lograr que el modelo representara de forma precisa el comportamiento de los procesos hidrológicos en la cuenca, se realizó la calibración del mismo, tomando en consideración el uso actual del suelo y los valores medidos de escurrimiento superficial a la salida de la cuenca. Con base en los tipos de cobertura actual, se definieron las clases que se muestran en el Cuadro 5.13.

**Cuadro 5.13. Uso actual del suelo presente en la cuenca del río Huehuetán**

Clave	Uso actual	Superficie (ha)	Superficie (%)	Biomasa (t MS* ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )		
				Mínimo	Medio	Máximo
COFF	Cultivo de café	13,437.70	42.05	4.50	6.67	8.33
FRSD	Selva mediana subcaducifolia	5,080.94	15.90	6.10	6.30	8.10
FRSE	Bosque mesófilo de montaña	5,561.75	17.41	14.00	16.00	18.00
PAST	Pastizal inducido	7,686.07	24.05	2.19	2.35	2.53
URHD	Áreas urbanas y pobladas	186.35	0.58	---	---	---

Adaptado de Salas (2013) y Ramírez (2014)

\* MS - Materia Seca

El periodo de análisis del escurrimiento superficial, se realizó a partir de la Figura 5.12, en la cual se muestra la variación del escurrimiento a través del periodo de medición que se realizó en la estación hidrométrica Huehuetán. Se encontró que el periodo que cuenta con información diaria fue entre los años 1990 – 1998; sin embargo, el modelo se aplicó para un periodo de 26 años, entre 1988 a 2013.

El procedimiento de calibración consistió en el ajuste de los parámetros que influyen en la simulación de la biomasa producida con los diversos usos del suelo; posteriormente se ajustaron los parámetros para calibrar con los escurrimientos registrados en la cuenca.

A partir de los resultados obtenidos, se determinaron los volúmenes escurridos anuales y el gasto pico para cada una de las subcuencas; se utilizó el valor promedio de estas variables para ingresarlas al modelo de priorización.

## 5.7. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTABILIDAD

El índice de estabilidad se determinó mediante la aplicación del modelo SINMAP (*Stability Index MAPping*) desarrollado con el apoyo del *Forest Renewal British Columbia*, en colaboración con el *Canadian Forest Products Ltd., Vancouver, British Columbia*. El programa considera la interrelación de un modelo hidrológico sensible a las variaciones del relieve, combinado con el modelo de estabilidad de pendiente infinita, una propuesta establecida por los pioneros Bill Dietrich y David Montgomery. Los algoritmos para el análisis del modelo digital de elevaciones fueron desarrollados por David Tarboton; el cual es un método de análisis de la dirección de flujo de agua basado en información ráster, conocido como el algoritmo  $D_{\infty}$ . La integración de esta metodología en un programa de cómputo corresponde a Robert T. Pack, de *Terratech Consulting Ltd., British Columbia*; David G. Tarboton, de *Utah State University, Logan, Utah*; y Craig N. Goodwin de *C. N. Goodwin Fluvial System Consulting, Logan, Utah*.

El modelo SINMAP requiere de un modelo digital de elevación; parámetros de conductividad hidráulica, cohesión del suelo, ángulo de fricción interna y densidad del suelo e inventario de deslizamiento (Figura 5.13).

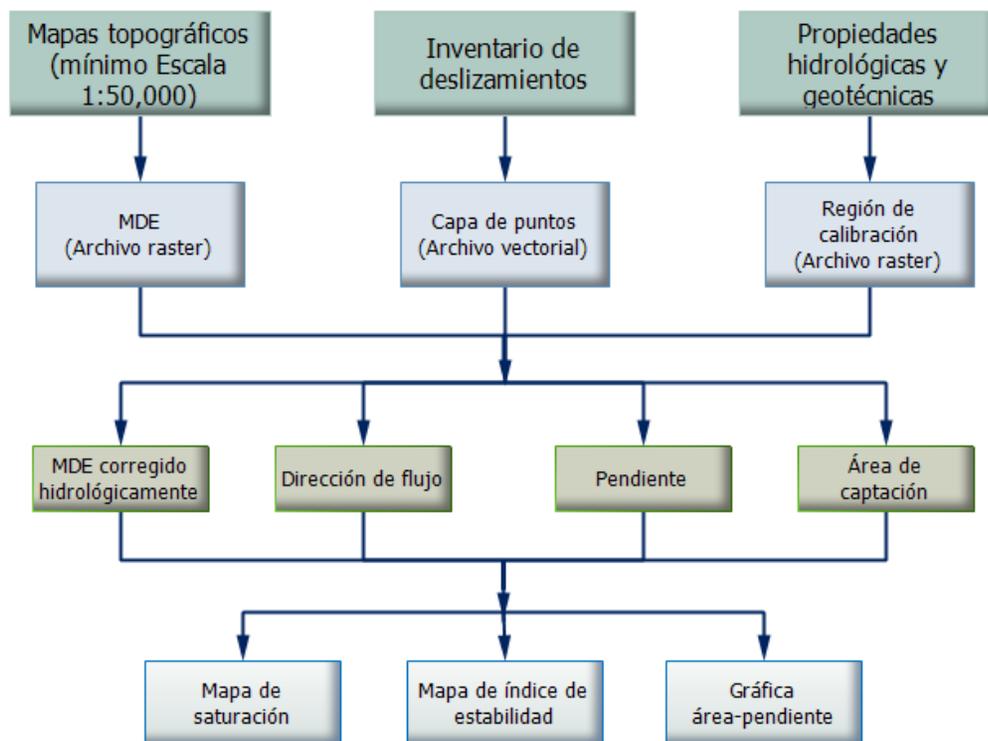
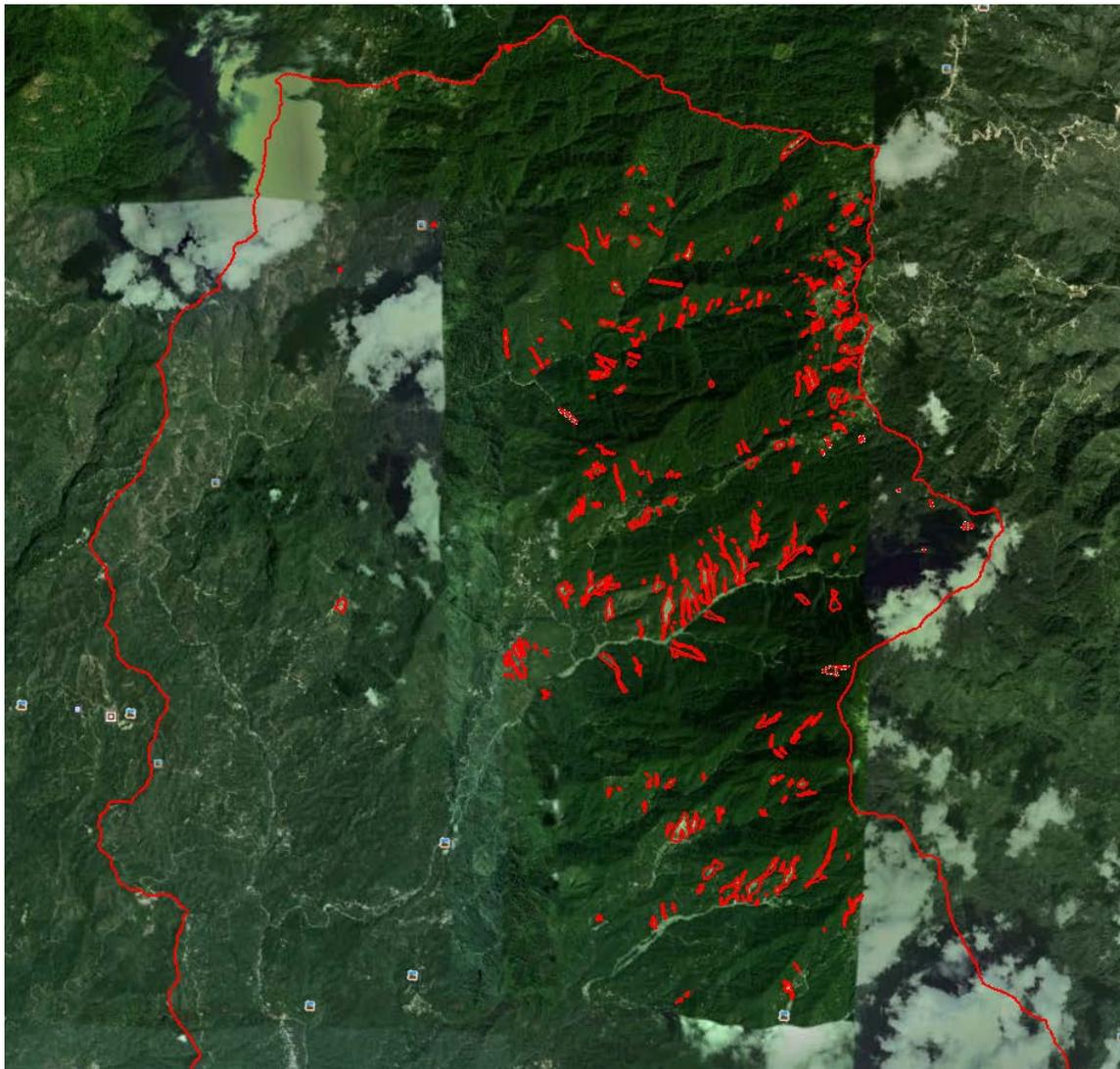


Figura 5.13. Diagrama de flujo de SINMAP (Adaptado de: El Naqa y Abdelghafoor, 2006)

El modelo digital de elevaciones se usó para obtener un modelo hidrológicamente corregido, la pendiente, dirección del flujo, área de captación y el índice de saturación del suelo. Para la presente investigación se usó un MDE de 10 m de resolución (escala 1:20,000) que cubre la totalidad de la cuenca.

El inventario de deslizamientos (Figura 5.14) 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. Se determinó el centroide de cada área ya que el modelo utiliza las coordenadas centroidales, sin importar el área.



*Figura 5.14. Área de deslizamientos en la cuenca del río Huehuetán. Google Earth, 2013*

Las salidas del modelo son:

1. Mapa del índice de estabilidad
2. Gráficas de la variación del índice de estabilidad en cada región de calibración
3. Resumen estadístico de los deslizamientos para cada región de calibración
4. Mapa del índice de saturación del suelo

El resultado más importante del modelo SINMAP es el cálculo del mapa que representa el terreno dividido en diferentes clases del índice de estabilidad, basado en el cálculo del factor de seguridad (FS) para cada celda del MDE. El factor de seguridad se define como la relación entre las fuerzas estabilizantes (cohesión y fricción del suelo) y desestabilizantes (fuerza de la gravedad). Pack *et al.*, (2005) sugieren la clasificación del Cuadro 5.14.

**Cuadro 5.14. Clases de estabilidad con base en el factor de seguridad (FS). Pack *et al.*, 2005**

Condición	Clase	Índice de estabilidad (SI)	FS	Influencia de los factores	Descripción
Estable	1	$> 1.5$	FS mín. = 1.5	Factores significativamente desestabilizantes son necesarios para la inestabilidad	Rango de parámetros nunca causa inestabilidad
Moderadamente estable	2	$1.5 > SI > 1.25$	FS mín. = 1.25	Factores moderadamente desestabilizantes son necesarios para la inestabilidad	Rango de parámetros no puede causar rotura
Casi estable	3	$1.25 > SI > 1.0$	FS mín. = 1.0	Factores menores desestabilizantes son requeridos para la inestabilidad	Rango de parámetros no puede causar rotura
Umbral inferior de inestabilidad	4	$1.0 > SI > 0.5$	$\geq 50\%$ FS $> 1.0$	No son necesarios factores desestabilizantes para la inestabilidad	Mitad pesimista para causar rotura con el rango de parámetros
Umbral superior de inestabilidad	5	$0.5 > SI > 0.0$	$> 50\%$ FS $\leq 1.0$	La presencia de factores estabilizantes podrían ser los responsables de la estabilidad	Mitad pesimista para causar rotura con el rango de parámetros
Inestable	6	$0.0 > SI$	FS máx. $< 1.0$	Se requieren factores estabilizantes para la estabilidad	Rangos de parámetros nunca causa estabilidad

El resumen estadístico, generado a partir de la aplicación del modelo, muestra la distribución de los deslizamientos previamente identificados y las clases del índice de estabilidad en las diferentes regiones de calibración.

Además del índice de estabilidad, también se genera el índice de saturación del suelo ( $w$ ), el cual, con base en los rangos establecidos ( $x = R/T$ ), donde  $R$  representa la recarga en estado estacionario y  $T$  la transmisividad del suelo, para los valores  $x_1$  y  $x_2$ . El índice de saturación se comporta con base en las siguientes aseveraciones: a)  $w$  es igual a uno (saturado) para el rango entre  $x_1$  y  $x_2$ ; b)  $w$  es igual a uno sólo para una parte del rango entre  $x_1$  y  $x_2$ ; y c)  $w$  nunca es igual a uno.

Esta información se usa para asignarle valores a cada celda de la capa temática del índice de saturación, de la siguiente forma:

**Zona de saturación:** totalmente saturada para el rango entre  $x_1$  y  $x_2$ . Esto ocurre cuando  $x_1 a/\text{sen}\theta$  es mayor a uno y se presenta con un valor de 3.

**Umbral de saturación:** son celdas con una probabilidad de ser saturadas, con valor de uno para algunos valores de  $x = R/T$  dentro del rango  $x_1$  y  $x_2$ , por ejemplo,  $x_2 a/\text{sen}\theta$  es mayor a uno, pero  $x_1 a/\text{sen}\theta$  es menor de uno; se representa con el valor 2.

**Parcialmente húmedo y baja humedad:** son celdas que nunca se saturaron, tienen valores menores que uno para todos los valores de  $x = R/T$ , en el rango  $x_1$  y  $x_2$ . El nivel de saturación es codificado aquí como  $x_2 a/\text{sen}\theta$ , el cual implica un resultado entre 0 y 1, el cual representa la celda más húmeda que podría dar un rango de  $x$  ( $R/T$ ) específico. Las celdas con este nivel de saturación son más grandes que el límite inferior de humedad establecido en los parámetros de calibración de entre del modelo definido como parcialmente húmedo; mientras que las celdas con niveles de saturación menores que éste límite son de baja humedad (Pack *et al.*, 2005).

A partir de los resultados obtenidos, se realizó una reclasificación del índice de saturación tomando como límites las diversas clases, esto permitió conocer la superficie en cada clase para cada subcuencas; con esta información se determinó el grado de degradación de las áreas de drenaje lo que permitió priorizarlas con base en estos índices.

## 5.8. PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE CON BASE EN EL PROCESO ANALÍTICO EN RED (ANP)

Este método permite realizar la priorización de las subcuencas con base en los valores obtenidos para cada componente y criterio utilizado. A continuación se muestra un ejemplo del procedimiento de obtención de los rangos de clasificación.

### 5.8.1. Metodología del ANP

El método está compuesto por jerarquías de control, componentes, nodos, interrelaciones entre nodos e interrelaciones entre componentes. El proceso de modelación puede descomponerse en varios pasos o etapas operativas (Saaty, 2001; García-Gómez, 2010; Giner-Santoja, 2010; Aznar-Bellver y Guijarro-Martínez, 2012). La metodología que se muestra a continuación es la descrita por Aznar-Bellver y Guijarro-Martínez (2012).

1. **Identificación de los elementos de la red y construcción de la red.** En un problema de decisión con ANP, como ocurriría con AHP, hay una serie de alternativas que se pretende priorizar y una serie de criterios que van a permitir esa priorización. Las alternativas se agrupan en un nodo o clúster y los criterios en otros componentes o clústers, ya que normalmente se presentan criterios (elementos) de distinto carácter, por ejemplo, sociales, económicos, técnicos, etc., y por ello se agrupan en distintos nodos o clústers (Figura 5.15).

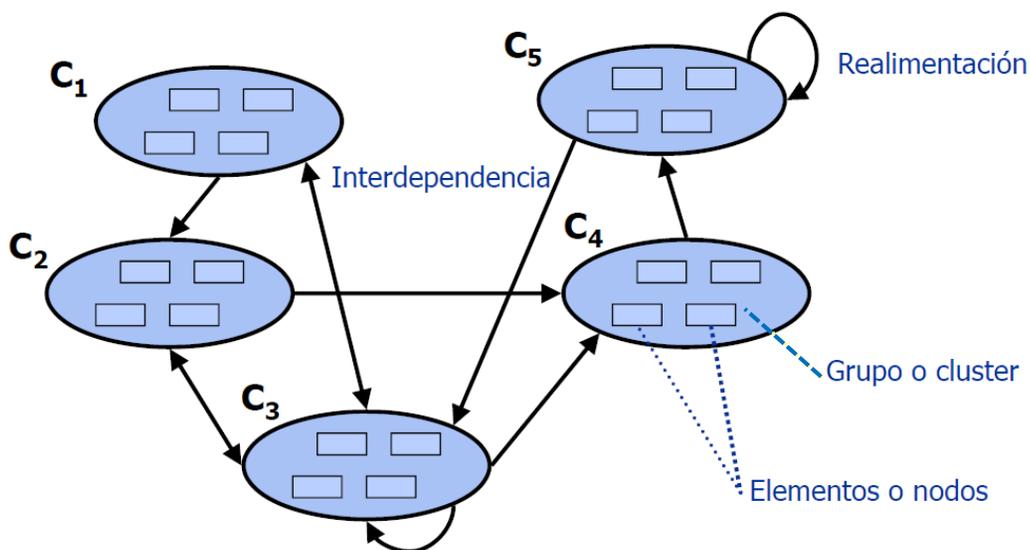


Figura 5.15. Esquema de una estructura de decisión en red (Giner-Santoja, 2010)

2. **Análisis de la red de influencias (Matriz de dominación interfactorial).** Conocidos todos los clústers y sus componentes el siguiente paso es determinar todas las interdependencias entre clústers y las retroalimentaciones entre elementos dentro de los clústers. Para representar estas influencias se utiliza la matriz de dominación interfactorial, también conocida como matriz de influencias que está compuesta por 1 (unos) y 0 (ceros), los 1 significan que entre los elementos que confluyen en él hay influencia y los 0 que no la hay, de forma que al final del análisis la matriz tendría el aspecto que se muestra en el Cuadro 5.15 (se muestra la matriz con dos clústers para ejemplificar el procedimiento).

*Cuadro 5.15. Matriz de dominación interfactorial*

		C1			C2			
		e11	e12	e13	e21	e22	e23	e24
C1	e11	0	1	0	1	0	1	0
	e12	1	0	1	1	0	1	1
	e13	1	1	0	0	1	1	1
C2	e21	0	1	1	0	0	0	0
	e22	1	1	1	0	0	0	0
	e23	1	0	1	0	0	0	0
	e24	1	1	1	0	0	0	0

El procedimiento para construir esta matriz es el siguiente:

- Se elige el primer clúster  $C_1$ , que comprende tres elementos  $e_{11}$ ,  $e_{12}$  y  $e_{13}$  y se determina si estos elementos tienen influencia sobre ellos mismos.
- Se inicia preguntando si cada uno de esos tres elementos tiene influencia sobre  $e_{11}$ . Por ejemplo, en la matriz se ha escrito el vector columna (0,1,1) indicando que  $e_{12}$  y  $e_{13}$  tienen influencia sobre  $e_{11}$ .
- Se sigue preguntando si los tres elementos del clúster  $C_1$  tienen influencia sobre  $e_{12}$ , al escribir el vector (1,0,1), se indica que  $e_{11}$  y  $e_{13}$  tienen influencia sobre  $e_{12}$ .
- En este primer cuadrante de la matriz se pregunta si los elementos de  $C_1$  tienen influencia sobre  $e_{13}$  con el vector (0,1,0) indicando que sólo  $e_{12}$  tiene influencia sobre  $e_{13}$ .
- Concluido el análisis de las influencias de los elementos de  $C_1$  sobre ellos mismos se procede a analizar las influencias de los elementos del clúster  $C_2$  sobre los elementos del clúster  $C_1$ , donde se observa que tres elementos  $e_{22}$ ,  $e_{23}$  y  $e_{24}$  influyen sobre  $e_{11}$ , también tres elementos  $e_{11}$ ,  $e_{22}$  y  $e_{24}$  influyen sobre  $e_{12}$ . Y finalmente que todos los elementos del clúster  $C_2$  influyen sobre  $e_{13}$ .

- Se siguen realizando las influencias de los elementos del clúster  $C_1$  sobre los elementos del clúster  $C_2$  situando el valor uno donde hay influencia y cero donde no la hay y finalmente se termina analizando las influencias de los elementos de  $C_2$  sobre ellos mismos que como se observa en el Cuadro 5.15 no hay ninguna, por eso el cuadrante viene con ceros.

De forma resumida, se puede comentar que la matriz de dominación interfactorial o de influencias es una matriz con ceros y unos (0 y 1) de forma que los ceros indican que no existe influencia entre los elementos que confluyen en él y los 1 que sí existe influencia.

3. **Cálculo de las prioridades entre elementos (Supermatriz original).** Conocidas todas las influencias se procede a determinar la cuantificación de las mismas, mediante el planteamiento de las matrices de comparación pareada correspondientes.

Para cuantificar las influencias de los elementos del clúster  $C_1$  sobre esos mismos elementos, se plantean las siguientes preguntas “sobre  $e_{11}$  quien tiene más influencia  $e_{12}$  o  $e_{13}$ ” y se contestaría  $e_{12}$  y a continuación se pregunta “y cuanta más influencia tiene” y teniendo en cuenta la escala fundamental (Cuadro 3.2), se elige un valor, que en este caso corresponde a “entre igual y moderadamente más importante” por lo que la notación sería 1/2, Cuadro 5.16.

**Cuadro 5.16. Influencia de  $e_{12}$  y  $e_{13}$  sobre  $e_{11}$**

	$e_{12}$	$e_{13}$	VECTOR PROPIO
$e_{12}$	1	2	0,6667
$e_{13}$	1/2	1	0,3333
CR	0,00%	= 0%	1,0000

Se continua con la influencia de los elementos del clúster  $C_1$  sobre el elemento  $e_{12}$  (Cuadro 5.17).

**Cuadro 5.17. Influencia de  $e_{11}$  y  $e_{13}$  sobre  $e_{12}$**

	$e_{11}$	$e_{13}$	VECTOR PROPIO
$e_{11}$	1	1/5	0,1667
$e_{13}$	5	1	0,8333
CR	0,00%	= 0%	1,0000

Las influencias del clúster  $C_1$  sobre el elemento  $e_{13}$  no necesitan cuantificarse mediante la matriz de comparación pareada por ser solo un elemento el  $e_{12}$  el que tiene influencia por lo que su cuantificación es 1.

Las cuantificaciones obtenidas se trasladan a la matriz de dominación interfactorial, sustituyendo a los unos anteriores (Cuadro 5.18).

**Cuadro 5.18. Matriz de dominación interfactorial donde aparecen las influencias de  $C_1$  sobre  $C_1$  cuantificadas**

		C1			C2			
		e11	e12	e13	e21	e22	e23	e24
C1	e11	0	0,1667	0	1	0	1	0
	e12	0,6667	0	1	1	0	1	1
	e13	0,3333	0,8333	0	0	1	1	1
C2	e21	0	1	1	0	0	0	0
	e22	1	1	1	0	0	0	0
	e23	1	0	1	0	0	0	0
	e24	1	1	1	0	0	0	0

El mismo procedimiento se sigue en el clúster  $C_2$ , para cuantificar su influencia sobre los elementos de  $C_1$ , se plantean las correspondientes matrices de comparación pareadas, ver Cuadros 5.19 a 5.21.

