

MODELO CARTOGRÁFICO PARA UN ORDENAMIENTO EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS

MAPPING MODEL FOR WATERSHED MANAGEMENT

*Julio César Moraga Peralta*¹

RESUMEN

Ante las interrogantes ¿Cómo reducir el impacto de las actividades humanas que causan problemas ambientales en las cuencas hidrográficas, de modo que se asegure el uso de los recursos garantizando su sostenibilidad para las futuras generaciones? y ¿qué modelos espaciales se requieren para comprender y analizar la problemática que enfrentan los recursos presentes en las mismas? Este artículo propone un modelo integrado asistido por Sistemas de Información Geográfica (SIG) orientado al ordenamiento y, que oriente la gestión en cuencas hidrográficas. Los SIG, por su enfoque sistémico se adecuan al contexto de cuencas y, pueden adecuarse a la gestión de los recursos naturales, ya que permiten integrar y manejar grandes volúmenes de datos para realizar los análisis espaciales. Se reconoce su uso y se ha extendido a las más diversas disciplinas, convirtiéndose en potentes sistemas de ayuda para la toma de decisiones de índole espacial.

Palabras claves: cuenca hidrográfica, sistemas de información geográfica, modelo geoespacial, ordenamiento territorial.

ABSTRACT

Human activities have caused major impacts on the environment and therefore in the watershed. In Costa Rica during the last decades, watershed management has aroused great interest due to the increase in the number and intensity of environmental problems that they have generated, it is

¹ Académico, Julio César Moraga Peralta pertenece a la Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: jmoraga@una.ac.cr

Fecha de recepción: 07 de agosto de 2011
Fecha de aceptación: 13 de octubre de 2011

important to make proposals to guide strategies to reverse the degradation environmental and natural resource depletion, caused by population growth that continues to consume natural resources. In this paper we propose an integrated model-assisted Geographic Information Systems (GIS) oriented to the management and watershed management. GIS for its systemic approach to fit the context of watersheds and allow you to integrate and manage large volumes of data for spatial analysis. Today has been recognized and this use has spread to the most diverse disciplines, becoming strong support systems for decision-making space character.

Keywords: watershed, GIS, geospatial model, land use planning.

Introducción

La globalización de la economía dirigida hacia la búsqueda de la sostenibilidad del desarrollo definió un nuevo orden económico internacional que estimuló cambios sustanciales en el enfoque de desarrollo de los países latinoamericanos.

Dichos cambios se concretan en nuevas estrategias basadas en: la apertura externa e interna y el desarrollo de capital social, de competitividad y de la gobernabilidad; todo lo anterior debe realizarse sobre territorios organizados, es decir, sobre la base de ordenamientos coherentes según la particularidad del espacio geográfico.

El actual enfoque de desarrollo de la sociedad civil y las entidades territoriales se orienta hacia procesos de desarrollo social y regional, con prácticas voluntarias de OT. Desde esta perspectiva, cabe atribuirle al OT un destacado papel, ya que se constituye como una política y un instrumento de planificación al servicio del desarrollo de las regiones para competir en el mercado internacional, creando nuevas ventajas comparativas y competitivas, o desarrollando actuales, en el marco de sostenibilidad ambiental.

Conceptualmente, el OT es una política del Estado y un instrumento que permite una apropiada organización político-administrativa de la Nación para la proyección espacial de las políticas sociales, económicas, ambientales y culturales de la sociedad, garantizando un nivel de vida adecuado para la población y la conservación del ambiente.

Costa Rica se ha caracterizado a través de los años por aplicar un estilo de desarrollo sostenible del uso de los recursos naturales. Respecto a otros países del área centroamericana, ha alcanzado importantes logros en materia de protección; por ello, ha dedicado el 25,9% del territorio a la conservación y protección de los recursos naturales, a través de la creación de áreas protegidas (Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014). También se

han redactado y aprobado importantes leyes ambientales, cuyo propósito es velar por la protección de la naturaleza, de igual forma ha impulsado el desarrollo de una creciente educación ambiental en el currículo de los centros educativos.

Actualmente, la política en materia ambiental a nivel del gobierno central se enfoca en lograr el desarrollo ligado a la naturaleza, con el fin de alcanzar un desarrollo sostenible, este concepto se entiende como un sendero de progreso mediante el cual se satisfacen las necesidades y aspiraciones económicas, sociales y de diversidad cultural, orientado hacia un ambiente sano, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades (CEDARENA, 2004).

En este trabajo se reflexiona acerca de las relaciones entre el OT, el desarrollo sostenible y los/as actores a nivel de cuenca hidrográfica. El objetivo es analizar las posibilidades de llevar a cabo el desarrollo sostenible en cuencas hidrográficas que garantice el uso de los recursos, visualizando escalas apropiadas e integradas en un SIG útiles para la toma de decisiones.

Debido a lo anterior, surge la principal interrogante de este trabajo: ¿Qué modelo permite la aproximación a un OT en cuencas hidrográficas integrando el marco legal costarricense y los elementos y factores del medio geográfico en un SIG, para una zonificación de usos acorde a la particularidad de la cuenca hidrográfica?