**Cuadro 5.19. Influencia de  $e_{22}$ ,  $e_{23}$  y  $e_{24}$  sobre  $e_{11}$**

	$e_{22}$	$e_{23}$	$e_{24}$	VECTOR PROPIO
$e_{22}$	1	1/3	1/5	0,1047
$e_{23}$	3	1	1/3	0,2583
$e_{24}$	5	3	1	0,6370
CR	3,72%	< 5%		1,0000

**Cuadro 5.20. Influencia de  $e_{21}$ ,  $e_{23}$  y  $e_{24}$  sobre  $e_{12}$**

	$e_{21}$	$e_{23}$	$e_{24}$	VECTOR PROPIO
$e_{21}$	1	2	1/3	0,2297
$e_{23}$	1/2	1	1/5	0,1220
$e_{24}$	3	5	1	0,6483
CR	0,36%	< 5%		1,0000

**Cuadro 5.21. Influencia de  $e_{21}$ ,  $e_{22}$ ,  $e_{23}$  y  $e_{24}$  sobre  $e_{13}$**

	$e_{21}$	$e_{22}$	$e_{23}$	$e_{24}$	VECTOR PROPIO
$e_{21}$	1	1/5	1/3	3	0,1248
$e_{22}$	5	1	2	7	0,5275
$e_{23}$	3	1/2	1	4	0,2865
$e_{24}$	1/3	1/7	1/4	1	0,0612
CR	3,11%	< 9%			1,0000

Las ponderaciones obtenidas se trasladan a la matriz de dominación interfactorial, sustituyendo a los unos anteriores (Cuadro 5.22).

**Cuadro 5.22. Matriz de dominación interfactorial con las influencias de  $C_1$  y  $C_2$  sobre  $C_1$**

		C1			C2			
		e11	e12	e13	e21	e22	e23	e24
C1	e11	0	0,1667	0	1	0	1	0
	e12	0,6667	0	1	1	0	1	1
	e13	0,3333	0,8333	0	0	1	1	1
C2	e21	0	0,2297	0,1248	0	0	0	0
	e22	0,1047	0,122	0,5275	0	0	0	0
	e23	0,2583	0	0,2865	0	0	0	0
	e24	0,637	0,6483	0,0612	0	0	0	0

Se continúa con la cuantificación de las influencias de los elementos del clúster  $C_1$  sobre cada uno de los elementos del clúster  $C_2$ , ver Cuadros 5.23 al 5.25.

**Cuadro 5.23. Influencia de  $e_{11}$  y  $e_{12}$  sobre  $e_{21}$**

	$e_{11}$	$e_{12}$	VECTOR PROPIO
$e_{11}$	1	3	0,7500
$e_{12}$	1/3	1	0,2500
CR	0,00%	= 0%	1,0000

**Cuadro 5.24. Influencia de  $e_{11}$ ,  $e_{12}$  y  $e_{13}$  sobre  $e_{22}$**

	$e_{11}$	$e_{12}$	$e_{13}$	VECTOR PROPIO
$e_{11}$	1	1	1/4	0,1603
$e_{12}$	1	1	1/5	0,1488
$e_{13}$	4	5	1	0,6908
CR	0,53%	< 5%		1,0000

**Cuadro 5.25. Influencia de  $e_{12}$  y  $e_{13}$  sobre  $e_{23}$**

	$e_{12}$	$e_{13}$	VECTOR PROPIO
$e_{12}$	1	2	0,6667
$e_{13}$	1/2	1	0,3333
CR	0,00%	= 0%	1,0000

Nuevamente se sustituyen los 1 y 0 por los vectores propios, con lo cual se ha convertido la supermatriz de dominación interfactorial o de influencias en la supermatriz original (Cuadro 5.26), ya que no hay influencias del clúster  $C_2$  sobre los elementos de él mismo.

**Cuadro 5.26. Supermatriz original**

		C1			C2			
		e11	e12	e13	e21	e22	e23	e24
C1	e11	0	0,1667	0	0,75	0	0,1603	0
	e12	0,6667	0	1	0,25	0	0,1488	0,6667
	e13	0,3333	0,8333	0	0	1	0,6908	0,3333
C2	e21	0	0,2297	0,1248	0	0	0	0
	e22	0,1047	0,122	0,5275	0	0	0	0
	e23	0,2583	0	0,2865	0	0	0	0
	e24	0,637	0,6483	0,0612	0	0	0	0

4. **Cálculo de las prioridades entre clústers (supermatriz ponderada).** Cuando ya se tiene la supermatriz original con todas las ponderaciones, normalmente no será una matriz estocástica o sea una matriz en la que todas sus columnas sumen 1. Para transformarla en estocástica se plantea una matriz de comparación pareada con los clústers correspondientes para determinar la ponderación de los mismos. Continuando con el ejemplo anterior se puede ver que las columnas correspondientes a las influencias de  $C_1$  y  $C_2$  sobre  $C_1$  no suman uno, por lo que se debe plantear una matriz de comparación pareada en la que se pregunta “entre el clúster  $C_1$  y el  $C_2$  cual tiene mayor influencia sobre los elementos de  $C_1$ ”, suponiendo que la respuesta es  $C_2$ , la siguiente pregunta es “cuanta más influencia tiene  $C_2$  que  $C_1$ ”, respuesta: moderadamente más influencia, Cuadro 5.27.

**Cuadro 5.27. Matriz de comparación pareada de la influencia de los clústers  $C_1$  y  $C_2$  sobre los elementos del clúster  $C_1$**

	C1	C2	VECTOR PROPIO
C1	1	1/3	0,2500
C2	3	1	0,7500
CR	0,00%	= 0%	1,0000

Multiplicando los pesos de los elementos de cada clúster, por la ponderación del clúster (Cuadro 5.28), la matriz pasa a ser estocástica o sea la suma de los elementos de cada columna es uno.

**Cuadro 5.28. Producto ponderación clústers y ponderación elementos de cada clúster**

		C1			C2			
		e11	e12	e13	e21	e22	e23	e24
C1	e11	0	0,1667*0.25	0	0,75	0	0,1603	0
	e12	0,6667*0.25	0	1*0.25	0,25	0	0,1488	0,6667
	e13	0,3333*0.25	0,8333*0.25	0	0	1	0,6908	0,3333
C2	e21	0	0,2297*0.75	0,1248*0.75	0	0	0	0
	e22	0,1047*0.75	0,122*0.75	0,5275*0.75	0	0	0	0
	e23	0,2583*0.75	0	0,2865*0.75	0	0	0	0
	e24	0,637*0.75	0,6483*0.75	0,0612*0.75	0	0	0	0

**Cuadro 5.29. Supermatriz ponderada (original estocástica)**

		C1			C2			
		e11	e12	e13	e21	e22	e23	e24
C1	e11	0	0,0417	0	0,7500	0	0,1603	0
	e12	0,1667	0	0,2500	0,2500	0	0,1488	0,6667
	e13	0,0833	0,2083	0	0	1	0,6908	0,3333
C2	e21	0	0,1723	0,0936	0	0	0	0
	e22	0,0785	0,0915	0,3956	0	0	0	0
	e23	0,1937	0	0,2149	0	0	0	0
	e24	0,4778	0,4862	0,0459	0	0	0	0
		1	1	1	1	1	1	1

5. **Supermatriz límite.** Multiplicando la supermatriz ponderada por ella misma tantas veces como haga falta, llega un momento que todas las columnas son iguales y sus valores indicarán la prioridad global de los elementos de la red (Cuadro 5.30).

**Cuadro 5.30. Supermatriz límite**

		C1			C2			
		e11	e12	e13	e21	e22	e23	e24
C1	e11	0,0687	0,0687	0,0687	0,0687	0,0687	0,0687	0,0687
	e12	0,2107	0,2107	0,2107	0,2107	0,2107	0,2107	0,2107
	e13	0,2918	0,2918	0,2918	0,2918	0,2918	0,2917	0,2918
C2	e21	0,0636	0,0636	0,0636	0,0636	0,0636	0,0636	0,0636
	e22	0,1401	0,1401	0,1401	0,1401	0,1401	0,1401	0,1401
	e23	0,0760	0,0760	0,0760	0,0760	0,0760	0,0760	0,0760
	e24	0,1487	0,1487	0,1487	0,1487	0,1487	0,1486	0,1487

La supermatriz límite indica la ponderación final de los elementos, si C<sub>2</sub> eran las alternativas, la mejor es la e<sub>24</sub> con una ponderación de 0.1487 y si C<sub>1</sub> eran los criterios, la ponderación de los mismos indica que el que más ha influido es el e<sub>13</sub>, seguido del e<sub>12</sub> y con menor importancia e<sub>11</sub>. Generalmente la supermatriz límite es única, pero puede darse el caso de entrar en un proceso cíclico en el que existan varias supermatrices límite. Las prioridades globales se calculan como la media aritmética de las entradas de las distintas supermatrices límite.

## 5.9. PRIORIZACIÓN DE LA CUENCA UTILIZANDO EL MODELO ANP

Con base en los componentes descritos en los temas anteriores, a continuación se hace una descripción de la metodología, planteada en la presente investigación, para llevar a cabo la priorización de áreas de drenaje.

El esquema de trabajo inició con la delimitación de la cuenca y subcuencas tomando en consideración la metodología de delimitación propuesta por Pfafstetter (1989); posteriormente se identificaron los componentes que tienen influencia en la degradación de los recursos naturales de la cuenca los cuales fueron: morfometría, hipsometría, hidrología, estabilidad y saturación, uso actual del suelo y condiciones socioeconómicas (Figura 5.16). Estas características fueron determinadas para cada subcuenca en la que se obtuvo el estado actual de las mismas.

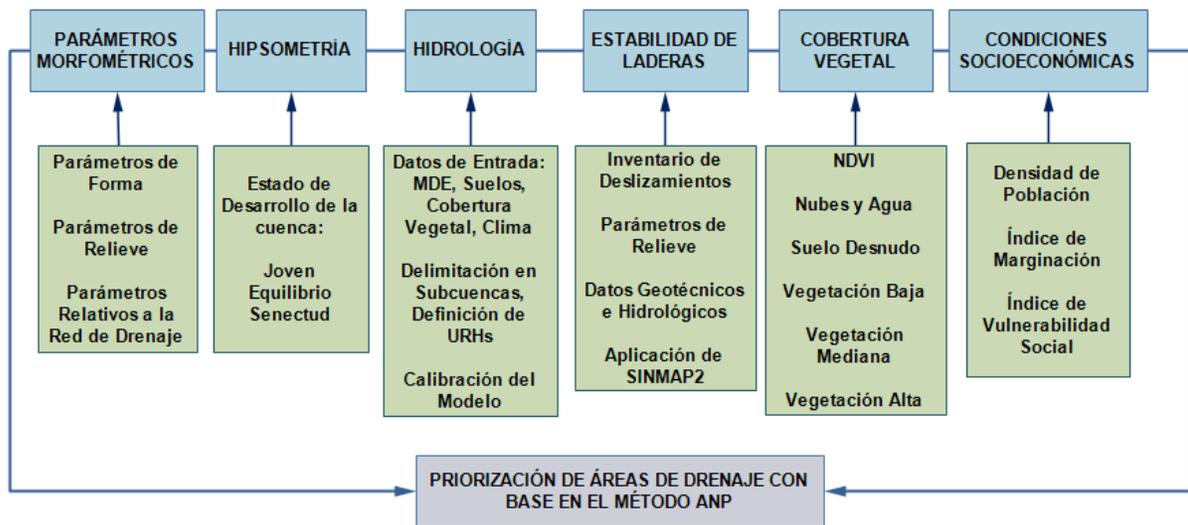


Figura 5.16. Esquema metodológico implementado en la cuenca

A partir de los resultados obtenidos de cada uno de los componentes, se definieron los criterios que tienen influencia directa sobre el proceso de degradación del sistema de drenaje, de esta forma se redujeron los criterios, quedando los que se muestran en la Figura 5.17.

Los criterios que fueron eliminados tenían una interacción con otros criterios, es decir, que se obtienen a partir de otros, al eliminarlos se redujo el número de elementos a comparar (criterios o variables) que se utilizan en la Matriz de Dominación Interfactorial.



Cuando se aplica el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), los componentes están relacionados con los criterios y estos con las subcuencas de forma independiente como estructura jerárquica de arriba hacia abajo (componente – criterio – subcuenca); de acuerdo con esto, cada subcuenca se analiza de forma aislada y su priorización está en función de los valores obtenidos de cada criterio (Figura 5.17). Esto indica que a cada criterio se le define un rango de variación en términos cualitativos y/o cuantitativos y se determina su prioridad en cada subcuenca pero no la interacción con las otras subcuencas.

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 como en el modelo AHP, de tal manera que se busca conocer el grado de dependencia e interrelación entre componentes y criterios (Figura 5.18); por lo tanto, con el modelo ANP es posible modelar el comportamiento del sistema hidrológico de las subcuencas cuando existe interacción entre estos y no parten de una estructura jerárquica como el modelo AHP donde la influencia de los criterios está ligada únicamente a los criterios del componente que se está analizando, ocasionando información imprecisa al tener esta limitante, lo que no ocurre con ANP.

Para la aplicación del modelo ANP en la cuenca del río Huehuetán, se programó una hoja de cálculo, la cual fue dividida en función de los pasos indicados anteriormente, de esta forma se inició con la identificación de los componentes y variables así como la influencia entre estos, 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 permitió obtener la Supermatriz Ponderada la cual se multiplicó por sí misma para obtener la Supermatriz Límite, donde ésta última muestra la priorización tanto de las subcuencas como de las variables. Esta información se analizó mediante tablas y gráficas para mostrar las subcuencas priorizadas y conocer la influencia que las variables ponderadas tienen sobre las subcuencas.

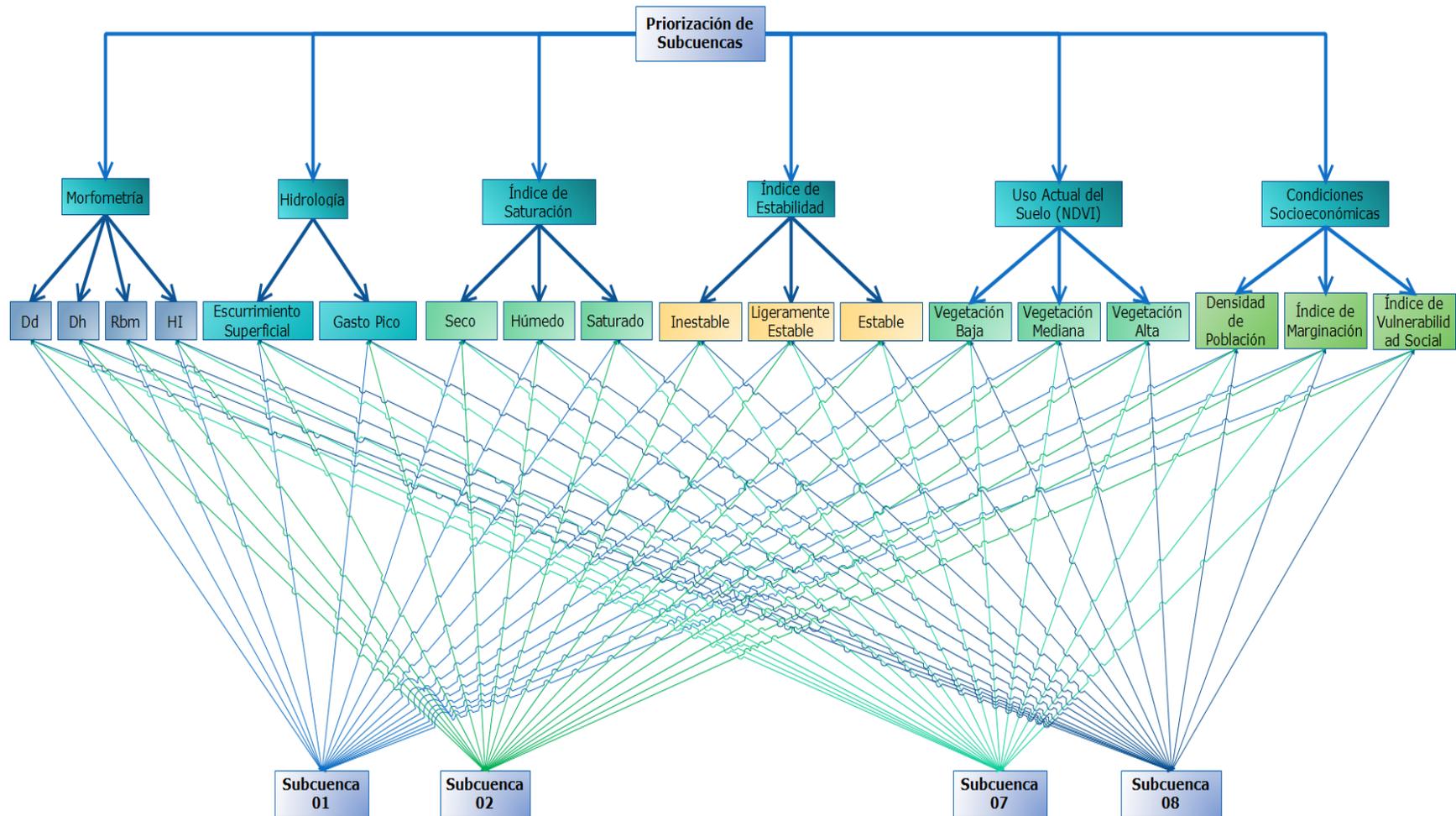


Figura 5.17. Esquema detallado de la interacción entre los componentes y los criterios con base en el modelo AHP

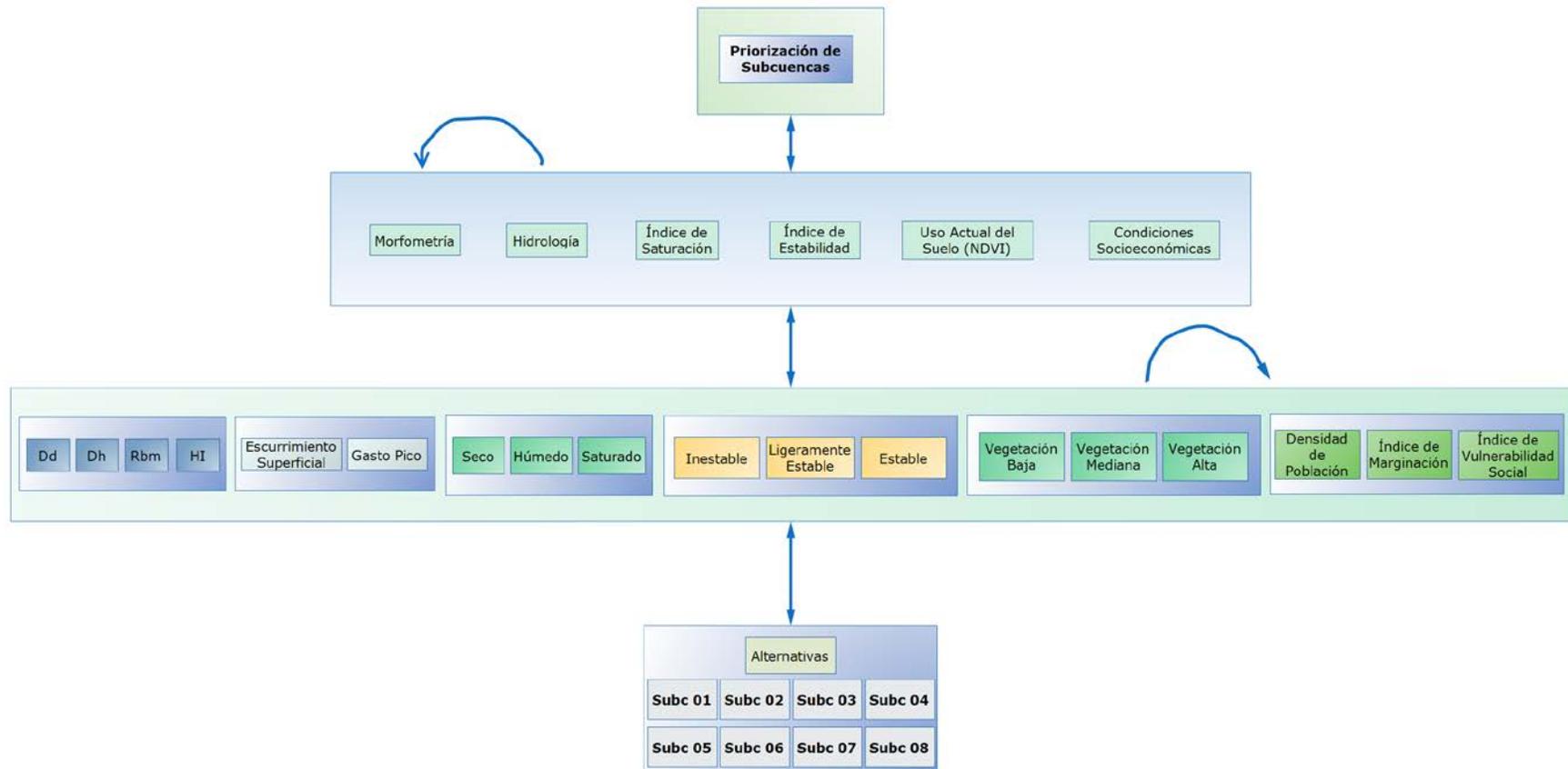


Figura 5.18. Esquema de la interacción entre componentes y criterios tomados en consideración para la aplicación del modelo ANP

## CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En éste capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos para los componentes descritos en los capítulos anteriores (morfometría, hidrología, estabilidad de laderas, NDVI y condiciones socioeconómicas) y se aplica el Proceso Analítico en Red (ANP) para priorizar las subcuencas en función de los componentes seleccionados y criterios utilizados.

### 6.1. ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LAS SUBCUENCAS

Los parámetros morfométricos del Cuadro 6.1 se obtuvieron con la aplicación de las ecuaciones del Cuadro 5.11. A partir de esta información, se eligieron los parámetros de densidad de drenaje ( $D_d$ ), densidad hidrográfica ( $D_h$ ) y relación de bifurcación media ( $R_{bm}$ ), que tienen mayor influencia en los procesos de degradación de la cuenca y que permitieron priorizar las áreas de drenaje, como han sido utilizados por Iqbal y Sajjad, 2014; Shikalgar, 2013; Wandre y Rank, 2013; Kanth y Hassan, 2012; Kumar-Tamang *et al.*, 2012; Rekha *et al.*, 2011.

Las subcuencas del área de estudio presentan alta densidad hidrográfica ( $D_h$ ), 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.

**Cuadro 6.1. Valores de los parámetros morfométricos para las subcuencas delimitadas**

Subcuenca	Parámetros lineales					Parámetros de forma				
	$D_d$	$D_h$	$R_{bm}$	$R_t$	$L_g$	$R_e$	$R_c$	$C_c$	$R_f$	$B_s$
1	4.778	11.544	4.995	15.299	0.105	0.313	0.170	2.422	0.077	12.955
2	3.916	7.680	3.452	3.686	0.128	0.340	0.113	2.970	0.091	11.046
3	5.173	12.142	4.571	10.516	0.097	0.375	0.227	2.101	0.110	9.059
4	5.066	11.587	4.355	7.170	0.099	0.480	0.290	1.856	0.181	5.527
5	5.342	12.579	3.987	6.750	0.094	0.425	0.254	1.983	0.142	7.056
6	5.844	14.526	4.375	6.429	0.086	0.389	0.173	2.406	0.119	8.399
7	5.605	16.011	4.295	11.073	0.089	0.434	0.232	2.077	0.148	6.753
8	5.411	14.275	4.142	15.636	0.092	0.450	0.292	1.852	0.159	6.288
<b>Mín.</b>	3.916	7.680	3.452	3.686	0.086	0.313	0.113	1.852	0.077	5.527
<b>Máx.</b>	5.844	16.011	4.995	15.636	0.128	0.480	0.292	2.970	0.181	12.955
<b>Media</b>	5.142	12.543	4.271	9.570	0.099	0.401	0.219	2.208	0.128	8.385
$\sigma$	0.593	2.526	0.447	4.326	0.013	0.057	0.063	0.377	0.035	2.547
<b>CV</b>	11.540	20.140	10.470	45.200	13.330	14.170	28.630	17.080	27.510	30.380

La densidad de drenaje ( $D_d$ ) está asociada con la susceptibilidad de los suelos a la erosión, de tal forma que su relación con el grado de degradación del suelo es directamente proporcional a su valor obtenido (Nauyital, 1994), especialmente cuando existen materiales impermeables de baja capacidad de infiltración, vegetación escasa y condiciones de relieve pronunciadas (Kanth y Hassan, 2012).

La relación de bifurcación incide sobre el grado de torrencialidad ya que a medida que exista mayor bifurcación, se reduce el tiempo de concentración de los escurrimientos y está vinculado con las diferentes respuestas del sistema de drenaje a las crecidas (Sala y Gay, 1981).

Los parámetros morfométricos (Cuadro 6.1) por sí mismos permiten jerarquizar a las subcuencas de acuerdo a sus valores cuantitativos ya que existe una relación directa de los parámetros sobre el funcionamiento hidrológico y la degradación de los suelos en las áreas de drenaje como ha sido reportado por López-Pérez *et al.*, 2015.

Los parámetros de forma no se utilizaron debido a que diferentes autores (Javed *et al.*, 2011; Pareta y Pareta, 2011; Magesh *et al.*, 2013; Tolessa y Rao, 2013; Uniyal y Gupta, 2013) han reportado que los parámetros lineales tienen mayor incidencia sobre los procesos de degradación del sistema de drenaje que se presentan en la cuenca; por lo tanto, permiten realizar una priorización de esta áreas con mayor certeza sin necesidad de incrementar el número de parámetros.

Otra variable morfométrica utilizada fue la curva hipsométrica ya que permite conocer el grado de desarrollo de la cuenca y el efecto que tiene la relación área-altitud sobre el proceso erosivo en el tiempo. 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.

El modelo utilizado para obtener el área bajo la curva fue polinomial de tercer grado, ecuación (6.1); los valores de los coeficientes se muestran en el Cuadro 6.2, mientras que el comportamiento de la curva hipsométrica para cada subcuenca se muestra en la Figura 6.1. La

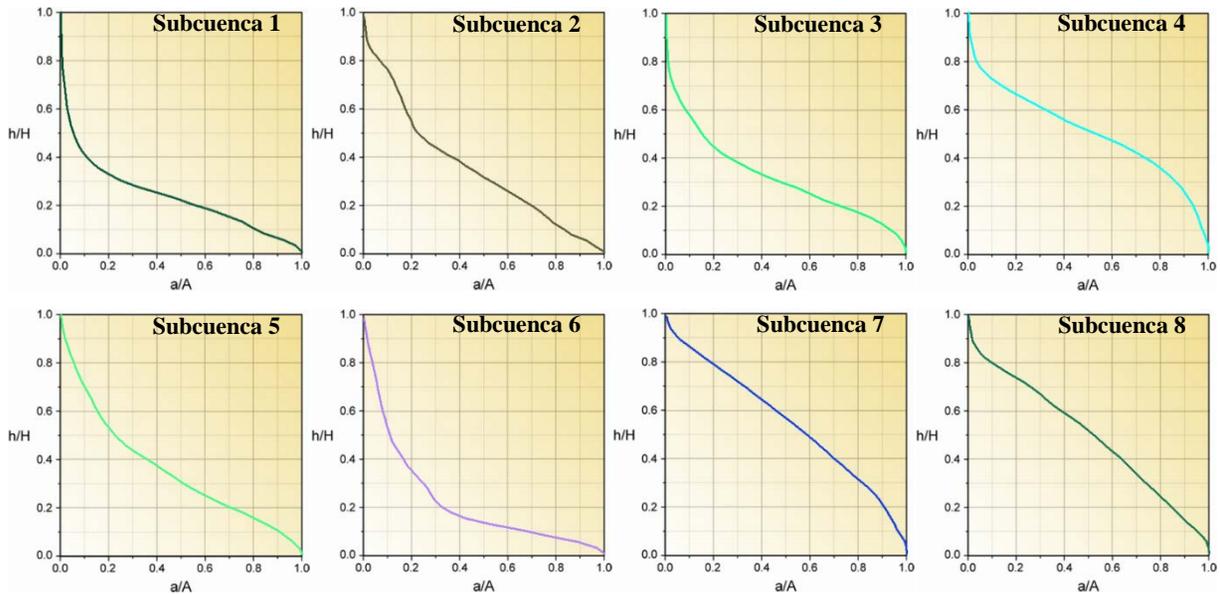
representación del modelo se muestra en la ecuación (6.2), donde (h/H) representa las alturas relativas y (a/A) las áreas relativas.

$$f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (6.1)$$

$$\left(\frac{h}{H}\right)_i = a_i + b_i \left(\frac{a}{A}\right) + c_i \left(\frac{a}{A}\right)^2 + d_i \left(\frac{a}{A}\right)^3 \quad (6.2)$$

**Cuadro 6.2. Valores de la integral hipsométrica (IH) para la cuenca del río Huehuetán**

Subc.	IH (%)	R <sup>2</sup>	Asimetría	Kurtosis	Fase	Coeficientes del modelo			
						a	b	c	d
1	21.90	0.909	0.5159	1.8344	Senectud	0.792	-3.866	7.304	-4.300
2	34.48	0.995	0.7014	2.4956	Madura	0.935	-2.395	2.985	-1.550
3	31.33	0.973	0.5179	2.0556	Senectud	0.842	-2.914	4.917	-2.844
4	50.02	0.990	0.3092	1.9623	Madura	0.913	-1.985	3.620	-2.507
5	34.67	0.996	0.6621	2.3607	Madura	0.943	-2.746	3.923	-2.125
6	21.76	0.987	0.9380	2.5950	Senectud	0.919	-4.199	7.047	-3.801
7	54.25	0.998	0.4328	2.1642	Madura	0.964	-1.110	1.058	-0.875
8	49.02	0.996	0.4904	2.2502	Madura	0.922	-1.069	0.732	-0.566



**Figura 6.1. Curvas hipsométricas para las subcuencas del río Huehuetán**

La caracterización morfométrica se ha empleado en la priorización de áreas de atención, específicamente para el establecimiento acciones encaminadas hacia la protección de los recursos naturales y la disminución de la degradación de los mismos, como ha sido reportado por Biswas *et al.* (2002), Ratnam *et al.* (2005), Kouli *et al.* (2007), Srinivasa-Vittala *et al.*

(2008), Sangita y Nagarajan (2010), Bagrayaj y Gurugnanam (2011), Srinivasa-Raju y Nagesh-Kumar (2011, 2013), Panhalkar *et al.* (2012), Iqbal y Sajjad (2014), Rashid y Saju (2014) y Sangle y Yannawar (2014), entre otros, quienes coinciden en el uso de los parámetros lineales para la priorización. Algunos de estos autores han utilizado los parámetros de forma, encontrando que no tienen influencia en los resultados ya que las comparaciones entre los parámetros de forma y los lineales no cambian los resultados de la priorización.

## 6.2. ANÁLISIS HIDROLÓGICO CON EL MODELO SWAT

El escurrimiento superficial y el gasto pico fueron estimados con el modelo SWAT y utilizados para la priorización de áreas de drenaje (Cuadro 6.3). La importancia de estas variables hidrológicas radica en su capacidad de transporte de sedimentos y su impacto en los procesos erosivos de las laderas, mismos que están relacionados con los procesos de degradación del suelo y el crecimiento de la red de drenaje en las diferentes subcuencas. De esta forma, las subcuencas con mayor escurrimiento, tienen mayor capacidad de transporte y si se combinan con avenidas pico, el efecto se incrementa ya que se presentan velocidades erosivas altas; esta combinación de ambas variables permite realizar una priorización de las áreas de drenaje.

*Cuadro 6.3. Valores del componente hidrológico de las subcuencas de la cuenca del río Huehuetán, según SWAT*

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Escurrimiento promedio (mm)	Volumen escurrido promedio (m <sup>3</sup> )	Gasto Pico (m <sup>3</sup> /s)
1	129.50	817.38	105,850,710.00	23.52
2	25.52	716.43	18,283,293.60	20.19
3	41.59	1,049.03	43,629,157.70	16.58
4	16.57	947.70	15,703,389.00	5.62
5	14.23	1,166.94	16,605,556.20	7.11
6	14.25	955.89	13,621,432.50	11.85
7	25.92	1,092.34	28,313,452.80	14.38
8	51.70	907.11	46,897,587.00	21.46

La subcuenca cinco fue la que reportó el mayor volumen promedio anual escurrido, seguida de las subcuencas 7 y 3. 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, lo que genera mayor escurrimiento ya que en gran parte de la subcuenca existen caminos revestidos y áreas urbanas (Cuadro 6.3).

Diferentes autores han identificado áreas con problemas de degradación de los suelos a través del modelo SWAT; por ejemplo, Besalatpour *et al.* (2012), reportaron áreas prioritarias en función del escurrimiento superficial, Tripathi *et al.* (2003) encontraron áreas con problemas de degradación del suelo, para implementar mejores prácticas de manejo en función de un plan de acción realizado con base en los resultados obtenidos con la priorización de subcuencas; Phomcha *et al.* (2012) calibraron el modelo SWAT para identificar áreas con problemas de erosión y recomendaron acciones para la conservación del suelo en la subcuenca Lam-Sonthi en Tailandia, siendo la reforestación y el acolchado las principales acciones propuestas. Pai *et al.* (2011) realizaron una priorización de subcuencas para el área de drenaje del río Illinois en Arkansas, mediante el modelo SWAT tomando en consideración los sedimentos, fósforo total y nitratos y encontraron que el 24% de la superficie aportaba el 49% de sedimentos, estos resultados coinciden con los encontrados por Tripathi (2003), ya que ambos concluyen que los principales problemas de degradación de los suelos se encontraron en la combinación de áreas urbanas con pastizales.

La priorización de áreas de drenaje utilizando el escurrimiento superficial, gasto pico y producción de sedimentos se han aplicado en diversas partes del mundo, los principales autores coinciden en la importancia de aplicar el modelo y realizar una calibración hidrológica buscando que las variables que se utilizan para la priorización reflejen el comportamiento del sistema de drenaje y de las subcuencas.

En la presente investigación, el uso de los parámetros como escurrimiento superficial y gasto pico, permitió conocer la respuesta de las subcuencas ante diversos eventos de lluvia, lo cual puede asociarse al grado de degradación del suelo y del sistema de drenaje, mediante el desprendimiento y transporte de los sedimentos. Finalmente, la combinación de ambos parámetros permite conocer la influencia del componente hidrológico en la priorización de subcuencas para la restauración hidrológica ambiental.

### 6.3. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL NDVI

La variación espacial y temporal de los NDVI entre 1993 y 2013 en la cuenca indican que ha existido una pérdida de la cobertura vegetal alta cercana al 10% durante un periodo de 20 años (Cuadro 6.4), esto ha sido influenciado por los cambios en las actividades de producción, principalmente en la parte alta de la cuenca donde se han talado bosques y selvas para el establecimiento de cultivos en laderas y por la presencia de los movimientos en masa del suelo que influyen sobre la degradación del suelo y el incremento del sistema de drenaje.

La vegetación alta predomina en la cuenca, debido a las coberturas de bosques y selvas de la región. La pérdida de la vegetación alta, se ve reflejada en un incremento en la vegetación mediana la cual, entre 1993 y 2013, se incrementó en 7.8% principalmente por el establecimiento de café bajo sombra.

*Cuadro 6.4. Valores de NDVI por clase de cobertura vegetal en la cuenca del río Huehuetán*

Clase	1993		2013	
	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)
Nubes y Agua (NA)	17.55	0.05	2.61	0.01
Suelo Desnudo (SD)	53.64	0.17	58.32	0.18
Vegetación Baja (VB)	80.37	0.25	526.41	1.65
Vegetación Mediana (VM)	554.67	1.74	3,054.87	9.57
Vegetación Alta (VA)	31,217.04	97.79	28,281.06	88.59
<b>Total</b>	<b>31,923.27</b>	<b>100.00</b>	<b>31,923.27</b>	<b>100.00</b>

Los cambios en las otras clases son mínimos, sin embargo también se consideraron para la priorización de áreas de drenaje ya que las pequeñas variaciones negativas en la cobertura vegetal inciden sobre la degradación del suelo de la misma intensidad solo que en áreas compactas.

La tendencia de 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.

A partir de la aplicación de la ecuación de NDVI a cada una de las imágenes de satélite para los dos periodos de análisis en las subcuencas se obtuvieron los Cuadros 6.5 y 6.6.

**Cuadro 6.5. Superficie ocupada en cada clase de NDVI, para el año 1993**

Subcuenca	Superficie de NDVI (ha)					Superficie de NDVI (%)				
	NA	SD	VL	VM	VA	NA	SD	VL	VM	VA
1	10.98	35.37	37.80	240.30	12,622.05	0.08	0.27	0.29	1.86	97.49
2	-	2.07	14.94	135.63	2,400.48	-	0.08	0.59	5.31	94.02
3	6.12	15.03	21.78	62.91	4,052.61	0.15	0.36	0.52	1.51	97.45
4	-	0.09	0.36	5.94	1,650.51	-	0.01	0.02	0.36	99.61
5	-	0.27	3.33	39.87	1,379.97	-	0.02	0.23	2.80	96.95
6	-	0.36	0.90	10.08	1,412.46	-	0.03	0.06	0.71	99.20
7	-	0.09	0.63	16.83	2,573.73	-	0.00	0.02	0.65	99.32
8	0.09	0.09	0.54	42.57	5,127.03	0.00	0.00	0.01	0.82	99.16

**Cuadro 6.6. Superficie ocupada en cada clase de NDVI, para el año 2013**

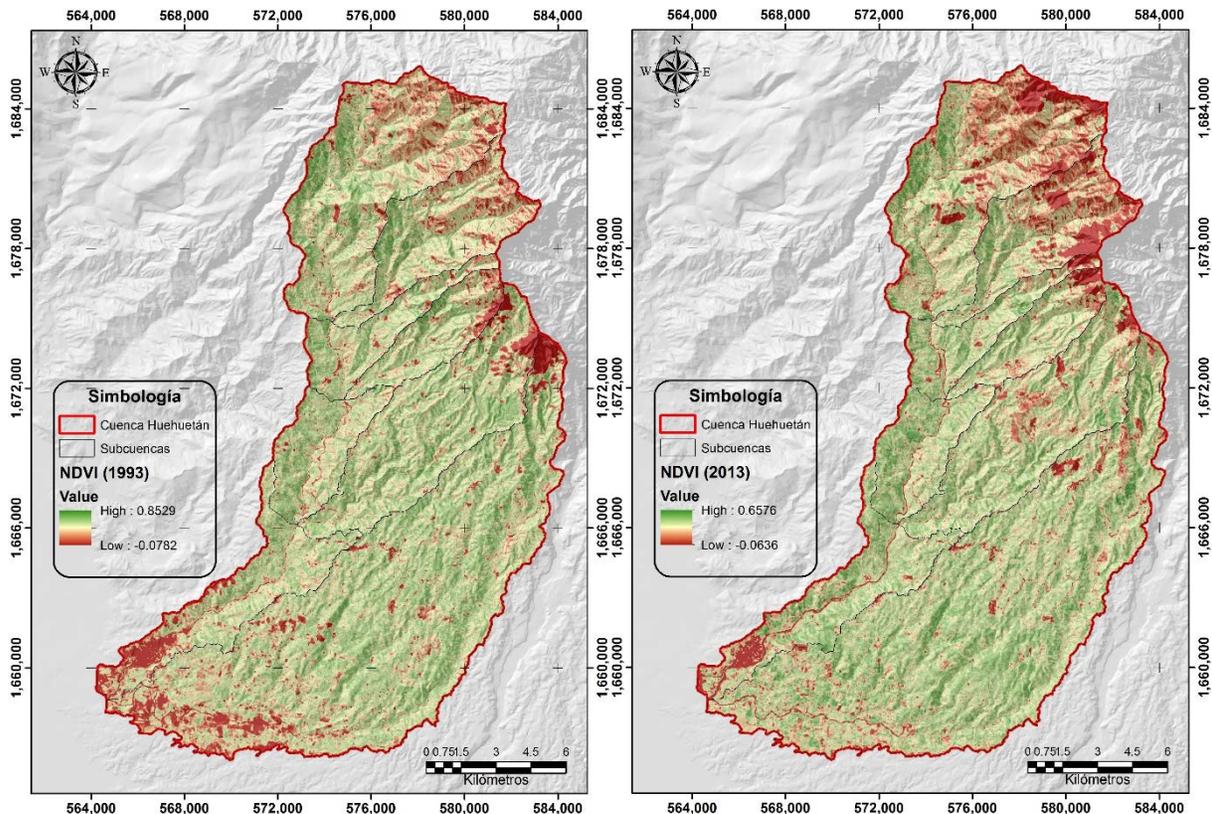
Subcuenca	Superficie de NDVI (ha)					Superficie de NDVI (%)				
	NA	SD	VL	VM	VA	NA	SD	VL	VM	VA
1	0.09	3.24	33.39	622.71	12,287.07	0.00	0.03	0.26	4.81	94.91
2	2.43	18.54	60.66	250.65	2,220.84	0.10	0.73	2.38	9.82	86.99
3	-	0.54	23.76	258.84	3,875.31	-	0.01	0.57	6.22	93.19
4	0.09	1.26	5.94	47.25	1,602.36	0.01	0.08	0.36	2.85	96.71
5	-	-	32.76	145.80	1,244.88	-	-	2.30	10.24	87.46
6	-	0.45	29.61	92.43	1,301.31	-	0.03	2.08	6.49	91.40
7	-	20.25	148.14	620.28	1,802.61	-	0.78	5.72	23.94	69.56
8	-	14.22	190.17	1,013.49	3,952.44	-	0.28	3.68	19.60	76.44

El análisis comparativo de la variación espacial y temporal del NDVI en las subcuencas (Cuadro 6.7) permitió priorizar, con base en los cambios de vegetación alta, mediana y baja, los cambios en escurrimiento superficial. Por lo tanto, para la priorización de las subcuencas, los valores de NDVI fueron incluidos en la matriz de priorización del Proceso Analítico en Red para mejorar la consistencia de la información y poder relacionar la cobertura vegetal con los demás componentes.

**Cuadro 6.7. Variación del NDVI (1993-2013) en las subcuencas del río Huehuetán**

Subcuenca	Superficie de NDVI (ha)					Superficie de NDVI (%)				
	NA	SD	VL	VM	VA	NA	SD	VL	VM	VA
1	-10.89	-32.13	-4.41	382.41	-334.98	-0.08	-0.25	-0.03	2.95	-2.59
2	2.43	16.47	45.72	115.02	-179.64	0.10	0.65	1.79	4.51	-7.04
3	-6.12	-14.49	1.98	195.93	-177.30	-0.15	-0.35	0.05	4.71	-4.26
4	0.09	1.17	5.58	41.31	-48.15	0.01	0.07	0.34	2.49	-2.91
5	0.00	-0.27	29.43	105.93	-135.09	0.00	-0.02	2.07	7.44	-9.49
6	0.00	0.09	28.71	82.35	-111.15	0.00	0.01	2.02	5.78	-7.81
7	0.00	20.16	147.51	603.45	-771.12	0.00	0.78	5.69	23.29	-29.76
8	-0.09	14.13	189.63	970.92	-1,174.59	0.00	0.27	3.67	18.78	-22.72

Espacialmente, los cambios se observan principalmente en la parte alta de la cuenca (subcuencas siete y ocho), por el incremento de la superficie agrícola, el cambio de uso del suelo, la tala de bosques y selvas para el establecimiento de maíz, frijol, café y hortalizas (Figura 6.2). Esta situación influye en la pérdida de la fertilidad de los suelos y en el mantenimiento de la calidad de los mismos, lo cual contribuye a la degradación por efecto de la erosión hídrica.



**Figura 6.2. Variación espacial y temporal del NDVI en la cuenca**

Diversos autores han utilizado el NDVI para conocer la variación espacio-temporal del uso actual del suelo y a partir de sus resultados, priorizan las áreas donde es necesaria la implementación de acciones para disminuir la degradación de las mismas. Por ejemplo, Nyamekye *et al.* (2014) para Ghana, en el periodo entre 1982 y 2002, elaboraron mapas de cobertura vegetal usando NDVI y encontraron que el mayor periodo de cambio ocurrió en los primeros 10 años. En Egipto, El-Gammal *et al.* (2014) utilizaron imágenes de los satélites LANDSAT para conocer los cambios en la cobertura vegetal y el vigor de la misma, entre los años 1987, 2004 y 2013 e identificaron una pérdida de la cobertura vegetal de 19.1% para el periodo entre 1987-2013 y de 10.1% entre 2004-2013, siendo 40% mayor la tasa de pérdida de cobertura vegetal para el segundo periodo. Los resultados del segundo periodo representan el doble de los resultados encontrados para la cuenca del río Huehuetán en un periodo de 20 años.

Jomaa y Bou-Kheir (2003), aplicaron una clasificación no supervisada mediante NDVI con imágenes de satélite LANDSAT, para los periodos entre 1987, 1994 y 1998 en dos sitios conocidos como Hermel y Dahr El-Baidar, Líbano; encontraron que la conversión hacia áreas agrícolas se incrementó hasta 165 ha. En la cuenca del río Huehuetán, la tasa anual de cambio correspondió a 164 ha de vegetación alta perdida. Lyon *et al.*, (2008), realizaron una comparación de siete diversos índices de vegetación para identificar cambios en la cobertura vegetal en el estado de Chiapas; donde el NDVI fue el único que mostró un histograma con distribución normal, además fue el menos afectado por las condiciones de relieve en la región.

El NDVI es importante en la priorización de áreas de drenaje y en la metodología aplicada ya que está asociado con el tipo y porcentaje de cobertura vegetal que está estrechamente relacionada con la degradación del suelo. Además, su relación con los demás componentes afecta el comportamiento de los procesos que se llevan a cabo en las subcuencas y determina hasta cierto punto la afectación que estos últimos tendrán sobre las áreas de drenaje.

Con base en estos resultados, es posible la aplicación del componente NDVI dentro del Proceso Analítico en Red para identificar aquellas subcuencas con mayor pérdida de la cobertura vegetal, al considerarlo en combinación con los efectos que la morfometría, hidrología, estabilidad de laderas y condiciones socioeconómicas tienen sobre el proceso de degradación del suelo.

#### 6.4. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD Y SATURACIÓN DE LOS SUELOS EN LAS LADERAS DE LAS SUBCUENCAS

El grado de susceptibilidad a deslizamientos de las masas de suelo de las laderas es directamente proporcional al incremento en las elevaciones, las condiciones de relieve y a las características de los suelos, lo que se acelera por la presencia de eventos hidrometeorológicos extremos que ocasionan la acumulación del agua en los suelos, generando los derrumbes.

Las condiciones de relieve presentes en la cuenca del río Huehuetán están influenciadas por la cercanía del volcán Tacaná, debido a esto, las condiciones de suelos presentes en el área están asociadas con los procesos que han ocurrido a través de millones de años y que han repercutido en condiciones de relieve escarpado, lo cual propicia la susceptibilidad a los deslizamientos en la parte alta de la cuenca, principalmente.

Las condiciones de estabilidad en cuenca indican que el 64.28% de la superficie es estable (Cuadro 6.8); 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 (Figura 6.3). Un problema en las áreas inestables es que si se presentan lluvias intensas de corta duración, el riesgo al deslizamiento en masa del suelo es más alto.