Ordenamiento Territorial: alcance según el marco legal costarricense

Sin entrar en el análisis conceptual del OT, en este apartado se presenta el alcance de la normativa vigente en Costa Rica desde los cuatro niveles que han permitido realizar prácticas de OT. En primer lugar se señala el Plan Nacional de Desarrollo Urbano, al cual corresponde la máxima estructura de ordenamiento territorial: la Ley de Planificación Urbana N° 4240, conjuntamente con el Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo en asociación con el Ministerio de Planificación Nacional (MIDEPLAN), quienes se encargan de preparar, revisar y mantener al día dicho plan.

En el segundo nivel, el Plan de Ordenamiento Regional, el cual le corresponde al Ministerio de Planificación Nacional la Ley N° 5525, debe organizar al país en regiones y subregiones como instancia de coordinación institucional, de acuerdo con principios de economía, geografía, accesos, usos de la tierra, programas de inversión y las bases de la comunidad.

Aunque la delimitación no coincide con la división política y administrativa de las provincias actuales, facilita una estructura oficial para promover proyectos de interés nacional.

En este nivel de planificación se realiza una descripción más detallada del espacio territorial a planificar, y se considera el grado de cohesión que tiene la región como espacio geográfico, resaltando las características del terreno, del clima, de su población, de la agricultura, de la industria y del comercio, incluyendo además criterios sobre la variable ambiental regional, entre otros. También, se consideran las políticas del Estado que sobre la materia se están generando, así como los programas y proyectos de ordenamiento territorial inter-cantones o mancomunados.

El tercer nivel está representado por el Plan de Ordenamiento Subregional, representando por la Secretaría Técnica del Plan Nacional de Desarrollo Urbano y el Instituto Nacional de Urbanismo (INVU) este tendrá la responsabilidad de elaborar la propuesta de ordenamiento territorial a nivel nacional, y particularmente para la Gran Área Metropolitana (GAM), lo que posible en asociación con los Gobiernos Locales y las Directrices Metropolitanas que deberán revisar y actualizar los planes reguladores existentes en la GAM, así como la contratación de los planes reguladores faltantes en coordinación con los 31 municipios que conforman parte de la región central del país.

En este nivel se consideran varias unidades físicas y administrativas localizadas dentro de la región, las cuales comparten características geográficas naturales, sociales, ambientales y de desarrollo semejantes, tales como carreteras, producción (agrícola, pecuaria, forestal), pago de servicios ambientales, turismo, transporte y servicios, entre otros.

El cuarto nivel lo constituye el Plan Regulador o Plan de Ordenamiento Territorial Local, el cual, según lo establecen los artículos 169 de la Constitución Política y 15 de la Ley de Planificación Urbana, es competencia de las municipalidades planificar y controlar el desarrollo urbano dentro de los límites de su territorio, por ende, este nivel es competencia legal del Municipio y de la Dirección de Urbanismo del INVU, según el Capítulo Segundo de la Sección Primera, los Capítulos I, II y III de la Sección Segunda de la citada Ley. Dichas entidades deben participar en la elaboración, aplicación, modificación, fiscalización e integración de cualquier plan regulador y sus reglamentos, antes de su adopción. De igual manera, tienen la responsabilidad de fiscalizar los planes reguladores.

Dentro de la estructura de planificación, un Plan Regulador es un conjunto de estudios e investigaciones sobre las unidades físico-geográficas de un área definida, junto con el análisis de sus aspectos sociales, ambientales y económicos, con énfasis en las propuestas espaciales que aporten alternativas concordantes para los usos del suelo de las áreas urbanas y sus territorios adyacentes, procurando su coincidencia con la capacidad de uso o potencialidad en el mediano y largo plazo. Según definición en la Ley de Planificación Urbana se expresa: “El Plan Regulador, es el instrumento de planificación local que define en un conjunto de mapas, planos, reglamentos y cualquier otro documento, gráfico o suplemento, la política de desarrollo y los planes para distribución de la población, usos de la tierra, vías de circulación, servicios públicos, facilidades comunales y construcción, conservación y rehabilitación de áreas urbanas”. Ley N° 4240, artículo 1, p. 1. 13 de mayo de 2004.

En consecuencia con las diferentes etapas mencionadas y considerando la definición planteada por el INVU para los planes reguladores puede resaltarse el uso de SIG para el geo-procesamiento de datos, con el fin de modelar unidades espaciales según las características del soporte físico, social, económico y cultural.

La incorporación de los SIG en cuencas hidrográficas

En Costa Rica, el OT de cuencas hidrográficas presenta grandes limitaciones, muchas están relacionadas con la disponibilidad de información y su integración en un SIG que apoye la toma de decisiones. En algunos casos se dispone de geodatos, sin embargo estos resentan dificultades al integrar la información biofísica y socioeconómica, debido a que no tienen un estándar geoespacial y carecen de la arquitectura SIG, situación que dificulta la realización del análisis espacial.