*Cuadro 6.8. Superficie ocupada en función del índice de estabilidad*

Subcuenca	Inestable		Ligeramente Estable		Estable		Total (ha)
	ha	%	ha	%	ha	%	
1	125.30	0.97	1,927.23	14.88	10,897.30	84.15	12,949.83
2	16.67	0.65	379.58	14.87	2,156.01	84.47	2,552.26
3	178.82	4.30	1,468.28	35.31	2,511.51	60.39	4,158.61
4	22.60	1.36	379.88	22.93	1,254.04	75.70	1,656.52
5	188.90	13.28	690.60	48.54	543.39	38.19	1,422.89
6	105.36	7.39	467.77	32.83	851.64	59.77	1,424.77
7	501.45	19.35	1,468.08	56.64	622.35	24.01	2,591.88
8	657.44	12.72	2,824.78	54.64	1,687.99	32.65	5,170.21
<b>Total</b>	<b>1,796.54</b>	<b>5.63</b>	<b>9,606.20</b>	<b>30.09</b>	<b>20,524.23</b>	<b>64.28</b>	<b>31,926.97</b>

Las subcuencas con áreas más inestables son la 7 y 8 (Cuadro 6.8), ubicadas en la parte alta de la cuenca del río Huehuetán. Los índices de inestabilidad por subcuenca son importantes para la priorización ya que determinan el nivel de degradación de los suelos debido a las condiciones escarpadas y a las propiedades mecánicas de los suelos.

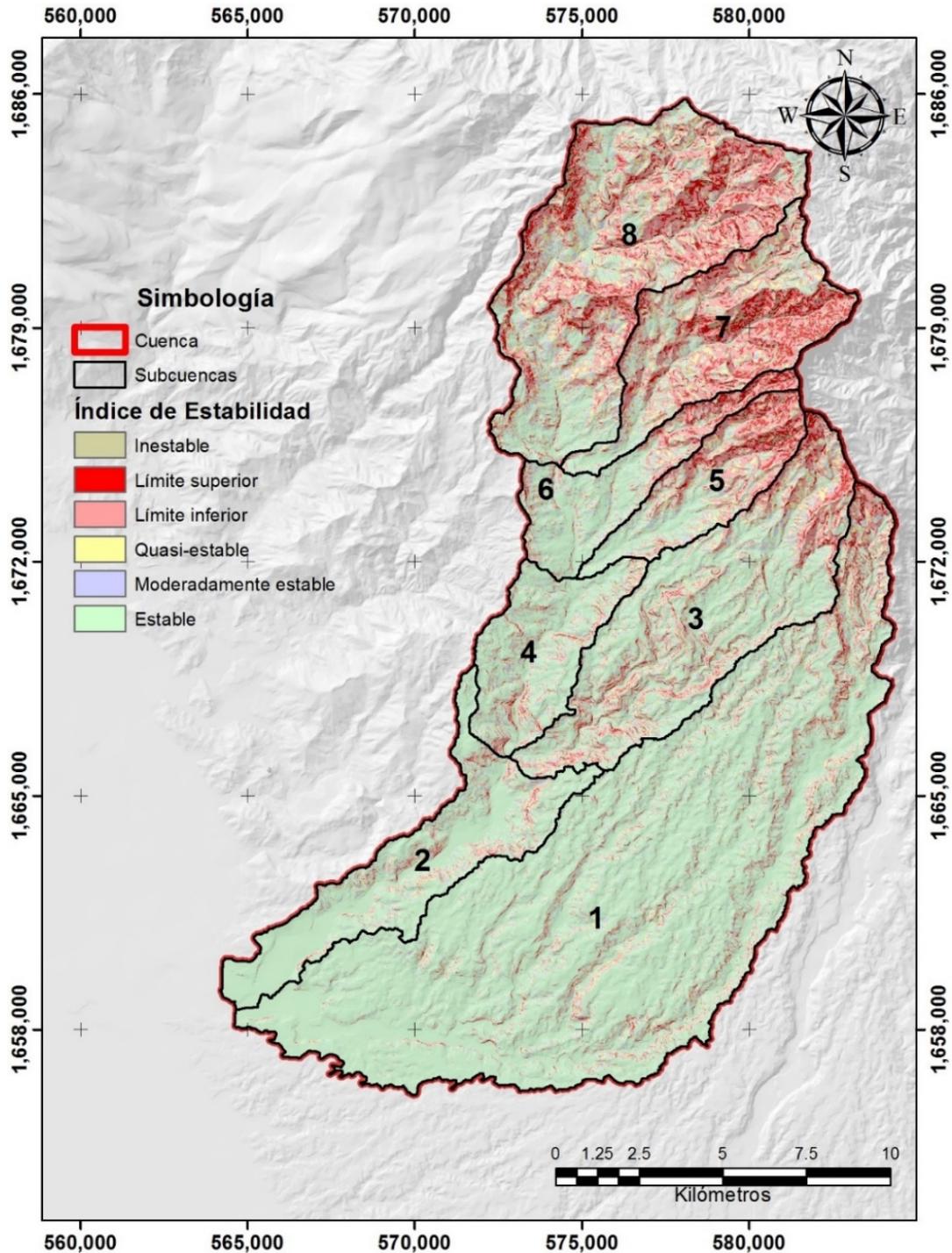


Figura 6.3. Distribución de la estabilidad de laderas dentro de la cuenca del río Huehuetán

Los valores del índice de estabilidad permitieron realizar una priorización de áreas de drenaje en función del riesgo que presentan por los deslizamientos. De esta forma, la priorización se realizó con los valores del índice de estabilidad para cada subcuenca.

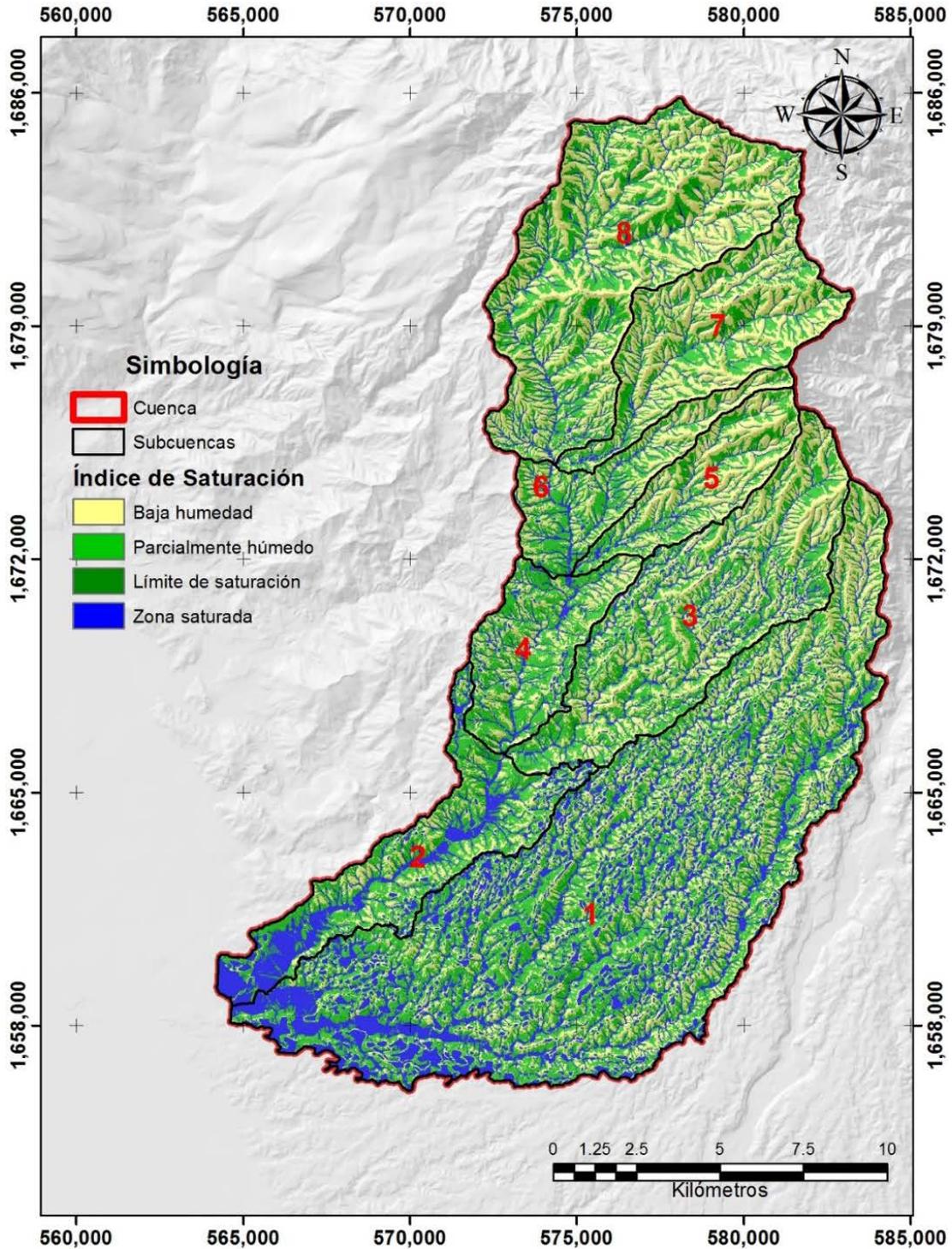


Figura 6.4. Variación del índice de saturación en la cuenca del río Huehuetán

Las áreas con mayor grado de saturación del suelo están en la parte baja y cercanas a los cauces; 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 en esas áreas (Figura 6.4). 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.

Las áreas bajas de la cuenca son las de mayor saturación debido a las condiciones de relieve que predominan, sin embargo, en la parte alta, la combinación del grado de saturación del suelo con la inestabilidad de las laderas, son los principales detonantes de los deslizamientos (Cuadro 6.9).

La mayor parte de la superficie de la cuenca se encuentra en la clase húmeda, seguida por los de baja humedad y solo el 19.12% se encuentra en la zona saturada. Sin embargo, las subcuencas de la parte alta (5, 6, 7 y 8) son las que tienen mayor influencia en el grado de saturación de los suelos al combinarse con las precipitaciones de alta intensidad, suelos erosionados, cobertura vegetal degradada y áreas susceptibles a deslizamientos, lo cual ocasiona la inestabilidad en las laderas al incrementarse el contenido de agua en los suelos, reduciendo el esfuerzo cortante de los mismos y generando deslizamientos debido a las condiciones de relieve escarpado.

*Cuadro 6.9. Superficie ocupada por cada clase del grado de saturación del suelo*

Subcuenca	Baja humedad o Seco		Húmeda		Saturada		Total (ha)
	ha	%	ha	%	ha	%	
1	3,748.05	28.94	5,643.32	43.58	3,558.46	27.48	12,949.83
2	550.34	21.56	1,194.11	46.79	807.81	31.65	2,552.26
3	1,852.38	44.54	1,759.75	42.32	546.48	13.14	4,158.61
4	530.49	32.02	885.54	53.46	240.49	14.52	1,656.52
5	759.95	53.41	529.42	37.21	133.52	9.38	1,422.89
6	624.03	43.80	627.92	44.07	172.82	12.13	1,424.77
7	1,456.72	56.20	941.73	36.33	193.43	7.46	2,591.88
8	2,672.53	51.69	2,047.11	39.59	450.57	8.71	5,170.21
<b>Total</b>	<b>12,194.49</b>	<b>38.19</b>	<b>13,628.90</b>	<b>42.69</b>	<b>6,103.58</b>	<b>19.12</b>	<b>31,926.97</b>

La combinación de la estabilidad de laderas y saturación del suelo, con los componentes de morfometría, hidrología, cobertura vegetal y condiciones socioeconómicas, permitió identificar

las áreas prioritarias que necesitan ser atendidas para disminuir los efectos de degradación de los recursos que han sido generados de forma natural o por las actividades antropogénicas.

## 6.5. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SOCIOECONÓMICA DE LA CUENCA

A partir del Censo de Población y Vivienda del año 2010, se obtuvieron los valores requeridos por localidad y subcuencas (Cuadro 6.10).

*Cuadro 6.10. Densidad de Población e Índice de Marginación para las subcuencas delimitadas*

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Población Total (hab.)	Densidad de Población (hab/km <sup>2</sup> )	Índice de Marginación Promedio
1	12,949.83	13,154	1.016	15.3302
2	2,552.26	9,195	3.603	15.4702
3	4,158.61	2,293	0.551	18.2495
4	1,656.52	728	0.439	18.2179
5	1,422.89	869	0.611	16.2424
6	1,424.77	1,897	1.331	14.9049
7	2,591.88	654	0.252	18.5456
8	5,170.21	1,887	0.365	17.0956
<b>Cuenca</b>	<b>31,926.97</b>	<b>30,677</b>	<b>0.961</b>	

Arellano-Monterrosas (2012), determinó el Índice de Vulnerabilidad Social (IVS) en la cuenca del río Huehuetán; los valores del IVS a nivel subcuenca se muestran en el Cuadro 6.11. De acuerdo con esta información, todas las áreas de drenaje se encuentran dentro de la clase media. Esta información permite realizar una clasificación de las áreas de intervención con base en los resultados numéricos de la misma clase del IVS.

*Cuadro 6.11. Valores del IVS para las subcuencas dentro del área de estudio*

Subcuenca	IVS	Clase
1	0.518	Media
2	0.518	Media
3	0.501	Media
4	0.488	Media
5	0.434	Media
6	0.532	Media
7	0.453	Media
8	0.546	Media



## 6.6. PRIORIZACIÓN DE ÁREAS DE DRENAJE UTILIZANDO EL PROCESO ANALÍTICO EN RED (ANP)

El Proceso Analítico en Red (ANP) se utilizó para analizar las interrelaciones entre las variables y los componentes, mediante la interacción que tienen las variables y componentes entre sí, se logró obtener la Matriz de Dominación Interfactorial (Cuadro 6.13).

La red de influencias sobre las variables y los componentes debe ser elaborada a partir de la opinión de expertos en el área que se está aplicando el modelo ANP, ya que en función de la información agregada a la matriz, será la calidad y precisión del resultado obtenido (Tzeng y Huang, 2011). Para mejorar este aspecto, Ou-Yang *et al.*, (2013) utilizaron el modelo DEMATEL (*DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory*), el cual permite normalizar la red de influencias utilizada en ANP.

Se utilizaron los criterios por componente, considerados para la priorización de áreas de drenaje (áreas de intervención) para conocer su influencia e interacción ya que están relacionados con el proceso de degradación del suelo y de la red de drenaje del área de estudio. De esta forma, el análisis de la influencia se realizó de forma cuantitativa.

Los componentes de Estabilidad de Laderas, Saturación del Suelo y NDVI, son los que tienen un mayor coeficiente de variación y son muy importantes en la conformación del sistema de drenaje de las subcuencas (Cuadro 6.12) y que son considerados en la Matriz de Dominación Interoactorial (Cuadro 6.13) y en las matrices de comparación pareada, ya que la variación de sus valores entre subcuencas es significativo y esto influye directamente sobre el proceso de degradación de los recursos.

Para el componente Condiciones Socioeconómicas, el criterio (variable) Densidad de Población (Dp) fue la que mayor influencia presentó de las tres evaluadas; mientras que la Morfometría fue el componente con menor variación, pero es importante ya que son los parámetros lineales de las subcuencas los que asociados con la red de drenaje permiten realizar la priorización de estas áreas.



Cuadro 6.12. Valores de las variables utilizadas para la priorización de las subcuencas del río Huehuetán

Componente	Criterio	Subcuencas								$\sigma$	$\bar{x}$	CV (%)
		01	02	03	04	05	06	07	08			
Morfometría	Dd (km/km <sup>2</sup> )	4.78	3.92	5.17	5.07	5.34	5.84	5.60	5.41	0.59	5.14	11.54
	Dh (cauces/km <sup>2</sup> )	11.54	7.68	12.14	11.59	12.58	14.53	16.01	14.27	2.53	12.54	20.14
	Rbm (adim.)	4.99	3.45	4.57	4.35	3.99	4.38	4.30	4.14	0.45	4.27	10.47
	IH (%)	21.90	34.48	31.33	50.02	34.67	21.76	54.25	49.02	12.62	37.18	33.95
Hidrología	Esc (mm)	817.38	716.43	1,049.03	947.70	1,166.94	955.89	1,092.34	907.11	146.78	956.60	15.34
	Qp (m <sup>3</sup> /s)	23.52	20.19	16.58	5.62	7.11	11.85	14.38	21.46	6.59	15.09	43.69
Índice de Estabilidad	I (ha)	125.30	16.67	178.82	22.60	188.90	105.36	501.45	657.44	231.60	224.57	103.13
	LE (ha)	1,927.23	379.58	1,468.28	379.88	690.60	467.77	1,468.08	2,824.78	882.69	1,200.78	73.51
	Est (ha)	10,897.30	2,156.01	2,511.51	1,254.04	543.39	851.64	622.35	1,687.99	3,440.96	2,565.53	134.12
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	1,177.57	1,524.31	77.25
	H (ha)	5,643.32	1,194.11	1,759.75	885.54	529.42	627.92	941.73	2,047.11	1,677.05	1,703.61	98.44
	Sa (ha)	3,558.46	807.81	546.48	240.49	133.52	172.82	193.43	450.57	1,152.83	762.95	151.10
NDVI	VB* (ha)	-4.41	45.72	1.98	5.58	29.43	28.71	147.51	189.63	71.62	56.62	126.49
	VM* (ha)	382.41	115.02	195.93	41.31	105.93	82.35	603.45	970.92	326.20	312.17	104.49
	VA* (ha)	-334.98	-179.64	-177.30	-48.15	-135.09	-111.15	-771.12	-1,174.59	397.95	366.50	108.58
Condiciones Socioeconómicas	DP (hab/km <sup>2</sup> )	1.02	3.60	0.55	0.44	0.61	1.33	0.25	0.36	1.10	1.02	107.98
	IM (adim.)	15.33	15.47	18.25	18.22	16.24	14.90	18.55	17.10	1.47	16.76	8.75
	IVS (adim.)	0.52	0.52	0.50	0.49	0.43	0.53	0.45	0.55	0.04	0.50	7.76

\* Nota: Los valores de cobertura vegetal corresponden a la diferencia entre el periodo de análisis (1993-2013), los cuales deben leerse como: valores positivos indican ganancia de cobertura en esa clase; valores negativos indican pérdida de vegetación en esa clase.



Cuadro 6.13. 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	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
	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
	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
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	1	1	0	1	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	0	1	1	0	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	0	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	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Subc. 05	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	0
	Subc. 06	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	0
	Subc. 07	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	0
	Subc. 08	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Con base en la determinación de las influencias y las interdependencias entre variables y componentes, se elaboraron las matrices de comparación pareadas para cada interrelación que se obtuvo en la Matriz de Dominación Interfactorial, el Cuadro 6.14 muestra un ejemplo de las matrices de comparación pareadas.

**Cuadro 6.14. Matrices de comparación pareada para el componente de morfometría, variable  $D_d$**

<b>Dd</b>	Esc	Qp	Vector Propio
Esc	1	3	0.7500
Qp	1/3	1	0.2500
CR	0.00%	= 0%	1.0000
<b>Dd</b>	I	LE	Vector Propio
I	1	5	0.8333
LE	1/5	1	0.1667
CR	0.00%	= 0%	1.0000
<b>Dd</b>	VB	VM	Vector Propio
VB	1	3	0.7500
VM	1/3	1	0.2500
CR	0.00%	= 0%	1.0000

**Cuadro 6.15. Normalización para los valores obtenidos de  $D_d$  en las subcuencas**

Subcuenca	$D_d$	Valor Normalizado
S01	4.7779	0.1162
S02	3.9158	0.0952
S03	5.1731	0.1258
S04	5.0658	0.1232
S05	5.3422	0.1299
S06	5.8442	0.1421
S07	5.6049	0.1363
S08	5.4110	0.1315
<b>Total</b>	<b>41.1350</b>	<b>1.0000</b>

Los resultados del valor normalizado de la  $D_d$  (Cuadro 6.15), indican que no existe una amplia variación en los valores extremos (0.0469); sin embargo, la combinación de esta variable con la geoforma del suelo y los componentes analizados, incrementan los procesos de degradación en la cuenca o subcuencas y potencializan la pérdida de la cobertura vegetal y de los suelos, ya que el incremento de un cauce en una subcuenca indica la susceptibilidad de ésta a la degradación.



Se elaboraron 83 matrices de comparación pareada para observar la ponderación de las influencias de cada variable sobre las otras variables, tomando en consideración los valores obtenidos para cada una de éstas últimas en las subcuencas. Con estas ponderaciones se generó la Supermatriz Original, la cual incluye la ponderación de la influencia de una variable sobre otra (Cuadro 6.16).

**Cuadro 6.16. Supermatriz Original generada a partir de las matrices de comparación pareada**

SUPERMATRIZ ORIGINAL		Morfometría				Hidrología		Índice de Estabilidad			Índice de Saturación			NDVI			Condiciones Socioeconómicas			Alternativas								
		Dd	Dh	Rbm	IH	E	Qp	I	LE	E	Se	H	Sa	VB	VM	VA	DP	IM	IVS	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	
Morfometría	Dd	0.0000	0.2500	0.2500	0.0000	0.6483	0.4834	0.3000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.4907	0.3350	0.3350	0.0000	1.0000	0.6483	0.0000	0.5048	0.5048	0.5048	0.5048	0.5048	0.5048	0.5048	0.5048	0.5048
	Dh	1.0000	0.0000	0.7500	0.0000	0.2297	0.2479	0.3000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.3002	0.4663	0.4663	1.0000	0.0000	0.2297	1.0000	0.2876	0.2876	0.2876	0.2876	0.2876	0.2876	0.2876	0.2876	0.2876
	Rbm	0.0000	0.7500	0.0000	1.0000	0.0000	0.1911	0.3000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1573	0.1405	0.1405	0.0000	0.0000	0.1220	0.0000	0.1431	0.1431	0.1431	0.1431	0.1431	0.1431	0.1431	0.1431	0.1431
	IH	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1220	0.0776	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0519	0.0582	0.0582	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645
Hidrología	E	0.7500	0.1667	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500
	Qp	0.2500	0.8333	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
Índice de Estabilidad	I	0.8333	1.0000	1.0000	0.7500	0.5584	0.5584	0.0000	1.0000	0.0000	0.6483	0.6370	0.1095	0.6483	0.6483	0.6483	1.0000	1.0000	1.0000	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047	0.6483
	LE	0.1667	0.0000	0.0000	0.2500	0.3196	0.3196	1.0000	0.0000	1.0000	0.2297	0.2583	0.3090	0.2297	0.2297	0.2297	0.0000	0.0000	0.0000	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583	0.2297
	E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1220	0.1220	0.0000	0.0000	0.0000	0.1220	0.1047	0.5816	0.1220	0.1220	0.1220	0.0000	0.0000	0.0000	0.6370	0.6370	0.6370	0.6370	0.6370	0.6370	0.6370	0.6370	0.1220
Índice de Saturación	Se	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1220	0.0000	0.1095	0.0879	0.1095	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.6483	0.6483	0.6483	0.6483	0.6483	0.6483	0.6483	0.6483	0.6370
	H	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2297	0.0000	0.3090	0.2426	0.3090	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.2297	0.2297	0.2297	0.2297	0.2297	0.2297	0.2297	0.2297	0.2583
	Sa	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.6483	1.0000	0.5816	0.6694	0.5816	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.1220	0.1220	0.1220	0.1220	0.1220	0.1220	0.1220	0.1220	0.1047
NDVI	VB	0.7500	0.8333	1.0000	1.0000	0.6370	0.6370	0.7306	0.6370	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6370	0.6370	0.6370	0.6370	0.6370	0.6370	0.6370	0.6370	0.6370
	VM	0.2500	0.1667	0.0000	0.0000	0.2583	0.2583	0.1884	0.2583	0.0000	0.0000	0.6667	0.1667	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583
	VA	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1047	0.1047	0.0810	0.1047	1.0000	0.0000	0.3333	0.8333	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047
Condiciones Socioeconómicas	DP	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.8333	0.6667	0.6694	0.6694	0.6694	0.6694	0.6694	0.6694	0.6694	0.6694	0.6694	0.6694
	IM	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.7500	0.0000	0.3333	0.2426	0.2426	0.2426	0.2426	0.2426	0.2426	0.2426	0.2426	0.2426
	IVS	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2500	0.1667	0.0000	0.0879	0.0879	0.0879	0.0879	0.0879	0.0879	0.0879	0.0879	0.0879
Alternativas	S01	0.1162	0.1150	0.1462	0.0736	0.1068	0.1966	0.0697	0.2006	0.0132	0.0314	0.4141	0.5830	0.0097	0.1531	0.1142	0.1243	0.1144	0.1298	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S02	0.0952	0.0765	0.1010	0.1159	0.0936	0.1709	0.0093	0.0395	0.0666	0.2141	0.0876	0.1324	0.1009	0.0461	0.0613	0.4410	0.1154	0.1298	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S03	0.1258	0.1210	0.1338	0.1053	0.1371	0.1368	0.0995	0.1528	0.0572	0.0636	0.1291	0.0895	0.0044	0.0785	0.0605	0.0675	0.1361	0.1256	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S04	0.1232	0.1155	0.1274	0.1682	0.1238	0.0427	0.0126	0.0395	0.1145	0.2221	0.0650	0.0394	0.0123	0.0165	0.0164	0.0538	0.1359	0.1223	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S05	0.1299	0.1254	0.1167	0.1166	0.1525	0.0598	0.1051	0.0719	0.2642	0.1550	0.0388	0.0219	0.0650	0.0424	0.0461	0.0748	0.1212	0.1088	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S06	0.1421	0.1448	0.1280	0.0732	0.1249	0.0940	0.0586	0.0487	0.1686	0.1888	0.0461	0.0283	0.0634	0.0330	0.0379	0.1630	0.1112	0.1333	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S07	0.1363	0.1596	0.1257	0.1824	0.1427	0.1197	0.2791	0.1528	0.2307	0.0809	0.0691	0.0317	0.3257	0.2416	0.2630	0.0309	0.1383	0.1135	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
	S08	0.1315	0.1423	0.1212	0.1648	0.1185	0.1795	0.3659	0.2941	0.0851	0.0441	0.1502	0.0738	0.4186	0.3888	0.4006	0.0447	0.1275	0.1368	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000

Además, se construyeron siete matrices de comparación pareadas para conocer la influencia entre los componentes, Cuadro 6.17.

*Cuadro 6.17. Matriz de comparación pareada para conocer la influencia de los componentes sobre el componente MORFOMETRÍA*

MORFOMETRÍA	Hidrología	Índice de Estabilidad	Índice de Saturación	NDVI	Condiciones Socioeconómicas	Alternativas	Vector Propio
Hidrología	1	3	3	5	7	9	0.4197
Índice de Estabilidad	1/3	1	3	3	5	5	0.2393
Índice de Saturación	1/3	1/3	1	2	6	7	0.1634
NDVI	1/5	1/3	1/2	1	3	7	0.1047
Condiciones Socioeconómicas	1/7	1/5	1/6	1/3	1	3	0.0459
Alternativas	1/9	1/5	1/7	1/7	1/3	1	0.0271
CR	7.6268%	< 10%					1.0000

A partir de la comparación entre componentes, se obtuvo la matriz de influencia de los componentes (Cuadro 6.18), de tal forma que estos valores permitieron convertir a la Supermatriz Original en la denominada Supermatriz Ponderada, la cual se convierte en una matriz estocástica al sumar todas sus columnas el valor de uno.

*Cuadro 6.18. Valores obtenidos para la Matriz de Comparación de Componentes a partir de las matrices de comparación pareadas entre componentes*

	Morfometría	Hidrología	Índice de Estabilidad	Índice de Saturación	NDVI	Condiciones Socioeconómicas	Alternativas
Morfometría	0.00000	0.46158	0.10517	0.09570	0.06584	0.15078	0.15218
Hidrología	0.41972	0.00000	0.17189	0.31026	0.11253	0.13489	0.30856
Índice de Estabilidad	0.23926	0.09446	0.00000	0.16033	0.21543	0.28725	0.08027
Índice de Saturación	0.16339	0.08844	0.31340	0.00000	0.22819	0.30314	0.09375
NDVI	0.10466	0.19029	0.31950	0.34078	0.00000	0.07362	0.30432
Condiciones Socioeconómicas	0.04590	0.12977	0.05887	0.06168	0.33645	0.00000	0.06092
Alternativas	0.02707	0.03545	0.03117	0.03125	0.04156	0.05031	0.00000
SUMA	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Para la obtención de la Supermatriz Ponderada, Cuadro 6.19, se realizó la multiplicación de matrices de la Supermatriz Original y la Matriz de Comparación de Componentes.



Cuadro 6.19. Supermatriz Ponderada obtenida a partir de la supermatriz original y la matriz de comparación de componentes

SUPERMATRIZ PONDERADA		Morfometría				Hidrología		Índice de Estabilidad			Índice de Saturación			NDVI			Condiciones Socioeconómicas			Alternativas								
		Dd	Dh	Rbm	IH	E	Qp	I	LE	E	Se	H	Sa	VB	VM	VA	DP	IM	IVS	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	
Morfometría	Dd	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2993	0.2231	0.0316	0.1052	0.1052	0.0957	0.0000	0.0470	0.0221	0.0221	0.0000	0.1508	0.0978	0.0000	0.0768	0.0768	0.0768	0.0768	0.0768	0.0768	0.0768	0.0768	0.0768
	Dh	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1060	0.1144	0.0316	0.0000	0.0000	0.0000	0.0957	0.0287	0.0307	0.0307	0.0658	0.0000	0.0346	0.1508	0.0438	0.0438	0.0438	0.0438	0.0438	0.0438	0.0438	0.0438	0.0438
	Rbm	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0882	0.0316	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0150	0.0093	0.0093	0.0000	0.0000	0.0184	0.0000	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218
	IH	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0563	0.0358	0.0105	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0050	0.0038	0.0038	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098
Hidrología	E	0.3148	0.0700	0.0000	0.4197	0.0000	0.0000	0.1719	0.1719	0.1719	0.0000	0.3103	0.3103	0.1125	0.1125	0.0000	0.1349	0.0000	0.1349	0.2314	0.2314	0.2314	0.2314	0.2314	0.2314	0.2314	0.2314	0.2314
	Qp	0.1049	0.3498	0.4197	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3103	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1125	0.0000	0.1349	0.0000	0.0771	0.0771	0.0771	0.0771	0.0771	0.0771	0.0771	0.0771	0.0771
Índice de Estabilidad	I	0.1994	0.2393	0.2393	0.1794	0.0528	0.0528	0.0000	0.0000	0.0000	0.1039	0.1021	0.0175	0.1397	0.1397	0.1397	0.2873	0.2873	0.2873	0.0071	0.0084	0.0084	0.0084	0.0084	0.0084	0.0084	0.0084	0.0520
	LE	0.0399	0.0000	0.0000	0.0598	0.0302	0.0302	0.0000	0.0000	0.0000	0.0368	0.0414	0.0495	0.0495	0.0495	0.0495	0.0000	0.0000	0.0000	0.0195	0.0207	0.0207	0.0207	0.0207	0.0207	0.0207	0.0207	0.0184
	E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0115	0.0115	0.0000	0.0000	0.0000	0.0196	0.0168	0.0932	0.0263	0.0263	0.0263	0.0000	0.0000	0.0000	0.0537	0.0511	0.0511	0.0511	0.0511	0.0511	0.0511	0.0511	0.0098
Índice de Saturación	Se	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0108	0.0000	0.0343	0.0276	0.0343	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3031	0.0000	0.0000	0.0608	0.0608	0.0608	0.0608	0.0608	0.0608	0.0608	0.0608	0.0597
	H	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0203	0.0000	0.0968	0.0760	0.0968	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3031	0.0000	0.0215	0.0215	0.0215	0.0215	0.0215	0.0215	0.0215	0.0215	0.0242
	Sa	0.1634	0.1634	0.1634	0.1634	0.0573	0.0884	0.1823	0.2098	0.1823	0.0000	0.0000	0.0000	0.2282	0.2282	0.2282	0.0000	0.0000	0.3031	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0098
NDVI	VB	0.0785	0.0872	0.1047	0.1047	0.1212	0.1212	0.2104	0.2035	0.0000	0.3408	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1938	0.1938	0.1938	0.1938	0.1938	0.1938	0.1938	0.1938	0.1938
	VM	0.0262	0.0174	0.0000	0.0000	0.0491	0.0491	0.0839	0.0825	0.0000	0.0000	0.2272	0.0568	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0786	0.0786	0.0786	0.0786	0.0786	0.0786	0.0786	0.0786	0.0786
	VA	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0199	0.0199	0.0251	0.0335	0.3195	0.0000	0.1136	0.2840	0.0000	0.0000	0.0000	0.0736	0.0736	0.0736	0.0319	0.0319	0.0319	0.0319	0.0319	0.0319	0.0319	0.0319	0.0319
Condiciones Socioeconómicas	DP	0.0000	0.0000	0.0000	0.0459	0.1298	0.1298	0.0589	0.0589	0.0589	0.0617	0.0617	0.0617	0.3364	0.3364	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0408	0.0408	0.0408	0.0408	0.0408	0.0408	0.0408	0.0408	0.0408
	IM	0.0459	0.0459	0.0459	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3364	0.0000	0.0000	0.0000	0.0148	0.0148	0.0148	0.0148	0.0148	0.0148	0.0148	0.0148	0.0148
	IVS	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054
Alternativas	S01	0.0031	0.0031	0.0040	0.0020	0.0038	0.0070	0.0022	0.0063	0.0004	0.0010	0.0129	0.0182	0.0004	0.0064	0.0047	0.0063	0.0058	0.0065	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S02	0.0026	0.0021	0.0027	0.0031	0.0033	0.0061	0.0003	0.0012	0.0021	0.0067	0.0027	0.0041	0.0042	0.0019	0.0025	0.0222	0.0058	0.0065	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S03	0.0034	0.0033	0.0036	0.0029	0.0049	0.0048	0.0031	0.0048	0.0018	0.0020	0.0040	0.0028	0.0002	0.0033	0.0025	0.0034	0.0068	0.0063	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S04	0.0033	0.0031	0.0034	0.0046	0.0044	0.0015	0.0004	0.0012	0.0036	0.0069	0.0020	0.0012	0.0005	0.0007	0.0007	0.0027	0.0068	0.0062	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S05	0.0035	0.0034	0.0032	0.0032	0.0054	0.0021	0.0033	0.0022	0.0082	0.0048	0.0012	0.0007	0.0027	0.0018	0.0019	0.0038	0.0061	0.0055	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S06	0.0038	0.0039	0.0035	0.0020	0.0044	0.0033	0.0018	0.0015	0.0053	0.0059	0.0014	0.0009	0.0026	0.0014	0.0016	0.0082	0.0056	0.0067	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S07	0.0037	0.0043	0.0034	0.0049	0.0051	0.0042	0.0087	0.0048	0.0072	0.0025	0.0022	0.0010	0.0135	0.0100	0.0109	0.0016	0.0070	0.0057	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	S08	0.0036	0.0039	0.0033	0.0045	0.0042	0.0064	0.0114	0.0092	0.0027	0.0014	0.0047	0.0023	0.0174	0.0162	0.0167	0.0022	0.0064	0.0069	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

A partir de la Supermatriz Ponderada, se obtuvo la Supermatriz Límite, la cual es aquella en la que todos los valores de cada columna son iguales, por lo tanto se multiplicó a la Supermatriz Ponderada por ella misma cuantas veces fue necesario para obtener el valor buscado. Para esta investigación, la Supermatriz Límite se obtuvo en la cuarta multiplicación, ver Cuadros 6.20 a 6.23.



Cuadro 6.20. Obtención del primer producto de la Supermatriz Límite a partir de la Supermatriz Ponderada

SUPERMATRIZ LÍMITE PRIMER PRODUCTO		Morfometría				Hidrología		Índice de Estabilidad			Índice de Saturación			NDVI			Condiciones Socioeconómicas			Alternativas							
		Dd	Dh	Rbm	IH	E	Qp	I	LE	E	Se	H	Sa	VB	VM	VA	DP	IM	IVS	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08
Morfometría	Dd	0.1446	0.1231	0.1178	0.1565	0.0358	0.0363	0.0810	0.0815	0.0746	0.0977	0.1189	0.1214	0.1107	0.1107	0.0843	0.0823	0.0430	0.0675	0.1143	0.1142	0.1142	0.1142	0.1142	0.1142	0.1142	0.1109
	Dh	0.0623	0.0657	0.0663	0.0592	0.0133	0.0123	0.0448	0.0439	0.0551	0.0506	0.0519	0.0553	0.0247	0.0247	0.0373	0.0304	0.0606	0.0391	0.0478	0.0478	0.0478	0.0478	0.0478	0.0478	0.0478	0.0494
	Rbm	0.0204	0.0433	0.0494	0.0097	0.0049	0.0053	0.0061	0.0065	0.0034	0.0345	0.0060	0.0018	0.0087	0.0087	0.0249	0.0102	0.0221	0.0147	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0114
	IH	0.0251	0.0205	0.0190	0.0270	0.0018	0.0020	0.0120	0.0121	0.0109	0.0138	0.0197	0.0182	0.0093	0.0093	0.0070	0.0111	0.0083	0.0126	0.0170	0.0170	0.0170	0.0170	0.0170	0.0170	0.0170	0.0174
Hidrología	E	0.1099	0.1099	0.1099	0.1161	0.2105	0.1818	0.1514	0.1691	0.1349	0.1116	0.0754	0.0684	0.1735	0.1735	0.1221	0.1085	0.1883	0.1656	0.0923	0.0923	0.0923	0.0923	0.0923	0.0923	0.0923	0.0926
	Qp	0.0083	0.0083	0.0083	0.0021	0.0768	0.1054	0.0435	0.0258	0.0600	0.0125	0.0487	0.0557	0.0201	0.0201	0.0716	0.1220	0.0423	0.0649	0.0569	0.0569	0.0569	0.0569	0.0569	0.0569	0.0569	0.0566
Índice de Estabilidad	I	0.0532	0.0532	0.0532	0.0532	0.1637	0.1654	0.1113	0.1065	0.1086	0.1011	0.1050	0.1027	0.1223	0.1223	0.1234	0.0795	0.0812	0.0595	0.1178	0.1178	0.1178	0.1178	0.1178	0.1178	0.1178	0.1179
	LE	0.0265	0.0265	0.0265	0.0265	0.0295	0.0255	0.0378	0.0404	0.0401	0.0307	0.0268	0.0290	0.0166	0.0166	0.0155	0.0259	0.0252	0.0238	0.0317	0.0317	0.0317	0.0317	0.0317	0.0317	0.0317	0.0317
	E	0.0241	0.0241	0.0241	0.0240	0.0125	0.0148	0.0308	0.0330	0.0312	0.0141	0.0140	0.0141	0.0240	0.0240	0.0240	0.0119	0.0109	0.0341	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.0142	0.0140
Índice de Saturación	Se	0.0130	0.0106	0.0098	0.0279	0.0445	0.0445	0.0216	0.0216	0.0216	0.0258	0.0292	0.0291	0.1128	0.1128	0.0096	0.0144	0.0129	0.0144	0.0175	0.0175	0.0175	0.0175	0.0175	0.0175	0.0175	0.0175
	H	0.0432	0.0391	0.0377	0.0310	0.0093	0.0093	0.0042	0.0042	0.0042	0.0154	0.0217	0.0215	0.0231	0.0231	0.1228	0.0316	0.0289	0.0317	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165	0.0166
	Sa	0.0962	0.1027	0.1049	0.0935	0.1373	0.1373	0.1003	0.1003	0.1003	0.1514	0.1419	0.1421	0.0583	0.0583	0.0618	0.1021	0.1063	0.1021	0.1312	0.1312	0.1312	0.1312	0.1312	0.1312	0.1312	0.1312
NDVI	VB	0.1062	0.1065	0.1065	0.1061	0.0664	0.0646	0.0482	0.0445	0.0468	0.0805	0.0819	0.0657	0.0669	0.0669	0.0669	0.2017	0.0992	0.0997	0.0767	0.0773	0.0773	0.0773	0.0773	0.0773	0.0773	0.0856
	VM	0.0521	0.0521	0.0521	0.0520	0.0273	0.0226	0.0446	0.0428	0.0460	0.0320	0.0314	0.0250	0.0387	0.0387	0.0387	0.0386	0.1067	0.0545	0.0257	0.0259	0.0259	0.0259	0.0259	0.0259	0.0259	0.0299
	VA	0.0653	0.0650	0.0650	0.0655	0.0353	0.0418	0.0715	0.0770	0.0715	0.0218	0.0210	0.0436	0.1067	0.1067	0.1067	0.0115	0.0459	0.0976	0.0343	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0212
Condiciones Socioeconómicas	DP	0.1149	0.1149	0.1149	0.1149	0.0724	0.0714	0.1424	0.1391	0.0429	0.1656	0.1274	0.0703	0.0432	0.0432	0.0431	0.0552	0.0552	0.0552	0.1427	0.1427	0.1427	0.1427	0.1427	0.1427	0.1427	0.1427
	IM	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0258	0.0268	0.0133	0.0165	0.1128	0.0049	0.0431	0.1002	0.0035	0.0035	0.0036	0.0324	0.0324	0.0324	0.0173	0.0173	0.0173	0.0173	0.0173	0.0173	0.0173	0.0173
	IVS	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Alternativas	S01	0.0060	0.0066	0.0067	0.0057	0.0043	0.0047	0.0067	0.0069	0.0075	0.0035	0.0043	0.0040	0.0075	0.0075	0.0077	0.0023	0.0063	0.0075	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0038
	S02	0.0031	0.0038	0.0040	0.0037	0.0051	0.0051	0.0045	0.0045	0.0042	0.0050	0.0034	0.0037	0.0091	0.0091	0.0039	0.0031	0.0023	0.0023	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0042
	S03	0.0037	0.0036	0.0036	0.0035	0.0028	0.0028	0.0027	0.0027	0.0032	0.0026	0.0036	0.0034	0.0033	0.0033	0.0044	0.0028	0.0035	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0032
	S04	0.0022	0.0015	0.0013	0.0024	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0021	0.0013	0.0022	0.0025	0.0021	0.0021	0.0032	0.0034	0.0015	0.0016	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0026
	S05	0.0033	0.0026	0.0023	0.0036	0.0030	0.0029	0.0027	0.0026	0.0025	0.0027	0.0034	0.0038	0.0030	0.0030	0.0035	0.0038	0.0023	0.0025	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0035
	S06	0.0028	0.0026	0.0025	0.0031	0.0035	0.0034	0.0028	0.0028	0.0027	0.0032	0.0031	0.0034	0.0042	0.0042	0.0032	0.0036	0.0021	0.0021	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0035
	S07	0.0058	0.0058	0.0058	0.0056	0.0052	0.0051	0.0058	0.0057	0.0053	0.0076	0.0068	0.0068	0.0032	0.0032	0.0050	0.0053	0.0051	0.0049	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0069
	S08	0.0071	0.0077	0.0079	0.0067	0.0064	0.0063	0.0076	0.0075	0.0075	0.0100	0.0090	0.0083	0.0041	0.0041	0.0058	0.0060	0.0073	0.0063	0.0080	0.0081	0.0081	0.0081	0.0081	0.0081	0.0081	0.0084



Cuadro 6.21. Obtención del segundo producto de la Supermatriz Límite a partir de la Supermatriz Ponderada

SUPERMATRIZ LÍMITE SEGUNDO PRODUCTO		Morfometría				Hidrología		Índice de Estabilidad			Índice de Saturación			NDVI			Condiciones Socioeconómicas			Alternativas									
		Dd	Dh	Rbm	IH	E	Qp	I	LE	E	Se	H	Sa	VB	VM	VA	DP	IM	IVS	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08		
Morfometría	Dd	0.1019	0.1012	0.1011	0.1019	0.0809	0.0807	0.0886	0.0883	0.0845	0.0977	0.0970	0.0942	0.0909	0.0909	0.0924	0.0909	0.0890	0.0881	0.0952	0.0952	0.0952	0.0952	0.0952	0.0952	0.0952	0.0952	0.0955	
	Dh	0.0421	0.0423	0.0423	0.0420	0.0359	0.0360	0.0386	0.0388	0.0417	0.0419	0.0429	0.0449	0.0398	0.0398	0.0400	0.0363	0.0369	0.0377	0.0412	0.0412	0.0412	0.0412	0.0412	0.0412	0.0412	0.0412	0.0411	
	Rbm	0.0135	0.0142	0.0143	0.0135	0.0094	0.0095	0.0117	0.0118	0.0130	0.0124	0.0122	0.0132	0.0143	0.0143	0.0122	0.0103	0.0119	0.0119	0.0117	0.0117	0.0117	0.0117	0.0117	0.0117	0.0117	0.0117	0.0115	
	IH	0.0140	0.0138	0.0138	0.0140	0.0103	0.0103	0.0118	0.0117	0.0114	0.0136	0.0137	0.0135	0.0119	0.0119	0.0124	0.0114	0.0111	0.0111	0.0132	0.0132	0.0132	0.0132	0.0132	0.0132	0.0132	0.0132	0.0132	
Hidrología	E	0.1307	0.1306	0.1305	0.1315	0.1473	0.1461	0.1387	0.1392	0.1462	0.1286	0.1308	0.1341	0.1401	0.1401	0.1348	0.1469	0.1473	0.1437	0.1320	0.1320	0.1320	0.1320	0.1320	0.1320	0.1320	0.1320	0.1326	
	Qp	0.0472	0.0473	0.0474	0.0464	0.0582	0.0594	0.0580	0.0575	0.0505	0.0533	0.0510	0.0478	0.0469	0.0469	0.0522	0.0500	0.0496	0.0532	0.0544	0.0543	0.0543	0.0543	0.0543	0.0543	0.0543	0.0543	0.0537	
Índice de Estabilidad	I	0.1005	0.1005	0.1005	0.1004	0.1199	0.1200	0.1090	0.1090	0.1092	0.1009	0.1010	0.1011	0.1118	0.1118	0.1123	0.1147	0.1146	0.1146	0.1034	0.1034	0.1034	0.1034	0.1034	0.1034	0.1034	0.1034	0.1033	
	LE	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0288	0.0287	0.0278	0.0279	0.0277	0.0278	0.0276	0.0275	0.0275	0.0275	0.0269	0.0260	0.0263	0.0262	0.0278	0.0278	0.0278	0.0278	0.0278	0.0278	0.0278	0.0278	0.0278	
	E	0.0202	0.0202	0.0202	0.0202	0.0189	0.0190	0.0197	0.0197	0.0196	0.0194	0.0194	0.0194	0.0201	0.0201	0.0202	0.0196	0.0195	0.0195	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	
Índice de Saturación	Se	0.0361	0.0360	0.0359	0.0361	0.0362	0.0355	0.0321	0.0315	0.0319	0.0327	0.0329	0.0305	0.0337	0.0337	0.0339	0.0478	0.0441	0.0389	0.0323	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0324	0.0336	
	H	0.0309	0.0308	0.0307	0.0308	0.0198	0.0204	0.0274	0.0279	0.0271	0.0249	0.0248	0.0269	0.0300	0.0300	0.0305	0.0214	0.0246	0.0299	0.0254	0.0253	0.0253	0.0253	0.0253	0.0253	0.0253	0.0241		
	Sa	0.1027	0.1029	0.1030	0.1028	0.1152	0.1152	0.1075	0.1075	0.1079	0.1088	0.1088	0.1091	0.1089	0.1089	0.1081	0.1055	0.1060	0.1059	0.1083	0.1083	0.1083	0.1083	0.1083	0.1083	0.1083	0.1083	0.1083	
NDVI	VB	0.0913	0.0912	0.0912	0.0914	0.0764	0.0763	0.0891	0.0888	0.0789	0.0951	0.0912	0.0853	0.0778	0.0778	0.0778	0.0790	0.0791	0.0790	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915	
	VM	0.0392	0.0391	0.0391	0.0392	0.0361	0.0360	0.0382	0.0385	0.0449	0.0382	0.0407	0.0446	0.0375	0.0375	0.0372	0.0381	0.0384	0.0384	0.0389	0.0389	0.0389	0.0389	0.0389	0.0389	0.0389	0.0389	0.0389	
	VA	0.0599	0.0601	0.0601	0.0598	0.0531	0.0533	0.0554	0.0555	0.0590	0.0529	0.0543	0.0563	0.0587	0.0587	0.0590	0.0616	0.0611	0.0612	0.0544	0.0544	0.0544	0.0544	0.0544	0.0544	0.0544	0.0544	0.0544	
Condiciones Socioeconómicas	DP	0.0852	0.0847	0.0846	0.0859	0.0890	0.0887	0.0849	0.0847	0.0848	0.0881	0.0887	0.0887	0.0951	0.0951	0.0909	0.0811	0.0809	0.0789	0.0884	0.0884	0.0884	0.0884	0.0884	0.0884	0.0884	0.0884	0.0884	
	IM	0.0237	0.0242	0.0243	0.0230	0.0302	0.0304	0.0273	0.0275	0.0273	0.0293	0.0287	0.0287	0.0200	0.0200	0.0242	0.0249	0.0250	0.0270	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	
	IVS	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	
Alternativas	S01	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0052	0.0052	0.0053	0.0053	0.0057	0.0051	0.0052	0.0055	0.0055	0.0055	0.0056	0.0056	0.0056	0.0052	0.0052	0.0052	0.0052	0.0052	0.0052	0.0052	0.0052	0.0052	0.0052	
	S02	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0048	0.0047	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0.0043	0.0048	0.0048	0.0046	0.0053	0.0052	0.0049	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	
	S03	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0031	0.0031	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
	S04	0.0024	0.0023	0.0023	0.0024	0.0023	0.0023	0.0024	0.0024	0.0022	0.0024	0.0023	0.0022	0.0023	0.0023	0.0023	0.0022	0.0023	0.0023	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	
	S05	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0031	0.0031	0.0032	0.0032	0.0030	0.0032	0.0032	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
	S06	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0031	0.0033	0.0032	0.0031	0.0033	0.0033	0.0032	0.0034	0.0034	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033
	S07	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0055	0.0056	0.0055	0.0055	0.0054	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	0.0055	0.0051	0.0052	0.0053	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055
	S08	0.0067	0.0067	0.0067	0.0067	0.0070	0.0070	0.0068	0.0068	0.0069	0.0069	0.0069	0.0071	0.0070	0.0070	0.0069	0.0065	0.0066	0.0066	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	