Para lograr una visión de conjunto en nuestras cuencas hidrográficas se requiere construir modelos con geodatos jerarquizados que consideren como punto de partida un enfoque cualitativo que culmine con una visión cuantitativa estructurada en un SIG, esto permitirá apoyar los procesos de gestión para la toma de decisiones, además de contribuir al desarrollo mediante el ordenamiento adecuado, lo cual permitirá mejorar la calidad de vida de los/las habitantes sin provocar el deterioro de los recursos existentes; asimismo, se motiva hacia la preservación y restauración de la riqueza

ecológica presente en las mismas. Ante esta situación, se vuelve importante la aplicación de SIG como un sistema de decisiones que integre la información de base para su ordenamiento.

Los SIG se convierten en la tecnología que permite realizar un tratamiento unificado de los datos geográficos a través de procedimientos de análisis espacial, ofreciendo resultados en forma de tablas o mapas; por ende, su implementación ayudará a dar respuesta a la problemática y a mejorar la calidad de vida de la población.

Es por lo anterior que se propone un modelo con dos grandes perspectivas; la primera desde el punto de vista social, en la que se busca lograr un impacto en la sociedad al otorgarle a la cuenca el carácter social, ya que sus recursos se consideran como bienes estratégicos no comercializables que le garantizan a la comunidad la conservación y mantenimiento de los mismos, posibilitando su acceso a las futuras generaciones. La segunda desde el punto de vista científico, ya que se considera que el OT en cuencas es ciencia/arte que permite lograr el uso apropiado de los recursos naturales en función de la intervención humana y sus necesidades, propiciando la sostenibilidad, la calidad de vida, el desarrollo y el equilibrio medio ambiental.

Al seguir los enfoques actuales del OT y su aplicación en cuencas se busca una visión holística de interacción biofísica, socioeconómica y ambiental, cuyo propósito básico es el uso y manejo adecuado de los recursos naturales. Por tanto, el uso de los SIG es indispensable en el análisis basado en el conocimiento científico, orientando propuestas y alternativas que ayuden a la solución de los problemas ambientales en cuenca hidrográficas.

Propuesta de un modelo para el ordenamiento en cuencas hidrográficas

El modelo que a continuación se presenta distingue dos grandes etapas: en primer lugar, se evalúan modelos preexistentes que abordan temáticas específicas en cuencas hidrográficas y, en segundo, se definen las variables necesarias para la propuesta y el diseño del modelo proponiendo un conjunto de datos geospaciales para integrarse en un SIG.

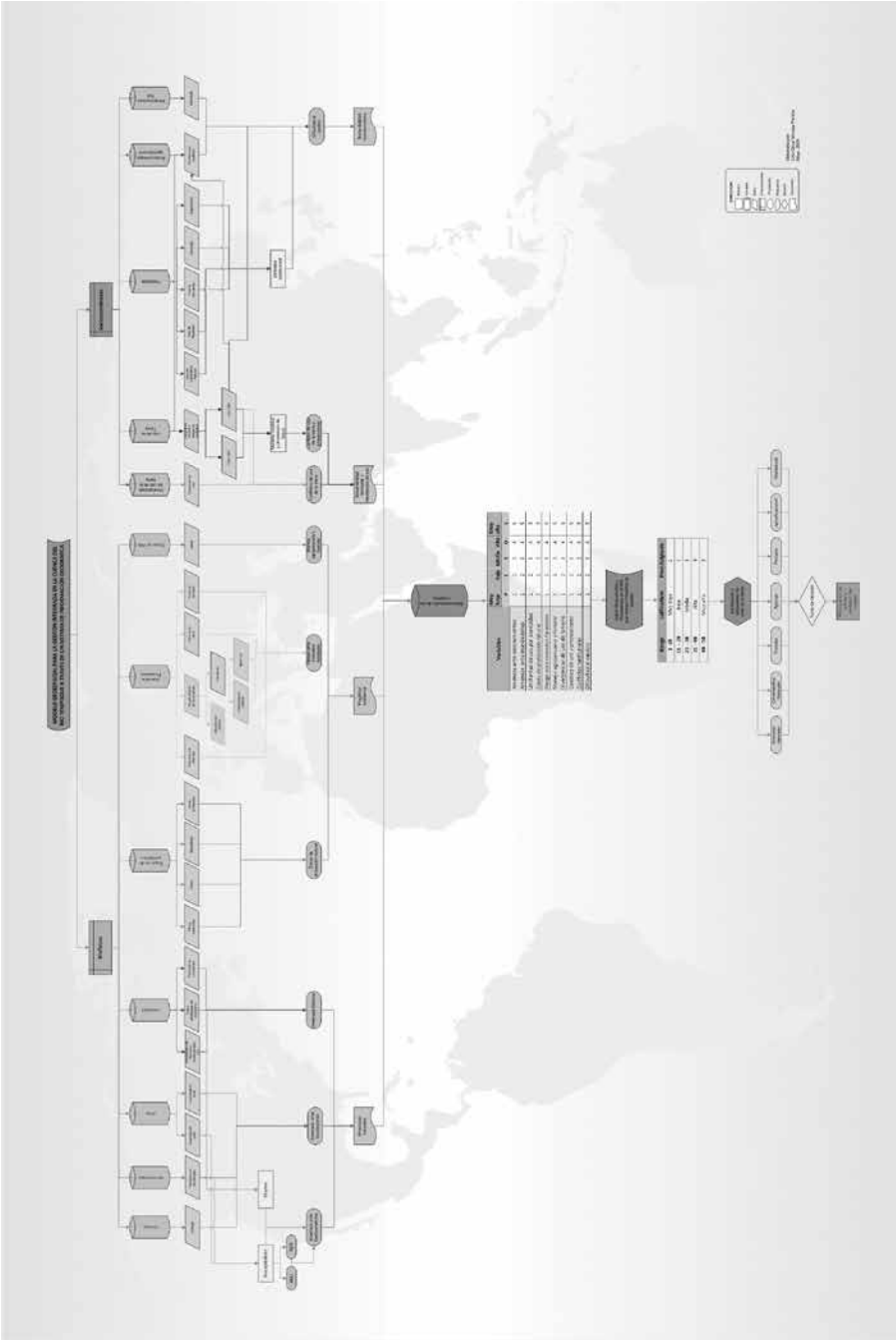
Dentro de los modelos consultados y analizados para la propuesta están los siguientes:

1. El modelo conceptual aplicado por Sogreah Ingenierie SNC - Gómez, Cajiao y Asociados S.A. - Sinergia 69 S.A. (1999) para la elaboración del Plan de Manejo Integral de la cuenca del río Reventazón en la vertiente del Caribe costarricense.
2. El modelo Vahrson-Mora (1990) desarrollado para analizar la amenaza ante deslizamientos, y el modelo Mora-Vahrson-Mora (1992), el cual constituye una adaptación al propuesto en el año noventa por los mismos autores.
3. Igualmente, se propone e incorpora un modelo para analizar la amenaza ante inundaciones, a partir del análisis de datos de lluvias, litologías y morfología del terreno.
4. De la misma manera, incluye el riesgo de incendios forestales, ya que algunas cuencas sufren el impacto de este tipo de incidentes se propone una adaptación de la metodología propuesta Ordoñez y Martínez (2003).
5. También se incorpora un modelo para estimar los cambios en el uso de la tierra, sus transiciones e implicaciones en los recursos de la cuenca.
6. Por último se introducen una serie de variables socioeconómicas, las cuales una vez estandarizadas se integran al modelo propuesto, lo que permite la visualización de zonas críticas a ser intervenidas por los/las diferentes actores presentes en la cuenca.

El modelo tiene una visión de conjunto y multivariada, en el cual, mediante la aplicación de SIG, se generan escenarios que orientan el uso de los recursos, estableciendo relaciones espaciales y vinculando distintos tipos de información, de manera que se le permita a los/las usuarios/as, así como a los/las tomadores/as de decisiones, contar con información digital y de consulta directa para el OT en cuencas hidrográficas con un enfoque espacial.

En la figura 1 se presenta la estructura metodológica del modelo propuesto, en el que se interrelaciona el conjunto de variables consideradas de importancia para llevar a cabo prácticas de OT en cuencas hidrográficas.

Figura 1. Modelo de interrelación de las variables biofísicas y socioeconómicas. Fuente: Elaboración propia.



A continuación, se explica en forma general la incorporación de las variables que estructuran el modelo geoespacial a ser incorporarse en un SIG.

Variables consideradas para el análisis

Para el desarrollo e implementación del modelo geoespacial se tienen dos conjuntos de condiciones o variables de análisis: biofísicas y socioeconómicas.

Variables biofísicas

Se propone realizar un análisis biofísico a partir de la geología, la geomorfología, del clima (humedad del suelo, lluvias) de la sismicidad, las fallas geológicas, los espacios de protección, los incendios forestales, las zonas de vida y la capacidad de uso de la tierra.

Ulteriormente, se explica cada variable y su incorporación considerada en el modelo. En primera instancia se presenta el modelo para analizar la amenaza ante los deslizamientos; se parte de la metodología propuesta por Vahrson y Mora en el año 1990, adaptándola para establecer un modelo con grados de amenaza.

Obtención de los indicadores para estimar la amenaza ante deslizamientos

Geología. El análisis geológico se realizará a partir de la información proveniente de estudios regionales y locales llevados a cabo por diferentes profesionales, así como los existentes en instituciones nacionales como el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica (UCR).

Actualmente, la información referente a la geología considera la estratigrafía y constitución de las rocas, presentando escasos datos de los procesos de meteorización, denudación, estabilización para el modelaje y conservación de las cuencas hidrográficas.

En la tabla 2 se muestra la información disponible para esta variable, la cual permite obtener cinco calificativos de susceptibilidad de laderas, dichos calificativos van desde muy baja a muy alta.