Cuadro 6.22. Obtención del tercer producto de la Supermatriz Límite a partir de la Supermatriz Ponderada

SUPERMATRIZ LÍMITE TERCER PRODUCTO		Morfometría				Hidrología		Índice de Estabilidad			Índice de Saturación			NDVI			Condiciones Socioeconómicas			Alternativas								
		Dd	Dh	Rbm	IH	E	Qp	I	LE	E	Se	H	Sa	VB	VM	VA	DP	IM	IVS	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	
Morfometría	Dd	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915	0.0907	0.0907	0.0910	0.0910	0.0910	0.0913	0.0913	0.0913	0.0912	0.0912	0.0912	0.0911	0.0911	0.0910	0.0912	0.0912	0.0912	0.0912	0.0912	0.0912	0.0912	0.0912	0.0912
	Dh	0.0398	0.0398	0.0398	0.0398	0.0396	0.0396	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397
	Rbm	0.0121	0.0121	0.0121	0.0121	0.0119	0.0119	0.0120	0.0120	0.0120	0.0121	0.0121	0.0121	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0121	0.0121	0.0121	0.0121	0.0121	0.0121	0.0121	0.0121	0.0121
	IH	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0121	0.0121	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122
Hidrología	E	0.1385	0.1385	0.1385	0.1385	0.1391	0.1391	0.1389	0.1389	0.1389	0.1387	0.1387	0.1387	0.1387	0.1387	0.1387	0.1387	0.1387	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388
	Qp	0.0518	0.0518	0.0518	0.0518	0.0523	0.0523	0.0521	0.0521	0.0521	0.0518	0.0518	0.0518	0.0521	0.0521	0.0521	0.0522	0.0522	0.0522	0.0519	0.0519	0.0519	0.0519	0.0519	0.0519	0.0519	0.0519	0.0519
Índice de Estabilidad	I	0.1091	0.1091	0.1091	0.1091	0.1097	0.1097	0.1095	0.1095	0.1095	0.1093	0.1093	0.1093	0.1093	0.1093	0.1093	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094
	LE	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0275	0.0275	0.0275	0.0275	0.0275	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0275	0.0275	0.0275	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274
	E	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0197	0.0197	0.0197	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197	0.0197
Índice de Saturación	Se	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0354	0.0354	0.0354	0.0353	0.0353	0.0353	0.0352	0.0352	0.0352	0.0354	0.0354	0.0354	0.0354	0.0354	0.0354	0.0354	0.0354	0.0354
	H	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0259	0.0259	0.0261	0.0261	0.0261	0.0262	0.0262	0.0262	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262
	Sa	0.1084	0.1084	0.1084	0.1084	0.1087	0.1087	0.1086	0.1086	0.1086	0.1084	0.1084	0.1084	0.1085	0.1085	0.1085	0.1086	0.1086	0.1086	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085
NDVI	VB	0.0837	0.0837	0.0837	0.0837	0.0834	0.0834	0.0835	0.0835	0.0835	0.0836	0.0836	0.0836	0.0837	0.0837	0.0837	0.0837	0.0836	0.0836	0.0835	0.0835	0.0835	0.0835	0.0835	0.0835	0.0835	0.0835	0.0835
	VM	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387
	VA	0.0571	0.0571	0.0571	0.0571	0.0569	0.0569	0.0570	0.0570	0.0570	0.0571	0.0571	0.0571	0.0570	0.0570	0.0570	0.0569	0.0569	0.0569	0.0571	0.0571	0.0571	0.0571	0.0571	0.0571	0.0571	0.0571	0.0571
Condiciones Socioeconómicas	DP	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0875	0.0875	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0875	0.0875	0.0875	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876
	IM	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0264	0.0264	0.0262	0.0262	0.0263	0.0261	0.0261	0.0261	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262
	IVS	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Alternativas	S01	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054
	S02	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047
	S03	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
	S04	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023
	S05	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031
	S06	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033
	S07	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055
	S08	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069

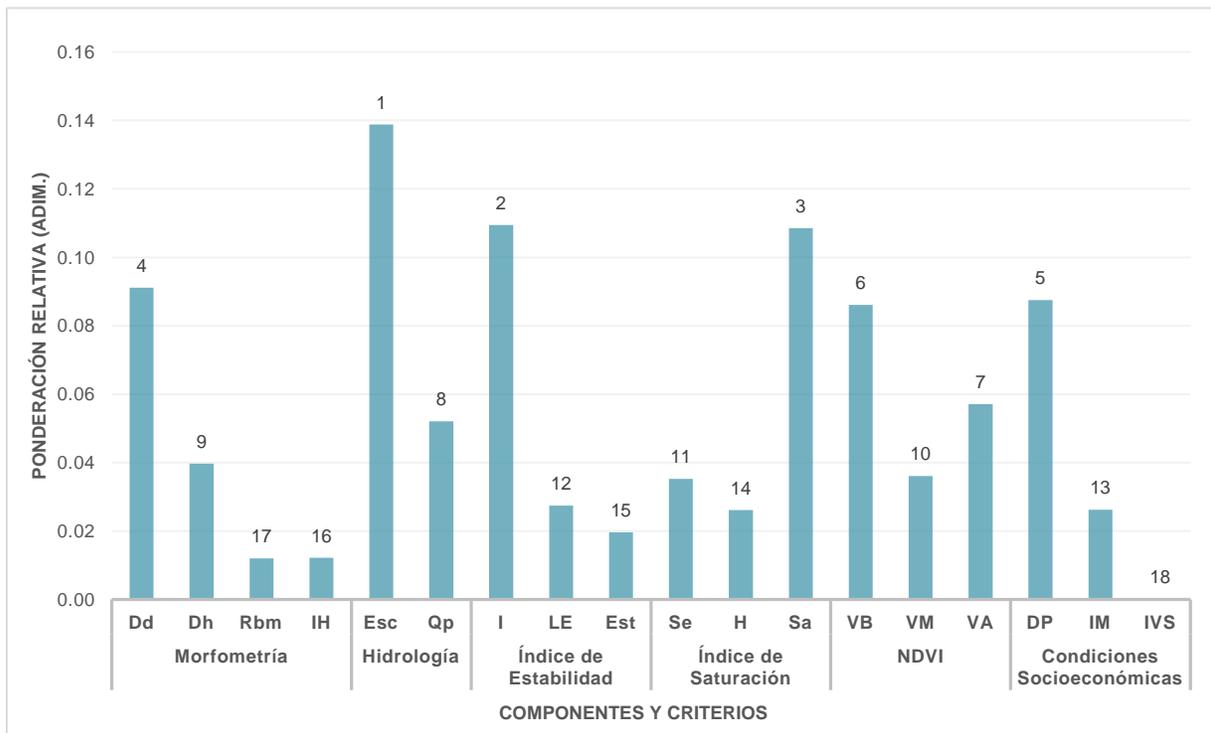


**Cuadro 6.23. Obtención del cuarto y último producto de la Supermatriz Límite a partir de la Supermatriz Ponderada**

SUPERMATRIZ LÍMITE CUARTO PRODUCTO		Morfometría				Hidrología		Índice de Estabilidad			Índice de Saturación			NDVI			Condiciones Socioeconómicas			Alternativas							
		Dd	Dh	Rbm	IH	E	Qp	I	LE	E	Se	H	Sa	VB	VM	VA	DP	IM	IVS	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08
Morfometría	Dd	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911	0.0911
	Dh	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397	0.0397
	Rbm	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120
	IH	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122
Hidrología	E	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388
	Qp	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521	0.0521
Índice de Estabilidad	I	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094	0.1094
	LE	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274	0.0274
	E	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196
Índice de Saturación	Se	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353	0.0353
	H	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261	0.0261
	Sa	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085	0.1085
NDVI	VB	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836	0.0836
	VM	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387
	VA	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570
Condiciones Socioeconómicas	DP	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876
	IM	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263
	IVS	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Alternativas	S01	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054
	S02	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047
	S03	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
	S04	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023
	S05	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031
	S06	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033	0.0033
	S07	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055
	S08	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069

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; 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.



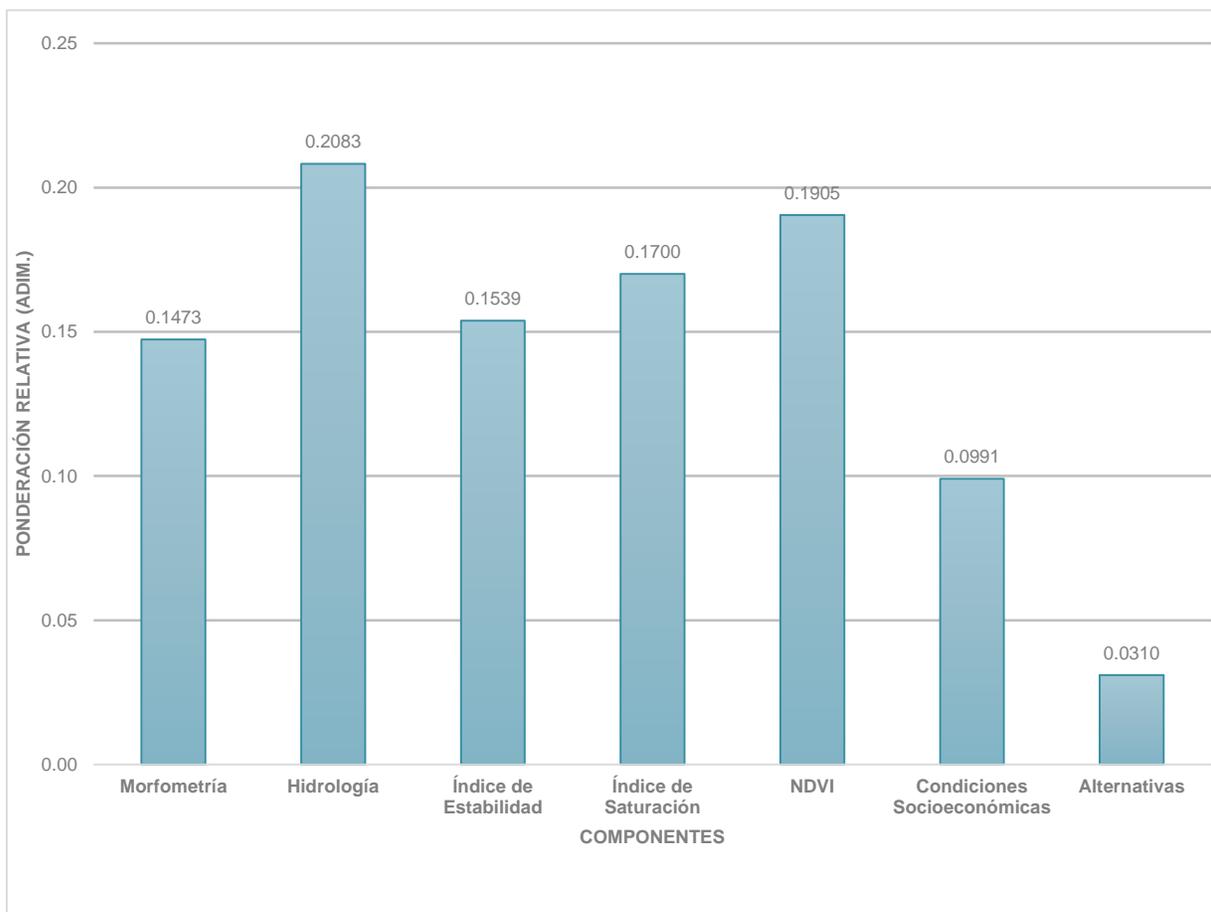
Nota: los valores sobre la barra indican la prioridad de la variable o criterio

**Figura 6.5. Prioridad o importancia de las variables dentro de la cuenca de estudio**

De acuerdo con la Figura 6.5, la variable que más influye en el proceso de decisión llevado a cabo es el Esguerrimiento Superficial (Esc), seguida de la Inestabilidad de Laderas (I) y la Saturación del Suelo (Sa).

Puede verse que las primeras cinco variables incluyen casi todos los componentes excepto la cobertura vegetal; esto permite identificar las variables que tienen más influencia en el proceso de degradación de las subcuencas, permitiendo obviar aquellas que no tienen relevancia dentro del proceso o que su importancia es de menor impacto. En este estudio, las variables como Relación de Bifurcación Media ( $Rb_m$ ), Integral Hipsométrica (IH), Estable (Est.) y el Índice de Vulnerabilidad Social (IVS) son variables que tienen poca influencia sobre los procesos que ocurren en la cuenca, por lo tanto pueden eliminarse para la elaboración de planes de acción.

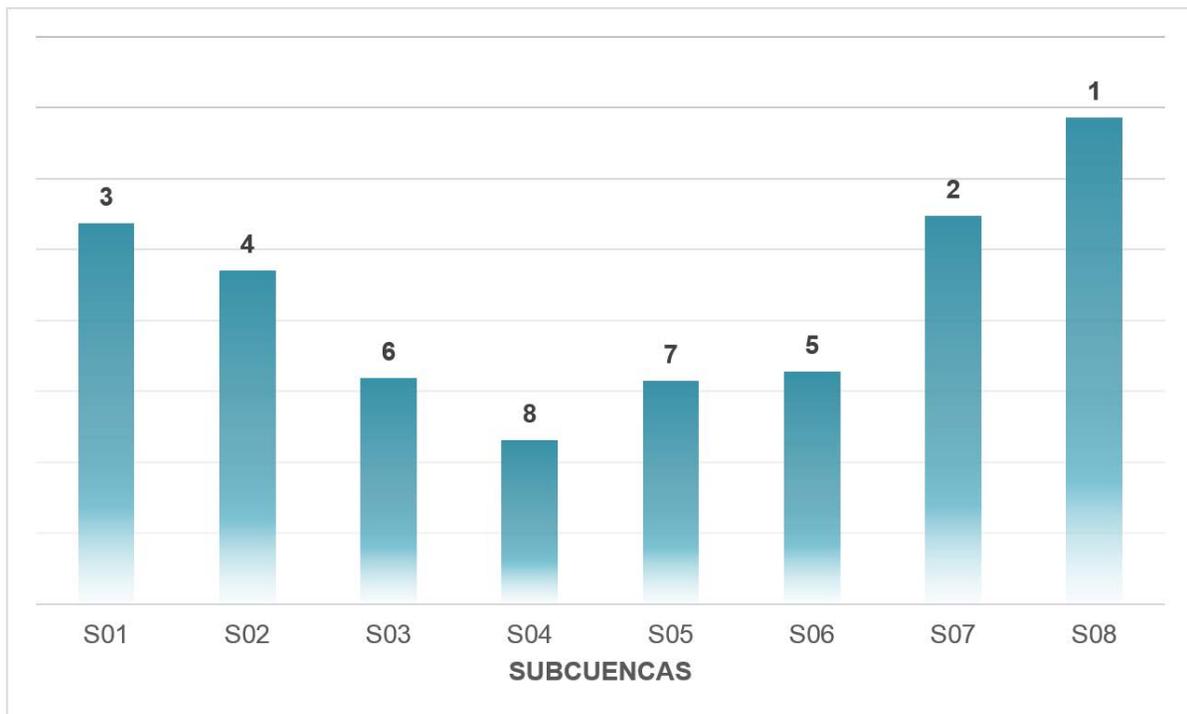
Esta información permite identificar hacia donde deben dirigirse las acciones para mitigar los procesos de degradación de los recursos naturales y las necesidades de restauración hidrológica, haciendo énfasis en aquellas que estén estrechamente relacionadas con la disminución de la velocidad erosiva de los escurrimientos, la concentración y transporte del mismo, así como la estabilidad de las laderas.



**Figura 6.6.** *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 6.6, 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.

Cabe mencionar que estos valores corresponden a las condiciones que prevalecen en la cuenca ya que el relieve juega un papel importante para la generación del escurrimiento al existir pendientes escarpadas que incrementan la velocidad del mismo y generar procesos de remoción en masas al combinarse con las altas precipitaciones que se presentan en la región. Esto provoca un exceso de humedad en los suelos, que ocasiona la saturación de los poros y la fragilidad del suelo que termina por deslizarse sobre las laderas, modificando la morfometría tanto del sistema de drenaje como de la cuenca.



**Figura 6.7.** *Priorización de subcuencas con base en el Proceso Analítico en Red*

La Figura 6.7 muestra la priorización de subcuencas obtenida a partir de la aplicación del modelo ANP. Se observa que la subcuenca prioritaria es la número ocho, seguida de la número siete.

Los resultados obtenidos confirman que la aplicación del modelo ANP es una herramienta que puede aplicarse para la priorización de áreas de drenaje a distintos niveles de intervención, siempre que se tomen en consideración aquellos componentes y variables que tienen influencia sobre la finalidad para la que se pretende aplicar el modelo (definición de la función objetivo).

Los componentes utilizados permitieron identificar las áreas con problemas de degradación de los recursos naturales y con el crecimiento del sistema de drenaje, lo cual fue resultado del conocimiento del área de estudio. Esto es importante ya que permite elaborar la matriz de comparaciones pareadas de forma correcta, lo cual se refleja en el resultado obtenido. Para mejorar la precisión del resultado, Liou *et al.*, (2014) propusieron una combinación de modelos para definir una solución que permita resolver el objetivo que se busca, de esta forma recomiendan el uso de DEMATEL con ANP, modelo conocido como DANP, y posteriormente se emplee VIKOR para identificar la propuesta de solución que mejores resultados presente.

La Figura 6.8 muestra la priorización de subcuencas de forma espacial, donde se observa que la subcuenca prioritaria corresponde a la ocho, ubicada en la parte alta de la cuenca, seguida de la subcuenca siete como la de prioridad dos, ubicada también en la parte alta. En estas áreas, los procesos de degradación son fuertes debido al relieve y al cambio de uso del suelo que han realizado los habitantes de esa zona, principalmente por los cultivos establecidos en laderas con pendientes mayores al 30%.

Son pocos los estudios que se han realizado donde se utilice el análisis multicriterio para la priorización de áreas de drenaje, algunos autores han realizado aproximaciones al respecto, pero éstas se han limitado a la aplicación de dos o tres componentes, con variables generales, como las condiciones ecológicas o las políticas públicas aplicadas, pero no aspectos que tienen una influencia directa sobre las condiciones de relieve y procesos de degradación.

Goicoechea (1977), en su tesis doctoral, realizó un estudio para recuperar y aplicar un manejo adecuado de la región Black Mesa en el Norte de Arizona, mediante el análisis multicriterio de los componentes como producción ganadera, incremento del escurrimiento superficial, producción de cultivos de alto rendimiento, control de las tasas de sedimentos y producción acuícola. Determinó que el conocimiento de la región y las condiciones en las que se desarrollan los procesos fueron factores clave para lograr priorizar los componentes evaluados.