Tabla 1: Clasificación litológica para valorar la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas

| Litologías | Valor del parámetro: Susceptibilidad a estabilidad de laderas |
|---|---|
| <p>Aluvión Grueso, permeable, compacto, nivel freático bajo. Calizas duras permeables. Rocas intrusivas poco fisuradas, bajo nivel freático. Basaltos, andesitas, ignimbritas y otras rocas efusivas, sanas permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas, sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo. Características físico-mecánicas: materiales sanos con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas, sin relleno.</p> | 1: Muy Baja |
| <p>Rocas sedimentarias muy alteradas, estratificación maciza (desimétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, lavas ignimbritas, rocas metamórficas medianamente alteradas y fisuradas. Aluviones con compactaciones leves, con proporciones considerables de finos, nivel freático a profundidades intermedias. Características físico-mecánicas: resistencia al corte media a elevada, fracturas cizallables.</p> | 2: Baja |
| <p>Rocas sedimentarias, intrusivas, lavas, ignimbritas, tobas poco soldadas, rocas metamórficas mediana a fuertemente alteradas, coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactos, drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos. Características físico-mecánicas: resistencia al corte moderado a media, fracturación importante.</p> | 3: Mediana |
| <p>Aluviones fluviolacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente y con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros Características físico-mecánicas: resistencia al corte moderado a baja con presencia frecuente de arcillas.</p> | 4: Alta |
| <p>Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica, rocas con estado de alteración avanzado, drenaje pobre. Se incluyen los casos 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos elevados. Características físico-mecánicas: resistencia al corte muy baja, materiales blandos con muchos finos.</p> | 5: Muy Alta |

Fuente: Adaptado a partir de Vahrson y Mora, 1990.

Geomorfología: El análisis geomorfológico se realizará a partir de la información proveniente de la carta geomorfológica, complementando la misma con documentación existente en diferentes instituciones estatales. Además se incorporarán ortoimágenes, así como un modelo digital de elevaciones, con ellos se analizará la pendiente del terreno, diferentes geoformas y comportamiento de la red hidrográfica, además ayudará a identificar áreas con amenazas naturales, estas últimas se complementarán con los mapas de zonas de riesgo de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE).

La tabla 3 muestra las diferentes categorías de pendiente para su incorporación al análisis ante los deslizamientos.

Tabla 2. Calificativo asignado según pendiente del terreno

| Pendiente en porcentaje | Calificativo | Peso asignado |
|-------------------------|--------------|---------------|
| 0 – 5 | Muy bajo | 0 |
| 5.1 -10 | Bajo | 1 |
| 10.1 – 20 | Moderado | 2 |
| 20.1 – 40 | Mediano | 3 |
| 40.1 – 60.0 | Alto | 4 |
| > - 60.1 | Muy alto | 5 |

Fuente: Adaptado de Vahrson y Mora, 1990.

Clima (precipitación): Esta variable permitirá analizar las condiciones de humedad del suelo, así como las lluvias intensas. Su análisis se incorporará para obtener en la amenaza ante los deslizamientos y en el estudio de las inundaciones.

Para estudiar el clima se consideraran los datos de estaciones climáticas y pluviométricas referentes a precipitaciones y temperaturas existentes en el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), adicionalmente se consultarán diferentes estudios, informes y tesis sobre aspectos climáticos en Costa Rica.

Para obtener la humedad del suelo se debe recurrir a los promedios mensuales de precipitación, efectuando con ellos un balance hídrico simplificado en el que se asuma una evapotranspiración potencial de 125 mm/mes; por lo tanto, las precipitaciones mensuales inferiores a 125 mm

no conducen a un aumento de la humedad del terreno, mientras que una precipitación entre 125 y 250 mm si la incrementa, y las precipitaciones mensuales superiores a 250 mm conducen a una humedad del suelo muy alta (Vahrson, W. y Mora, R., 1990).

Tabla 3. Clasificación de los promedios mensuales máximos de la precipitación

| Precipitación promedio (mm/mes) | Peso asignado |
|---------------------------------|---------------|
| < - 125 | 0 |
| 125 - 250 | 1 |
| > - 250 | 2 |

Fuente: Vahrson y Mora, 1990.

El valor límite de 125 mm corresponde con una tasa generalizada de la evapotranspiración potencial mensual en América Central. Además, se afirma que la infiltración de agua comienza a partir de 40 mm decadales, o sea a 125 mm mensuales de precipitación. A los promedios mensuales se les asignarán los valores de la tabla 4 y se efectuará la suma de estos valores para los doce meses del año, con lo que se obtendrá un valor que puede oscilar entre 0 y 24 unidades. El resultado reflejará los aspectos relacionados con la saturación y la distribución temporal de humedad en el terreno (Mora, R. et al., 1992). La valoración del parámetro se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación del factor humedad (HUM)

| Valor acumulado | Calificativo | Valor parámetro HUM |
|-----------------|--------------|---------------------|
| 0 - 4 | Muy bajo | 1 |
| 5 - 9 | Bajo | 2 |
| 10 - 14 | Medio | 3 |
| 15 - 19 | Alto | 4 |
| 20 - 24 | Muy alto | 5 |
| | | |

Fuente: Vahrson y Mora, 1990.

Las intensidades de lluvias constituyen uno de los factores que causan el potencial disparo de los deslizamientos. Por ello, se utilizará la lluvia máxima en 24 horas con un período de retorno de 100 años, aplicando la distribución de valores extremos Gumbel tipo I o Log-Pearson tipo III a series temporales con más de 10 años de registro (Mora, R. et al., 1992).

El análisis de la lluvia se realizará a partir de la media mensual, el promedio mensual de días con lluvia y la precipitación máxima diaria según períodos de retorno, lo cual permitirá crear mapas cuantitativos con áreas homogéneas o zonas de amenaza de inundación. En este apartado se den considerar dos aspectos fundamentales:

- Máximos diarios anuales con periodos de retorno (TR) de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Para ello se tomará en cuenta la información pluviográfica de las diferentes estaciones presentes en la cuenca, posteriormente, utilizando la fórmula de Gumbel, se determinará cada TR. Dicha fórmula es la siguiente:

$$X = \chi + \frac{S\chi (\gamma - \mu)}{\delta}$$

Donde:

X = es el evento máximo según cierto nivel de probabilidad.

χ = es el promedio de la serie de los eventos máximos anuales.

$S\chi$ = es la desviación estándar de la serie de eventos máximos anuales.

γ = variable reducida de Gumbel, depende del nivel de probabilidad de excedencia deseado.

μ = es un parámetro que depende de la duración del registro.

δ = es otro parámetro que depende, como el anterior, de la duración del registro.

Intensidades máximas de precipitación con un TR de 10 años, para duraciones de 5, 10, 15, 30 y 60 minutos, según la investigación realizada por Vahrson, en el año 1991, sobre aspectos climáticos de la erosión hídrica en Costa Rica. Posteriormente, con dicha información se construirán

mapas para el respectivo análisis. En la tabla 6 se presentan los calificativos asignados según la intensidad de la precipitación.

Tabla 5. Valoración del factor intensidad de la precipitación LI

| Lluvias máximas n > 10 años Tr = 100 años mm | Lluvias máximas n < 10 años. Promedio en mm | Calificativo | Peso asignado |
|---|---|--------------|---------------|
| < 100 | <50 | Muy bajo | 1 |
| 100 - 200 | 50 - 90 | Bajo | 2 |
| 201 - 300 | 91 - 130 | Medio | 3 |
| 301 - 400 | 131 - 175 | Alto | 4 |
| > 400 | >175 | Muy alto | 5 |

Fuente: Vahrson, 1989.

Sismicidad: Los sismos, como eventos naturales, han causado destrucción tanto por su magnitud como por el disparo de los deslizamientos. Para el caso de los deslizamientos, este potencial se ha correlacionado con las intensidades Mercalli-Modificada. Asimismo si se cuenta con datos sobre aceleraciones pico se puede usar la relación de Trifunac y Brady (1975) para establecer los valores correspondientes del parámetro de disparo por sismicidad (citados por: Mora, R. et al., 1992).

Tabla 6. Calificativo del factor sismicidad

| Intensidades (Mercalli Modificada) | Aceleración pico (%g) (Trifunac & Brady, 1975) | Calificativo | Valor Paramétrico |
|------------------------------------|--|-----------------|-------------------|
| I | 0.3-0.6 | Extrem. leve | 1 |
| II | 0.6-1.1 | Muy leve | 2 |
| III | 1.1-2.2 | Leve | 3 |
| IV | 2.2-4.5 | Muy bajo | 4 |
| V | 4.5-8.9 | Bajo | 5 |
| VI | 8.9-17.7 | Moderado | 6 |
| VII | 17.7-35.4 | Medio | 7 |
| VIII | 35.4-70.5 | Elevado | 8 |
| IX | 7.5-140.8 | Fuerte | 9 |
| X | 140.8-280.8 | Bastante fuerte | 10 |
| XI | 280.8-560.4 | Muy fuerte | 11 |
| XII | > 560.4 | Extrem. fuerte | 12 |

Fuente: Mora, Vahrson, Mora, 1992.

Los indicadores morfodinámicos anteriores (litología (L), pendiente (P), humedad del suelo (H), lluvias intensas (LI) y sismicidad (S)) permiten estimar la amenaza ante los deslizamientos, los cuales se combinan en un SIG.

Al Seguir a Vahrson y Mora (1990), se podrán obtener los diferentes grados de amenaza ante estos eventos. A partir de la L, P, H se obtiene un parámetro de susceptibilidad, y de LI y S se obtiene el parámetro de disparo.

En síntesis, la amenaza será el producto de la siguiente ecuación:

Ecuación (1)

Ad = Susceptibilidad' Disparo

Ad = Amenaza de deslizamiento.

Susceptibilidad = Parámetros de susceptibilidad: litología, pendiente y humedad.

Disparo = Parámetros de disparo: intensidad sísmica y pluviométrica

El parámetro de susceptibilidad (Susc) es una combinación de la litología, la pendiente del terreno y la humedad del suelo.

Ecuación (2)

$$\text{Susc} = L \cdot P \cdot H$$

L = Índice de influencia de las condiciones litológicas

P = Índice de influencia de la pendiente del terreno

H = Índice de influencia de la humedad usual del suelo

El parámetro de disparo (Disp) es la combinación de los índices de lluvias y de la sismicidad.