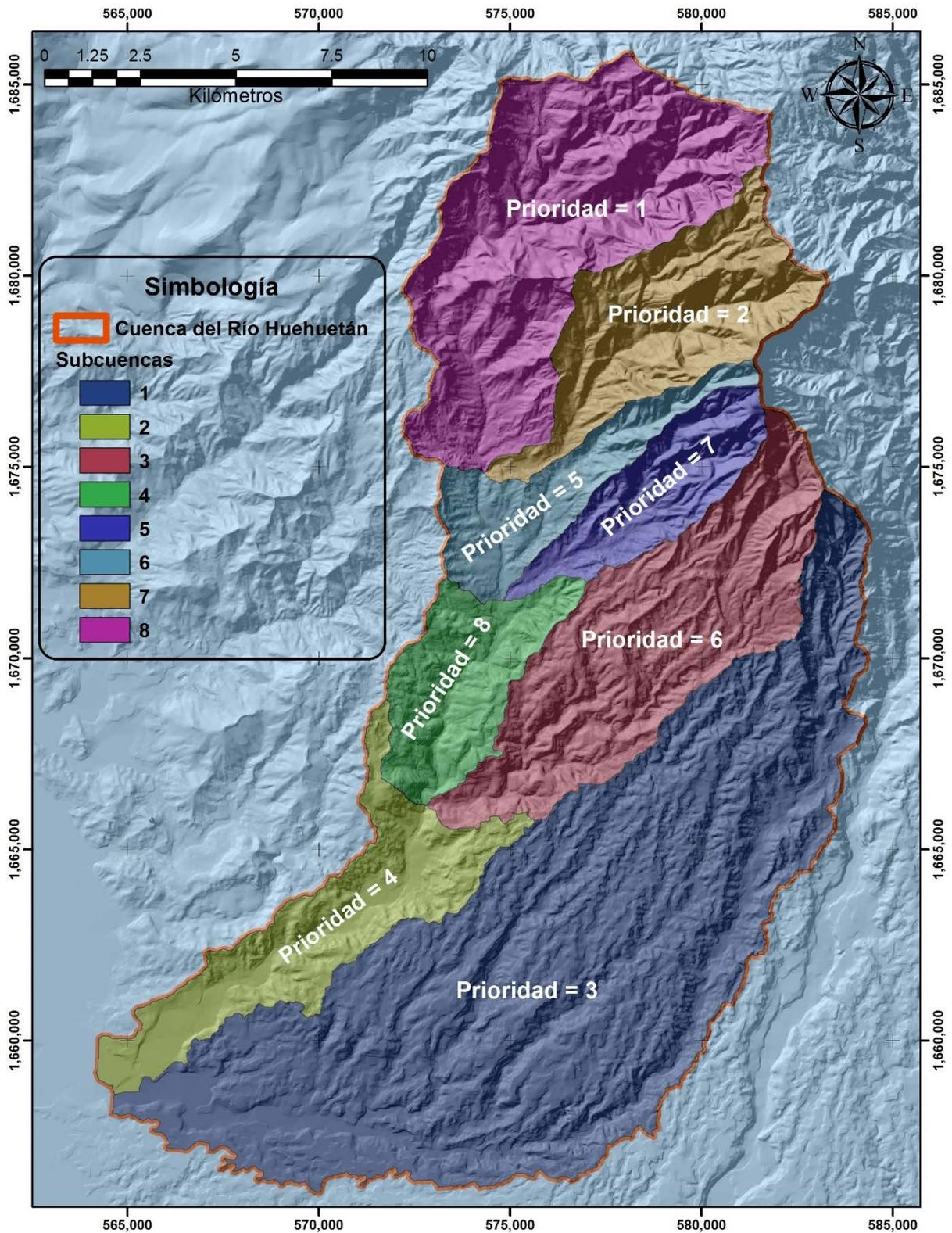


Figura 6.8. Mapa de priorización de subcuencas con base en la aplicación del Proceso Analítico en Red

Chen *et al.*, (2010) realizaron una evaluación de planes de manejo de cuencas mediante el análisis multicriterio usando un modelo híbrido entre DEMATEL y ANP; tomaron en consideración cuatro componentes (manejo de la cuenca y control de la erosión, restauración ecológica, manejo del medio ambiente y conservación del medio ambiente) y quince criterios. Encontraron que el modelo ANP es más preciso que el modelo AHP cuando se busca realizar estudios donde existe retroalimentación e influencia entre componentes y criterios (variables) y propusieron las líneas de acción posibles en función de los valores obtenidos para el área de estudio.

Srdjevic y Pinto-Medeiros (2008) utilizaron el modelo AHP para evaluar los planes de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Paraguacu en Brasil; combinaron la Lógica Difusa (fuzzy logic) con el Análisis Extendido (Extend Analysis) aplicado al modelo AHP y encontraron que los resultados no presentaron diferencia significativa. Para el estudio utilizaron cinco componentes (impacto de las políticas, problemas económicos, problemas sociales, medio ambiente y su entorno, criterios técnicos) y 24 criterios más.

Los componentes usados por Srdjevic y Pinto-Medeiros (2008) son similares a los utilizados en la presente investigación; sin embargo las metodologías cambian ligeramente ya que el modelo ANP es más preciso que el AHP al incorporar la influencia e interacción entre componentes y variables (Tzeng y Huang, 2011).

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 estas áreas.

## CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1. CONCLUSIONES

La priorización de áreas de drenaje en la cuenca del río Huehuetán está en función de los componentes de morfometría, hidrología, estabilidad de laderas, cobertura vegetal y condiciones socioeconómicas del trópico húmedo.

El análisis morfométrico e hipsométrico, son componentes que están asociados con los procesos hidrológicos en las unidades de drenaje, por lo tanto pueden ser utilizados de forma aislada o en conjunto para la priorización de áreas de drenaje.

El análisis del escurrimiento superficial por subcuencas, son indicadores de la capacidad de transporte de sedimentos y de los excesos de agua y tienen influencia en el sistema de drenaje y su crecimiento, por lo que el análisis permitió priorizar áreas en forma particular o integrada para su rehabilitación.

La ubicación espacial de áreas estables o inestables al movimiento en masa de los suelos en las laderas, así como el grado de saturación de los suelos, son fenómenos que permitieron definir las áreas susceptibles a los deslizamientos como factor importante en la priorización de áreas para la restauración hidrológica.

El análisis de la variación espacial y temporal de la cobertura vegetal permitió priorizar áreas a intervenir, identificando aquellas donde la cobertura vegetal alta ha disminuido considerablemente y se exponen los suelos a la degradación.

La priorización de estos 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.



## 7.2. RECOMENDACIONES

La priorización de áreas de drenaje para la restauración hidrológica ambiental de cuencas utilizando el modelo ANP se debe reforzar con la opinión de expertos, mediante la aplicación de cuestionarios para crear la Matriz de Dominación Interfactorial, que en combinación con los resultados obtenidos a partir de los estudios, se mejora la precisión de la Supermatriz Original.

Se requiere de la implementación de políticas públicas enfocadas hacia las necesidades identificadas en las áreas prioritarias, tomando en consideración las variables que más incidencia tienen sobre el proceso de degradación del suelo.

La priorización permite orientar la canalización de los recursos hacia las áreas en las que la inversión tendrá mayor impacto.

La elaboración de planes de manejo de cuencas debe tomar en consideración la importancia de los componentes y las variables que interactúan dentro del sistema cuenca y/o subcuenca. De esta forma, cada área de drenaje debe tener un plan de manejo acorde a la importancia de una variable sobre otra, en función de los valores encontrados durante la aplicación del modelo ANP.



## CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS

Abreu, R. U. 2001. Metodología de Priorización de Cuencas Hidrográficas. Selección de Cuencas. República Dominicana. 19 pp.

Aher, P. D., J. Adinarayana and S. D. Gorantiwar. 2013. Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through fuzzy analytical hierarchy process. *Agricultural Engineering International*, Vol. 15, No. 1, pp. 11-18.

Al-doski, J., S. B. Mansor, H. Z. M. Shafri. 2013. NDVI Differencing and Post-classification to Detect Vegetation Changes in Halabja City, Iraq. *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics*, Volume 1, Issue 2, pp. 01-10.

Aleotti, P. and Chowdhury, R. 1999. Landslide hazard assessment: summary and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Volume 58, Number 1, 21-44 pp.

Almulhim, T. S., L. Mikhailov and D.-L. Xu. 2012. Prioritization Method in the Fuzzy Analytic Network Process by Fuzzy Preferences Programming Method. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 6, pp. 11-22.

Anand-Raj, P. and D. Nagesh-Kumar. 1998. Ranking multi-criterion river basin planning alternatives using fuzzy numbers. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 100, pp. 89-99.

Anand-Raj, P. and D. Nagesh-Kumar. 1996. Ranking of river basin alternatives using ELECTRE. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45(5), pp. 697-713.

Aragonés-Beltrán, P., F. Chaparro-González, J.-P. Pastor-Ferrando and A. Pla-Rubio. 2014. *Energy*, 66: 222-238.

Arellano-Monterrosas, J. L. L. 2012. Vulnerabilidad y gestión de riesgos por deslizamientos e inundaciones en la cuenca superior del río Huehuetán, Chiapas. Tesis de Doctorado en Ciencias y Tecnología del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 521 pp.



- Aritazábal, E., Martínez, H. y Vélez, J. I. 2010. Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 34(131): 209-227.
- 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.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Hermel, R. D., van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N. and Jha, M. K. 2012. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 55(4): 1491-1508.
- 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.
- Ashari-Alias, M. S. Z. Mohd-Hashim and S. Samsudin. 2009. Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process for Southern Johor River Ranking. *International Journal of Soft Computing Applied*, Vol. 1, No. 1, pp. 62-76.
- Aznar-Bellver, J. y F. Guijarro-Martínez. 2012. Nuevos métodos de valoración: Modelos Multicriterio. Universidad Politécnica de Valencia, 2<sup>da</sup> Ed. 280 pp.
- Aznar-Bellver, J., J. Ferrís-Oñate y F. Guijarro-Martínez. 2010. La valoración de inmuebles urbanos mediante el proceso analítico en red. *Revista de Estudios Regionales* No. 87: 45-70 pp.
- Badar, B., Romshoo, S. A. and Khan, M. A. Integrating biophysical and socioeconomic information for prioritizing watersheds in a Kashmir Himalayan lake: a remote sensing and GIS approach. *Environ Monit Assess* 185: 6419-6445.
- Bagyaraj, M. and B. Gurugnanam. 2011. Significance of morphometry studies, soil characteristics, erosion phenomena and landform processes using remote sensing and GIS for Kodaikanal hills, a global biodiversity hotspot in Western Ghats, Dindigul District, Tamilnadu, South India. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 3(3): 221–233.



Barredo, J. I., Benavides A., Hervás, H. and Van Westen, C. J. 2000. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Titajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2, Issue 1, 9-23 pp.

Benavides-Mora V., Tarlé-Pisarra T. C. y Galbiatti J. A. Caracterización y clasificación de la red hidrográfica de la cuenca del río Bobo, departamento de Nariño, Colombia. *Ingeniería e Investigación*, Vol. 29, Núm. 3, pp. 97-101.

Benegas, L. y León J. 2009. Criterios para priorizar áreas de intervención en cuencas hidrográficas: la experiencia del Programa Focucenas II. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 52 pp.

Besalatpour, A., M. A. Hajabbasi, S. Ayoubi and A. Jalalian. 2012. Identification and prioritization of critical sub-basins in a highly mountainous watershed using SWAT model. *Eurasian Journal of Soil Science*, 1: 58-63.

Bischetti, G. B. and E. A. Chiaradia. 2010. Calibration of distributed shallow landslides models in forested landscapes. *Journal of Agricultural Engineering*, 3: 23-35.

Biswas, S., S. Sudhakar and V. R. Desai. 2002. Remote sensing and geographic information system based approach for watershed conservation. *Journal of Surveying Engineering, ASCE* 128(3): 108–124.

Bottani, E. and Rizzi, A. 2008. An adapted multi-criteria approach to suppliers and products selection-An application oriented to lead-time reduction. *International Journal of Production Economics*, Vol. 111, Issue 2, pp. 763-781.

Brunsdon, D. 2002. The fifth Glossop Lecture. Geomorphological roulette for engineers and planners: some insights into an old game. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35: 101-142.

Büyüközcan, G. and G. Çifçi. 2012. A novel MCDM approach based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and fuzzy TOPSIS to evaluate green suppliers. *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, pp. 3000-3011



Büyüközcan, G. and Ruan, D. 2008. Evaluation of software development projects using a fuzzy multi-criteria decision approach. *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 77, Issue 5-6, pp. 464-475.

Büyüközcan, G., O. Feyzioğlu and E. Nebol. 2008. Selection of the strategic alliance partner in logistics value chain, Vol. 113, Issue 1, pp. 148-158.

Calizaya, A., O. Meixner, L. Bengtsson and R. Berndtsson. 2010. Multi-criteria Decision Analysis (MCDA) for Integrated Water Resources Management (IWRM) in the Lake Poopo Basin, Bolivia. *Water Resource Management*, Vol. 24, pp. 2267-2289.

Carrera, A. M., Cardinali, M., Detti, R. Guzzetti, F. Pasqui, V. and Richenback, P. 1991. GIS Techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16: 427-445.

Chacón, J., Irigaray, C., Fernandez, T., El Hamdouni, R. 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Volume 65, Number 1, 341-411 pp.

Chen, V. Y.-C., H.-P. Lien, C.-H. Liu, J. J.-H. Liou, G.-H. Tzeng and L.-S. Yang. 2011. Fuzzy MCDM approach for selecting the best environment-watershed plan. *Applied Soft Computing*, Vol. 11, pp. 265-275.

Chen, Y.-C., H.-P. Lien and G.-H. Tzeng. 2010. Measures and evaluation for environment watershed plans using a novel hybrid MCDM model. *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, pp. 926-938.

Chiaradia, E. A., G. B. Bischetti and Ch. Vergani. 2012. Incorporating The Effect Of Root Systems Of Forest Species Into Spatially Distributed Models of Shallow Landslides. *International Journal of Forest, Soil and Erosion*, 2(3): 107-118.

Chirala, U., N. R. Kinthada and M. K. Gurram. 2012. Correlation of geomorphometric parameters for the hydrological characterization of Meghadrigedda watershed, Visakhapatnam, India – A GIS approach. *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 4, No. 07, pp. 3169-3183.



Chiu, W.-Y., G.-H. Tzeng and H.-L. Li. 2013. A new hybrid MCDM combining DANP with VIKOR to improve e-store business. *Knowledge-Based Systems*, Vol. 37, pp. 48-61.

Coehlo, A. C., J. W. Labadie y D. G. Fontane. 2012. Multicriteria Decision Support System for Regionalization of Integrated Water Resources Management. *Water Resources Management*, Vol. 26: 1325-1346 pp.

CORPONARIÑO. 2008. Clasificación y priorización de cuencas hidrográficas en el Departamento de Nariño. San Juan de Pasto, Colombia. 89 pp.

Crost, G. and Frattini, P. 2003. Distributed modeling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazard and Earth Systems Sciences*, 3: 81-93.

Cotler, H., Garrido, A., Bunge, V. y Cuevas Ma. L. 2010. Las cuencas hidrográficas de México: Priorización y toma de decisiones. En: *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*, Cotler, H. (Ed.). Instituto Nacional de Ecología, México. 232 pp.

Cruden, D. M. 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering and Geology*, Volume 43, Issue 1: 27-29.

Cruden, D. M. and Varnes, D. J. 1996. Landslides types and processes. In: *Landslides investigation and mitigations. Transportation Research Board Special Report 24* (Turner and Schuster Eds.), 36-75 pp.

Dai, F. C. and Lee, C. F. 2001. Frequency – volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology*, 59: 253-266.

Dietrich, W. E., Wilson, C. J., Montgomery, D. R. and McKean, J. 1993. Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model. *The Journal of Geology*, 101: 259-278.

Dietrich, W. E., Wilson, C. J., Montgomery, D. R. McKean, J. and Bauer, R. 1992. Erosion Thresholds and Land Surface Morphology. *Geology*, 20: 675-679.



Dietrich, W. E., Wilson, C. J. and Reneau, S. L. 1986. Hollows, colluvium, and landslides in soil-manted landscapes, chapter 17 in Hillslope Process, Edited by A. D. Abrahams, Allen & Unwin, Boston, 361-388 pp.

Docampo, L., B. G. de Bikuña, E. Rico y A. Rallo. 1989. Morfometría de las cuencas de la red hidrográfica de Bizkala (País Vasco, España).

Doerner, K. F., W. J. Gutjhar, R. F. Hartl, C. Strauss and C. Stummer. 2008. Omega, Vol. 36, Issue 6, pp. 1019-1037.

Dwivedi, S. Ch. 2011. Morphometric analysis of four sub-watersheds in Bah area of Agra District using remote sensing and GIS techniques. 12<sup>th</sup> ESRI India User Conference. Pp. 01-11.

El-Gammal, M. I.; R. R. Ali and R. M. Abou-Samra. 2014. NDVI Threshold Classification for Detecting Vegetation Cover in Damietta Governorate, Egypt. Journal of American Science, Vol. 10(8): 108 – 113 pp.

Fallas, J. y C. Valverde. 2008. Manejo y Priorización de Cuencas Hidrográficas. Principios, criterios e indicadores. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, 52 pp.

Fan M. and H. Shibata. 2014. Spatial and Temporal Analysis of Hydrological Provision Ecosystem Services for Watershed Conservation Planning of Water Resources. Water Resources Management, Vol. 28: 3619-3636 pp.

Faustino, J. 1986. Metodología para priorización de cuencas, subcuencas y microcuencas en conservación de suelos y aguas. En: Seminario Taller “Metodologías de priorización de cuencas”, Proyecto Regional de Manejo de Cuencas, CATIE. Panamá, 35-44.

García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen, adaptado para las condiciones de la República Mexicana. 3<sup>a</sup> Ed. Offset., Lario Ed. S. A. 252 pp.

García-Gómez, P. 2010. Una propuesta metodológica para la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico en la selección de aerogeneradores. Tesis Doctoral, Universidad Cardenal Herrera, Departamento de Economía y Empresa, 264 pp.



Geena, G. B. and P. N. Ballukraya. 2011. Morphometric analysis of Korattalaiyar River basin, Tamil Nadu, India: A GIS approach. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, Vol, 2, No. 2, pp. 383-391.

Giner-Pantoja, G., P. Aragonés-Beltrán and J. Niclós-Feragut. 2012. The application of the analytic network process to the assessment of best available techniques. *Journal of Cleaner Production* (25): 86-95.

Giner-Pantoja, G. 2010. Propuesta metodológica para la aplicación de AHP y ANP al proceso de toma decisiones asociado a la evaluación de la Autorización Ambiental Integrada. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Proyectos de Ingeniería, 350 pp.

Givarian, H., M. J. Gholizadeh-Baiee, and P. P. Khakbaz. 2012. Designing System of Ranking Voice of Customer in the Municipalities of Tehran. *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal*, Vol. 2, Issue 3, pp. 1-31.

Goicoechea, A. 1977. A Multi-objective, stochastic programming model in watershed management. PhD. Dissertation, The University of Arizona, pp. 176.

González T., D. I. 2008. Análisis multicriterio para la priorización de subcuencas y municipios para la aplicación de las políticas de conservación y aprovechamiento de los recursos naturales en la cuenca del Lago de Cuitzeo. Tesis de Maestría en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Morelia, Mich. 107 pp.

Ghorbani, A., A. M. Mossivand, A. E. Ouri. 2012. Utility of the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) for land/canopy cover mapping in Khalkhal County (Iran). *Annals of Biological Research*, 3(12): 5494-5503.

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.



- Guzzeti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31: 181-216.
- Harlin, J. M. 1978. Statistical moments of the hypsometric curve and its density function. *Journal of the International Association of Mathematical Geology*, Vol. 10, Issue 1, 59-72 pp.
- Hincapié, J. y Lema A. Determinación espacial de áreas de importancia estratégica de microcuencas abastecedoras de acueductos veredales del municipio de Medellín. Medellín, Colombia, Escuela de Postgrado en gestión Ambiental, Universidad Nacional de Colombia. 29 pp.
- Hlaing, K. T., S. Haruyama and M. M. Aye. 2008. Using GIS-based distributed soil loss modeling and morphometric analysis to prioritize watershed for soil conservation in Bago river basin of Lower Myanmar. *Front. Earth Sci. China*, 2(4): 465-478.
- Horton, R. E. 1932. Drainage basin characteristics. *Trans. Am. Geophys. Union* 13:350-361.
- Hott, M. C., A. L. S. Furtado, C. A. A. S. Ribeiro. 2007. Determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas no município de Campinas, Sao Paulo. *Memorias del Simposio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Instituto Nacional de Pesquisa Espacial*, pp. 3381 – 3388.
- Howard, A. D. 1990. Role of hypsometry and planform in basin hydrologic response. *Hydrological Processes*, 4, 373-385.
- Hsu, C.-H., F.-K. Wang and G.-H. Tzeng. 2012. The best vendor selection for conducting the recycled material based on a hybrid MCDM model combining DANP with VIKOR. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 66, pp. 95-111.
- Huabin, W., L. Gangjun, X. Weiya and W. Gonghui. 2005. GIS-based landslide hazard assessment: an overview. *Progress in Physical Geography*, 29(4), pp. 548-567.



Hung, K. Ch., G. K. Yang, P. Chu and W. T.-H. Jin. 2008. An enhanced method and its application for fuzzy multi-criteria decision making based on vague sets. *Computer-Aided Design*, Vol. 40, Issue 4, pp. 447-454.

Hutchinson, J. N. 1995. Keynote paper, Landslide hazard assessment. *Proceeding of the 6th International Symposium on Landslides*, Christchurch, New Zealand 3, 1805-1841.

IARNA-URL. 2004. Priorización de cuencas y subcuencas hidrográficas para la estimación de recarga hídrica natural, Guatemala. Serie de documentos técnicos No. 12. Gándara, C. A. (Ed.). 36 pp.

IDEM (Indiana Department of Environmental Management). 2003. *Indiana watershed planning guide*. Indiana, USA, USDA Natural Resource Conservation Service. 110 pp.

IDEAM. 2011. *Criterios de priorización de cuencas hidrográficas susceptibles de ordenación*. Colombia, 51 pp.

IPROGA, 1996. *Metodología para la elaboración de planes maestros de cuencas*. Lima, Perú, 77 pp.

Iqbal, M. and H. Sajjad. 2014. Watershed Prioritization using Morphometric and Land Use/Land Cover Parameters of Dudhganga Catchment Kashmir Valley India using Spatial Technology. *Journal of Geophysics & Remote Sensing*, Vol. 3, Issue 1: 1-12.

IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007. *Base Referencial Mundial del Recursos Suelo*. Primera actualización 2007. *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos* no. 103, FAO, Roma.

Iverson, R. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 7, 1897-1910.

Jaiswal, R. K., T. Thomas, R. V. Galkate, N. C. Ghosh and S. Singh. 2014. Watershed prioritization Using Saaty's AHP Based Decision Support for Soil Conservation Measures. *Water Resources Management*, Vol. 28, Issue 2, pp. 475-494.



Javed, A., M. J. Khanday and R. Ahmed. 2009. Prioritization of Sub-watersheds based on Morphometric and Land Use Analysis using Remote Sensing and GIS Techniques. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 37: 261-274.

Javed, A., M. Y. Khanday and S. Rais. 2011. Watershed Prioritization Using Morphometric and Land Use/Land Cover Parameters: A Remote Sensing and GIS Based Approach. *Journal of Geological Society of India*, Vol. 78, pp. 63-75.

Jenson S. and J. Domingue. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrametric engineering and remote sensing*, 54(1):1593-1600.

Jiménez S., M. 1999. Geomorfología fluvial en la cabecera del río Nalón (Cordillera Cantábrica, Noroeste de España). *Trabajos de Geología*, No. 21, pp. 189-200.

Jomaa, I. and Bou-Kheir, R. B. 2003. Multitemporal unsupervised classification and NDVI to monitor land cover change in Lebanon (1987-1998). National Council for Scientific Research/National Center for Remote Sensing, Beirut, Lebanon. In: Gitas I. Z. and San Miguel Ayanz J. (eds.). *Environmental monitoring in the South-Eastern Mediterranean region using RS/GIS techniques. Options Méditerranéennes: Serie B. Etudes et Recherches*, No. 46, pp. 43-49.

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.

Kanth T. A. and Z. u. Hassan. 2012. Morphometric analysis and prioritization of watersheds for soil and water resource management in Wular catchment using geo-spatial tools. *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*, Vol. 2 (1): 30-41 pp.

Klir, J. G. 1995. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.



Koshak, N. and G. Davod. 2011. A GIS morphometric analysis of hydrological catchments within Makkah Metropolitan area, Saudi Arabia. *International Journal of Geomatics and Geosciences* Volume 2, No. 2.

Kouli, M., F. Vallianatos, P. Soupios and D. Alexakis. 2007. GIS-based morphometric analysis of two major watersheds, Western Crete, Greece. *Journal of Environmental Hydrology*, 15(1): 1–17.

Kumar B. and U. Kumar. 2011. Micro watershed characterization and prioritization using Geomatics technology for natural resources management. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, Volume 1, No. 4.

Kumar-Tamang, D., D. Dhakal, D. G. Shrestha and N. P. Sharma. 2012. Morphometric analysis and prioritization of miniwatersheds in Rongli watershed, Sikkim (India) using remote sensing and GIS techniques. *Int. J. Fundamental Applied Sci.*, Vol. 1, No. 3, pp. 61-66.