Ecuación (3)

$$\text{Disp} = S + Ll$$

S = Índice de influencia de la intensidad sísmica máxima.

Ll = Índice de influencia de la intensidad de las lluvias.

Es decir: $\text{Ad} = (L \cdot P \cdot H) \cdot (S + Ll)$

Según las particularidades tectónicas y climáticas de cada región se da prioridad a la consideración de cada factor de disparo.

Las ecuaciones originales (4 y 5) pueden segregarse en:

Ecuación (4)

$$\text{PDL} = (L \cdot P \cdot H) \cdot Ll$$

PDL = Potencial de deslizamientos de la intensidad de lluvias

Ecuación (5)

$$\text{PDS} = (L \cdot P \cdot H) \cdot S$$

PDS = Potencial generador de deslizamientos de la intensidad sísmica.

Al utilizar los valores paramétricos antes descritos y aplicar la ecuación por medio de los elementos de influencia se obtienen una serie de rangos y clases que ilustran la amenaza de generación de deslizamientos en determinada localidad. La tabla 7 muestra la clasificación de los grados de amenaza.

Tabla 7. Clasificación de los grados de amenaza ante deslizamientos

| Potencial | Clases | Amenaza |
|------------|--------|----------|
| 0 - 32 | I | Muy Baja |
| 33 - 162 | II | Baja |
| 163 - 512 | III | Media |
| 513 - 1250 | IV | Alta |
| > - 1251 | V | Muy alta |

Fuente: Adaptado de Vahrson y Mora, 1990.

Obtención de los indicadores para estimar la amenaza sísmica.

Para estudiar la amenaza sísmica se den considerar los siguientes indicadores: fallas geológicas, localización de epicentros y profundidad de sismos.

Las fallas geológicas serán caracterizadas según su actividad o inactividad, de manera que se determinan zonas de protección y/o de control especial en donde se determine ruptura de fallas en la superficie terrestre. La delimitación de estas zona se hará al correlacionar la ubicación de los epicentros versus con las fallas geológicas, de modo que se consideren fallas activas a aquellas en las que al menos se registre un evento sísmico en los últimos 10 años; contrariamente, las que no presenten actividad sísmica se consideran inactivas. En la tabla 9 se presentan el peso asignado para establecer el estado de una falla y el espacio de protección en metros lineales a partir de su identificación sobre el terreno.

Tabla 8. Peso asignado según estado de falla geológica y protección en metros lineales

| Falla | Zona de protección | Peso asignado |
|----------|--------------------|---------------|
| Inactiva | 100 | 1 |
| Activa | 200 | 2 |

Fuente: Elaboración propia.

Para complementar el estudio de amenaza sísmica se debe analizar para cada evento sísmico, presente en la zona, la profundidad en kilómetros y la magnitud del mismo, esto permitirá definir las zonas de control especial para el desarrollo de obras de infraestructura y asentamientos humanos.

En la tabla 9 se proponen cinco categorías con la asignación de los pesos ponderados según la profundidad de los sismos en kilómetros, además del espacio de protección en metros lineales a partir del epicentro.

Tabla 9. Calificativos según profundidad de sismos en kilómetros y magnitud, protección en metros lineales

| Profundidad del sismo | Magnitud | Protección en metros | Peso asignado | Calificativo |
|-----------------------|-----------|----------------------|---------------|--------------|
| 0 - 5 | > 7.6 | 2000 | 5 | Muy alto |
| 6 - 10 | 5.6 - 7.5 | 1600 | 4 | Alto |
| 11 - 30 | 3.6 - 5.5 | 1200 | 3 | Moderado |
| 31 - 50 | 2.0 - 3.5 | 800 | 2 | Bajo |
| > 51 | 1.1 - 1.9 | 400 | 1 | Muy bajo |

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se debe analizar el potencial de licuefacción del terreno a partir de las características litológicas descritas en la tabla 1, para valorar la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.

Obtención de los indicadores para estimar la amenaza ante inundaciones.

Dentro de los factores naturales que afectan este tipo de fenómenos está, por un lado, la influencia de la geología del terreno, la cual es de notoria importancia puesto que la escorrentía se modifica por la vegetación, las características del suelo y la roca superficial, en la cual la precipitación pluvial tiene lugar (Roviralta, 1990). Por otro lado, está la capacidad de infiltración de una vertiente, o parte de ella, definida como la proporción en la cual el agua puede ser absorbida, la cual se ve afectada por el contenido de humedad, permeabilidad y profundidad del suelo.

Para su análisis se deben considerar cuatro aspectos fundamentales:

- Lluvias intensas: su estudio permite determinar la cantidad de precipitación necesaria para producir inundaciones; para este aspecto se debe tomar en cuenta la valoración estimada en la tabla 5 referente al factor de intensidad de la precipitación

- Litología: se determina a partir de la clasificación presentada en la tabla 1, que valora la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.
- Pendiente del terreno: este indicador se evalúa según el grado de inclinación del terreno en porcentaje como derivada de la geomorfología de la cuenca. En la tabla 10 se muestra el peso asignado para su estimación.
- Distancia a cursos de agua: se considera de vital importancia realizar un análisis de distancia a cursos de aguas (ríos y quebradas) según pendiente. En la tabla 10 se muestra la relación entre pendiente y distancia a cursos de agua con su respectivo calificativo.