Kusre, B. C. 2013. Hypsometric Analysis and Watershed Management of Diyung Watershed in North Eastern India. *Journal of Geological Society of India*, Vol. 82, 262-270 pp.

Lajiao, C., Z.-A. Xing and Q. Chengzhi. 2012. Identification of critical source areas of soil erosion on moderate fine spatial scale in Loess Plateau in China. *African Journal of Agricultural Research*, Vol. 7(19), 2962 – 2970.

Larsen, M. C. 2008. Rainfall-triggered landslides, anthropogenic hazards, and mitigation strategies. *Advances in Geosciences*, 14: 147-153.

Lima N. R. T., L. A. R. Mendonça, J. A. Pereira, C. A. V. de Sousa, J. Y. B. Gonçalves y H. Frischkorn. 2008. Análise morfométrica e ambiental da microbacia hidrográfica do rio Granjeiro, Cracto/CE. *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 61(3): 365 – 369.

Liou, J. J. H., Y. Ch. Chuang and G. S. Tzeng. A fuzzy integral-based model for supplier evaluation and improvement. *Information Sciences*, Vol. 266, pp. 199 – 217.



Liou, J. J. H. and G. H. Tzeng. 2012. Comments on “Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: An overview”. *Technological and Economic Development of Economy*, Vol. 18(4), pp. 672-695.

Londhe, S., M. S. Nathawat and A. P. Subudhi. 2010. Erosion, susceptibility zoning and prioritization of mini-watersheds using Geomatics approach. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, Volume 1, No. 3, pp. 511-528.

López-Báez, W., J. López-Martínez, B. Villar-Sánchez y J. Faustino-Manco. 2008. Manejo de cuencas hidrográficas en el estado de Chiapas, México. Diagnóstico y propuesta de un modelo alternativo de gestión. En: Seminario Internacional “Cogestión de cuencas hidrográficas experiencias y desafíos”, CATIE, Turrialba, Costa Rica, pp. 21-26.

López-Pérez, A.; M. R. Martínez-Menes y D. S. Fernández-Reynoso. 2015. Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1): 121-137 pp.

Lu, M.-T., Sh.-W. Lin and G.-Sh. Tzeng. 2013. Improving RFID adoption in Taiwan’s healthcare industry based on a DEMATEL technique with a hybrid MCDM model. *Decision Support Systems*, Vol. 56: 259-269 pp.

Luo, W. 2000. Quantifying groundwater-sapping landforms with a hypsometric technique. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. E1, 1685-1694 pp.

Lyon, J. G., D. Yuan, and R. S. Lunetta. 1998. A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 64, No. 2, pp. 143-150.

Mahadevaswamy, G., D. Nagaraju, S. Siddalingamurthy, Lakshamma, M. S. Lone, P. C. Nagesh and K. Rao. 2011. Morphometric analysis of Nanjangud taluk, Mysore District, Karnataka, India, using GIS techniques. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, Vol. 1, No. 4, pp. 721-734.

Magesh, N. S., K. V. Jitheshlal, N. Chandrasekar and K. V. Jini. 2013. Geographical information system-based morphometric analysis of Bharathapuzha river basin, Kerala, India. *Appl. Water Sci.* Volume 3, Issue 2, pp. 467-477.



Malik M. I, M. S. Bhat, N. A. Kuchay. 2011. Watershed Based Drainage Morphometric Analysis of Lidder Catchment in Kashmir Valley Using Geographical Information System. *Recent Research in Science and Technology*, 3(4): 118-126.

Marques-da Silva, R., Guimarães-Santos, C. A., Carneiro-de Lima Silva, V. C. and Pereira e Silva, L. Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion model in the Mamaba catchment, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 185(11), pp. 8977-8990.

Marques-da Silva, R., Lima-Montenegro, S. M. G. and Guimarães-Santos, C. A. 2012. Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments: a case study of Tapacurá catchment. *Nat Hazards* 62: 953-970.

Melton, M. A. 1958. Geometric Properties of Mature Drainage Systems and their Representation in an  $E_4$  phase space. *The Journal of Geology*, Vol. 66, No. 1, pp. 35-54.

Michel, G. P., M. Kobiyama, and R. F. Goerl. 2014. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, 14(7): 1266-1277.

Mishra, A., S. Kar and V. P. Singh. 2007. Prioritizing Structural Management by Quantifying the Effect of Land Use and Land Cover on Watershed Runoff and Sediment Yield. *Water Resources Management*, 21, 1899 – 1913 pp.

Mishra, S. S. and Nagarajan, R. 2010. Morphometric analysis and prioritization of sub-watersheds using GIS and Remote Sensing techniques: A case study of Odisha, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, v. 1(3), pp. 501-510.

Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. 1994. A physically based model for the topographic control of shallow landsliding. *Water Resource Research* (30): 1153-1171.

Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. 1989. Source Areas, Drainage Density, and Channel Initiation. *Water Resources Research*, 25(8): 1907-1918.

Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. 1988. Where do channels begin. *Nature*, 336: 232-234.



Muñiz-Jauregui, J. A. y V. M. Hernández-Madrigal. 2012. Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 29, Núm. 1, pp. 103-114.

Nag, S. K. and A. Lahiri. 2011. Morphometric analysis of Dwarakeswar watershed, Bankura District, West Bengal, India, using spatial information technology. *International Journal of Water Resources and Environment Engineering*, Vol. 3(10), pp. 212-219.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., King, K. W. 2002a. Soil and Water Assessment Tool—Theoretical Documentation (version 2000). Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service; Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.

Nekhay, O., M. Arraiza and L. Boerboom. 2009. Evaluation of soil erosion risk using Analytic Network Process and GIS: A case study from Spanish mountain olive plantations. *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, pp. 3091-3104.

Nooka-Ratnam, K., Srivastava, Y. K., Venkateshwara-Rao, V., Amminedu, E. and Murthy, K. S. R. 2005. Check dam positioning ny prioritization of micro-watersheds using SYI model and Morphometric Analysis – Remote Sensing and GIS perspective. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Vol. 33, No. 1, pp. 25-38.

Nyamekye, C., E. M. Osei-Jnr and A. Oseitutu. 2014. Classification of time series NDVI for the assessment of land cover change in Ghana using NOAA/AVHRR data, *Journal of Geomatics*, Vol. 8, No. 1: 34 – 39 pp.

Özdağoğlu, A. 2011. A multi-criteria decisión-making methodology on the selection facilit location: fuzzy ANP. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 59, Issue 5-8, pp. 787-803.

Olguín L., J. L. 2010. Importancia de la priorización hidrológica en la toma de decisiones de manejo en la subcuenca del río Ayuquila, Jalisco, México. *CIENCIA@UAQ*, 3(2): 42-51.



Opricovic, S. and G. H. Tzeng. 2004. Decision Aiding Comprise solution by MCDM method: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Europea Journal of Operational Research*, 156, pp. 445-455

Ou-Yang, Y. P., H. M. Shieh and G. S. Tzeng. A VIKOR technique based on DEMATEL and ANP for information security risk control assessment. *Information Sciences*, Vol. 232, pp. 482-500.

Pack, R. T. 1995. Statistically-based terrain stability mapping methodology for the Kamloops Forest Region, British Columbia. *Proceedings of the 48<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference*, Canadian Geotechnical Society, Vancouver, B.C. Sin número de páginas.

Pack, R. T., Tarboton, D. G. and Goodwin, C. N. 1998. The Sinmap approach to Terrains Stability Mapping. *Proceedings of 8<sup>th</sup> Congress of the International Association of Engineering Geology*, Vancouver. Sin número de páginas.

Pai, N., D. Saraswat and M. Daniels. 2011. Identifying Priority Subwatersheds in the Illinois River Drainage Area in Arkansas Watershed Using a Distributed Modeling Approach. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 54(6), pp. 2182-2196.

Pan, N.-F. 2008. Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method. *Automation in Construction*, Vol. 17, Issue 18, pp. 958-965.

Panhalkar, S. S. 2014. Hydrological Modeling Using SWAT model and Geoinformatic Techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, Vol. 17, pp. 197-207.

Panhalkar, S. S., S. P. Mali and C. T. Pawar. 2012. Morphometric analysis and watershed development prioritization of Hiranyakeshi Basin in Maharashtra, India. *International Journal of Environment Science*, Vol. 3, No. 1: 528-534.

Panhalkar, S. S. and C. T. Pawar. 2011. Watershed development prioritization by applying WERM model and GIS techniques in Vedganga basin (India). *Journal of Agricultural and Biological Science*, Vol. 6, No. 10: 38-44.



Pérez-Peña, J.V., J.M. Azañón and A. Azor. 2009. CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. *Computers & Geosciences*, Vol. 35, Issue 6, 1214-1223 pp.

Pisarra, T. C. T., W. Politano, A. S. Ferraudo. 2004. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície de bacia hidrográfica do correjo Rico, Jaboticabal (SP). *Revista Brasileira Ciência do Solo*, Vol. 28, pp. 297 – 305.

PNUD. 2014. Índice de Desarrollo Humano Municipal en México: nueva metodología. México. 104 pp.

Polemio, M. and Petrucci, O. 2000. Rainfall as a Landslide Triggering Factor: An Overview of Recent International Research. *Landslides in research, theory and practice. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Landslides*, Carraiff, 1219-1226 pp.

Phomcha P., P. Wirojanagud, T. Vangpaisal and T. Thaveevouthti. 2012. Modeling the impacts of alternative soil conservation practices for an agricultural watershed with the SWAT model. *Procedia Engineering*, Vol. 32, pp. 1205-1213.

Ponce, D., E. Larrodé y J. M. Moreno-Jiménez. 2013. Planificación estratégica en el transporte aéreo usando el proceso analítico sistémico (ANP). In: J. M. Moreno-Jiménez (Ed.). 2013. *Anales de Economía Aplicada*. Sin número de páginas.

Posner, J.; Bussink, C.; Hijmans, R.; Delgado, R.; Willer, H.; Zorogastúa, P.; y De la Cruz, J. 2002. Priorizando áreas para la conservación de suelos en la microcuenca La Encañada. Lima, Perú, Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN). Documento técnico. 37 pp.

Qin, X. S., G. H. Huang, A. Chakma, X. H. Nie and Q. G. Lin. 2008. A MCDM-based expert system for climate-change impact assessment and adaptation planning – A case study for the Georgia Basin, Canada. *Expert Systems with Applications*, Vol. 34, Issue 3, pp. 2164-2179.

Racca, J. M. G. 2007. Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendiente medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología* 77(1-2): 31-38.



Racca, J. M. G. 2010. Geomorfología de la cuenca del Arrollo del Medio. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología 72-75: 13-42. Rosario, Argentina.

Ramaiah, S. N., G. S. Gopalakrishna, S. Srinivasa-Vittala and K. Md. Najeeb. 2012. Morphometric Analysis of Sub-basins in and Around Malur Taluk, Kolar District, Karnataka Using Remote Sensing and GIS Techniques. Nature Environment and Pollution Technology, An International Quarterly Scientific Journal, Vol. 11, No. 1, pp. 89-94.

Ramesh, K. S., Elango, S. and Adiga, S. 2001. Prioritisation of of sub-watersheds of Dakshina Kannada District, Karnataka using Remote Sensing data. Proceedings of Integrated Water Management, Bangalore on 21-23 June, pp. 10-11.

Rashid M. and R. N. Sahu. 2014. Watershed Prioritization on the Basis of Morphometric Parameters: A Remote Sensing and GIS Based Approach. International Research Journal Of Sustainable Science & Engineering, Vol. 2, Issue 1: 1-6.

Ratnam, K. N. , Y. K. Srivastava, V. V. Rao, E. Amminedu and K. S. R. Murthy. 2005. Check dam positioning by prioritization of microwatersheds using SYI model and morphometric analysis remote sensing and GIS perspective. Journal of Indian Society of Remote Sensing 33(1): 25–38.

Rawat, P. K., P. C. Tiwari and C. C. Pant. 2011. Morphometric Analysis of Third order River Basins using High Resolution Satellite Imagery and GIS Technology: Special Reference to Natural Hazard Vulnerability Assessment. E-International Scientific research Journal, Volume 3, Issue 2, pp. 70-87.

Redin-Vestena, L. 2010. Mapeamento da susceptibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC. Mercator, 9(10), pp. 175-190.

Regulwar, D. G. and P. Anand-Raj. Multi Objective Multireservoir Optimization in Fuzzy Environment for River Sub Basin Development and Management. Journal of Water Resources and Protection, Vol. 4, pp. 271-280.



Rekha, V. B., George, A. V. and Rita, M. 2011. Morphometric analysis and Micro-watershed Prioritization of Peruvanthanam Sub-watershed, the Manimala River Basin, Kerala South India. Environmental research, Engineering and Management, No. 3 (57), pp. 6-14.

Richters, E. 1986. Clasificación y priorización de cuencas hidrográficas: un concepto general. En: Seminario Taller “Metodologías de priorización de cuencas”, Proyecto Regional de Manejo de Cuencas, CATIE. Panamá. 108-124.

Robinson, M. A. 2000. Geomorfología del sector ibérico valenciano entre los ríos Mijares y Tina. Departamento de Geografía, Universidad de Valencia, España. Pp 217.

Roering, J. J., K. M. Schmidt, J. D. Stock, W. E. Dietrich and D. R. Montgomery. 2003. Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range. Canadian Geotechnical Journal, 40: 237-253.

Ruíz, I. 1986. Metodología para la determinación de prioridades en cuencas hidrográficas en Venezuela. En: Seminario Taller “Metodologías de priorización de cuencas”, Proyecto Regional de Manejo de Cuencas, CATIE. Panamá. 125-131.

Saaty, T. L. 2001. The Analytical Network Process. Decision Making with Dependence and Feedback, Pittsburg, RWS Publications

Saaty, T. L. 1996. Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process, RWS Publications.

Sahebjalal, E. and K. Dashtekian. 2013. Analysis of land use-land covers changes using normalized difference vegetation index (NDVI) differencing and classification methods. African Journal of Agricultural Research, Vol. 8(37), pp. 4614-4622.

Sangita, M.S. and R. Nagarajan. 2010. Morphometric analysis and prioritization of subwatersheds using GIS and remote sensing techniques: a case study of Odisha, India. International Journal of Geomatics and Geosciences 1(3): 501–510.



Sangle, A. S. and P. L. Yannawar. 2014. Morphometric Analysis of Watershed using GIS and RS: A review. *International Journal of engineering Research & Technology*, Vol. 3, Issue 11: 599-602.

Sathian, K. K. and P. Syamala. 2010. Prioritisation of Subwatersheds for Land and Water Management. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol. 03, No. 02, pp. 243 – 257.

Schmidt, K. M., J. J. Roering, J. D. Stock, W. E. Dietrich, D. R. Montgomery and T. Schaub. 2001. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 995-1024.

Shikalgar, R. S. 2013. Morphometric analysis and prioritization of watershed for soil resource management in Yerala river basin. *Indian Streams Research Journal*, Volume 3, Issue 6: 1-5.

Sidle, R. C. 1992. A Theoretical Model of the Effects of Timber Harvesting on Slope Stability. *Water Resources Research*, 28(7): 1897-1910.

Sidle, R. C., Pearce, A. J., and O'Loughlin, C. L. 1985. Hillslope Stability and Land Use. *Water Resource Monograph* 11 edition, American Geophysical Union, 140 pp.

Simonovic, S. P. and R. Verma. A new methodology for water resources multicriteria decision making under uncertainty, Vol. 33, Issue 5, pp. 322-329.

Singh, V. and U. C. Singh. 2011. Basin Morphometry of Maingra River, District Gwalior, Madhya Pradesh, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences* , Vol. 1, No. 4, pp. 891-902.

Smith, K. G. 1950. Standards for grading textures of erosional topography. *Am. Jour. Sci.*, Vol. 248, pp. 655-668.

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.*; Martínez-Austria, P. y C. Patiño-Gómez (Ed.). IMTA. 9-37 pp.



Soeters, R., and Van Westen, C. J. 1996. Slope instability recognition, analysis and zonation. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds), Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., USA. 129-177.

Srdjevic, B. and Y. D. Pinto-Medeiros. 2008. Fuzzy AHP Assessment of water Management Plans. *Water Resources Management*, Vol. 22, 877-894.

Srinivasa-Raju, K. and D. Nagesh-Kumar. 2013. Prioritisation of micro-catchments based on morphology. *Water management*, Vol. 166, Issue WM7: 367-380.

Srinivasa-Raju, K. and D. Nagesh-Kumar. 2011. Classification of microwatersheds based on morphological characteristics. *Journal of Hydro Environmental Research* 5(2): 101–109.

Srinivasa-Vitala, S., S. Govindaiah and H. Honne-Gowda. 2004. Morphometric analysis of sub-watersheds in the Pavagada area of Tumkur District, South India, using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Vol. 32, No. 4, pp. 351-362.

Srinivasa-Vitala, S., S. Govindaiah and H. Honne-Gowda. 2008. Prioritization of sub-watersheds for sustainable development and management of natural resources: an integrated approach using remote sensing, GIS and socio-economic data. *Current Science*, Vol. 95, No. 3, pp. 345-354.

Srinivasan, R., Ramanarayanan, T. S., Arnold, J. G. and Bednarz, T. S. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part II: Model Application. *Journal of the American Water Resources Association*. 34(1): 91-101.

Strahler, A. N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union* 38(6): 913-920.

Strahler, A. N. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. In V. T. Chow (ed). *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw Hill book Company, New York, pp. 4-11.



Sulaiman, W. N. A. and M. H. Rosli. 2010. Susceptibility of Shallow Landslide in Fraser Hill Catchment, Pahang Malaysia. *EnvironmentAsia*, 3, pp. 66-72.

Tarboton, D. G. 1997. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, 33(2): 309-319.

Tas, A. 2012. A Fuzzy AHP approach for selecting a global supplier in pharmaceutical industry. *African Journal of Business Management*, Vol. 6, Issue 4, pp. 5073-5084.

Tellaeché, A., X. P. BurgosArtizzu, G. Pajares, A. Ribeiro and C. Fernández-Quintanilla. 2008. A new visión-based approach to differential spraying in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 60, Issue 2, pp. 144-155.

Terhorst, B. and R. Kreja. Slope stability modelling with SINMAP in a settlement area of the Swabian Alb. *Landslides*, 6, pp. 309-319.

Terlien, M. J. T. 1998. The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environmental Geology*, 50: 124-130.

Tolessa, G. A. and P. J. Rao. 2013. Watershed development prioritization of Tandava River Basin, Andhra Pradesh, India- GIS Approach. *International Journal of Engineering Science Invention*, Volume 2, Issue 2, pp. 12-20.

Torfi, F., R. Z. Farahani and Sh. Rezapour. 2010. Fuzzy AHP to determine the relative weights of evaluation criteria and Fuzzy TOPSIS to rank the alternatives. *Applied Soft Computing*, Vol. 10, Issue 2, pp. 520-528.

Torres-Benites, E., D. S. Fernández-Reynoso, J. L. Oropeza-Mota y E. Mejía-Saenz. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, Estado de México. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 22, Núm. 4, pp. 437-444.

Tripathi, M. P., R. K. Panda and N. S. Raghuwanshi. 2003. Identification and Prioritisation of Critical Sub-watersheds for Soil Conservation Management Using the SWAT Model. *Biosystems Engineering*, 85(3): 365 – 379.



Tzeng, G. S. and J. J. Huang. 2011. Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL. 335 pp.

Uniyal, S. and P. Gupta. 2013. Prioritization based on morphometric analysis of Bhilangana watershed using spatial technology. International Journal of Remote Sensing & Geoscience, Volume 3, Issue 1, pp. 49-52.

Varnes, D. J. 1984. Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice. Natural Hazards, 3, UNESCO Press. Paris, 64 pp.

Varnes, D. J. 1978. Slope movement types and processes. In: Landslide Analysis and Control, Clark, M. (Ed.), Special Report 176. Trans. Res. Board, National Academy of Science, National Res. Council, Washinton, D. C. 11-33 pp.

Varol, T. 2012. Landslide Risk Assessment Using SINMAP (Bartın-Sökü sample study). Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 14, 22, pp. 12-23.

Velescu, A. 2009. Heterogenität von bodenkundlichen Standortfaktoren in feucht-tropischen Gebirgslandschaften am Beispiel des Einzungsgebietes des Río Huehuetán (Chiapas, Mexiko). Diplomarbeit, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geowissenschaftliche Fakultät, Geographisches Institut. 142 pp.

Verdin, K. L. 1997. A System for Topologically Coding Global Drainage Basins and Stream Networks. 1997 ESRI International GIS User Conference Proceedings (06/14/2001). <http://gis.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/to350/pap311/p311.htm>

Vijith, H. y Satheesh, R. 2006. GIS based morphometric analysis of two major upland sub-watersheds of Meenachil river in Kerala. Journal of Indian society of remote Sensing, Vol. 34, No. 2. pp. 181-185.

Virajh-Dias, A. A. and A. A. J. K. Gunathilake. 2012. A Comparative Analysis of Landslide Susceptibility by WAA and SINMAP Model. Proceedings of the IPL Symposium, UNESCO, pp. 69-80.



Viramontes-Olivas, O. A., C: Pinedo A., V. M. Reyes G., C. A. Muñoz R. y D. Nuñez L. 2006. Caracterización geomorfológica e hidrodinámica de la subcuenca San Pedro dentro del complejo hidrológico del río Conchos. Memorias del V Congreso Internacional y XI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Pp. 01-10.

Wadhwa, S., J. Madaan and F. T. S. Chan. 2009. Flexible decision modeling of revers logistics system: A value adding MCDM approach for alternative selection. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 25, Issue 2, pp. 460-469.

Wandre, S. S. and H. D. Rank. 2013. Prioritization of Watersheds of Shetrunji River Basin Based on Morphometric Analysis Using Remote Sensing and GIS. World Research Journal of Tropical Agriculture, Vol. 1, Issue 1, 11-18 pp.

Wang, G. and Sassa, K. 2003. Pore pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effect of grain size and fine particle content. Engineering Geology, Vol. 69: 109-125.

Wang, X., Shang, Sh., Yang, W., Clary, C. R., Yang, D. 2010. Simulation of land use-soil interactive effects on water and sediment yields at watershed scale. Ecological Engineering, 36:328-344.

Wu, W. and Sidle, R. C. 1995. A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Watersheds. Water Resources Research, 31(8): 2097-2110.

WWF Centroamérica. 2007. Criterios para la priorización y selección de cuenca, Guatemala. Compensación Equitativa por Servicios Hidrológicos (Eds.: Martínez, M. y Reyes, V.). 36 pp.

Yildiz, O. 2004. An Investigation of the Effect of Drainage Density on Hydrologic Response. Turkish J. Eng. Env. Sci. Vol. 28, pp. 85-94.

Yilmaz, I., and I. Keskin. 2009. GIS based statistical and physical approaches to landslide susceptibility mapping (Sebinkarahisar, Turkey). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68(4): 459-471.



Zhang, Sh.; Y. Lei; L. Wang; H. Li and H. Zhao. 2011. Crop Classification Using MODIS NDVI Denosided Wavelet: A Case Study in Hebei Plain, China. Chinese Geographical Science, Vol. 21, No. 3: pp 322-333.

Zarghami, M. and F. Szidarovszky. 2009. Stochastic-fuzzy multi criteria decision making for robust water resources management. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol 23, Issue 3, pp. 329-339.

Zarghami, M., F. Szidarovszky and R. Ardakanian. 2008. A fuzzy-stochastic OWA model for robust multi-criteria decision making. Fuzzy Optimization and Decision Making, Vol. 7, Issue 1, pp. 1-15.

Zendre, A. M. and R. Nagrajan. 2011. Drainage Morphology Approach for Water Resources Development of Sub Watershed in Krishna Basin. International Journal of Computer & Communication Technology, Volume 2, Issue VIII, pp. 13-21.