Tabla 10. Calificativos para el factor pendiente vrs distancia a cursos de agua

| Pendiente del terreno en porcentaje | Distancia a cursos de agua en metros | Peso asignado | Calificativo |
|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------|--------------|
| 0 – 2.0 | 0 – 20.0 | 5 | Muy alto |
| 2.1 – 4.0 | 20.1 – 40.0 | 4 | Alto |
| 4.1 – 6.0 | 40.1 – 60.0 | 3 | Moderado |
| 6.1 – 8.0 | 60.1 – 80.0 | 2 | Bajo |
| 8.1 – 10 | 80.1 y más | 1 | Muy bajo |

Fuente: Elaboración propia.

Obtención de los indicadores para estimar los espacios de protección natural.

A partir de las categorías de manejo para las áreas silvestres protegidas de Costa Rica, se incorporarán estos espacios como elementos decisivos para la conservación, respetando los criterios y la condición especial del tipo de recursos a proteger.

Además, se aplicarán entrevistas a funcionarios/as encargados/as de la administración y del manejo de las diferentes áreas protegidas y visitas de campo a cada una de ellas. Las entrevistas se dirigirán hacia el análisis de los planes de manejo, los problemas más apremiantes y visualización de las tendencias al futuro. Las entrevistas se complementarán con visitas al campo para comprobarlas.

Finalmente, se realizará un análisis detallado de la legislación pertinente, según la categoría de protección a la cual están sometidas estas áreas de protección.

Para definir los espacios de protección de ríos y quebradas se aplicará lo establecido en nuestra legislación:

- En áreas urbanas se debe delimitar un corredor de protección de los márgenes de los ríos de 10 metros, mientras que en áreas rurales esta será de 20 metros.
- Pozos: área de protección es de 100 metros.
- Manantiales: área de protección de 150 metros.

Obtención de los indicadores para estimar los incendios forestales.

Se debe partir de variables explicativas como proximidad a carreteras, tipos de uso de la tierra, insolación y altitud. Con ellas se construirá un modelo de probabilidad, considerando el origen de un incendio en un punto cualquiera de la zona de estudio mediante una regresión logística multivariante.

La regresión logística establece que la probabilidad de que la variable dependiente sea igual a 1 viene dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 6

$$P(Y = 1) = \frac{\exp(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_3 X_3)}{1 + \exp(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_3 X_3)}$$

Fuente: Ordoñez, 2003.

Siendo Y la variable dependiente, X_1 , X_2 y X_3 las variables independientes, y α y β los números reales.

Con la ayuda de un SIG se logrará obtener los coeficientes para generar el mapa de probabilidad. Según Ordoñez 2003, la probabilidad de que un incendio se inicie está dada por la siguiente ecuación.

Ecuación 7

$$\text{logit}(Y) = \ln \frac{P}{1-P} = \alpha + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \Rightarrow P = \frac{e^{\text{logit}(Y)}}{1 + e^{\text{logit}(Y)}}$$

El resultado obtenido deberá reclasificarse de acuerdo con los calificativos de la tabla 11.

Tabla 11. Calificativos para estimar el riesgo de incendios

| Probabilidad | Riesgo | Calificativo |
|----------------|--------|--------------|
| 0 – 0.000001 | 1 | Muy bajo |
| 0.000002 - 025 | 2 | Bajo |
| 0.26 – 0.50 | 3 | Moderado |
| 0.51 – 0.75 | 4 | Alto |
| 0.76 - 1 | 5 | Muy Alto |

Fuente: Adaptado de Ordoñez y Martínez, 2003.

Indicadores para analizar Zonas de Vida.

Las zonas de vida son de interés para analizar el manejo agropecuario y forestal, ya que constituyen un factor limitante. El indicador para este elemento está constituido por los montos de lluvia registrados para cada zona.

Los parámetros de biotemperatura y altitud no se consideran como limitantes, ya que si se encuentran especies agrícolas y forestales estas se pueden recomendar para un manejo adecuado o bien, un cambio de uso si fuera necesario.

Por lo anterior, según la zona de vida y la cantidad de lluvia registrada en cada una se procede a establecer cinco calificativos con su respectivo peso asignado, según se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Calificativos para estimar las zonas de vida vrs lluvia

| Categoría | Lluvia | Peso asignado | Calificativo |
|-----------|----------|---------------|--------------|
| bh_MB | Muy baja | 1 | Muy bajo |
| bh_P | Baja | 2 | Bajo |
| bh_T | Baja | 2 | Bajo |
| bmh_M | Moderada | 3 | Moderado |
| bmh_MB | Moderada | 3 | Moderado |
| bmh_P | Alta | 4 | Alto |
| bp_M | Alta | 4 | Alto |
| bp_MB | Muy Alta | 5 | Muy Alto |
| bp_P | Muy Alta | 5 | Muy Alto |

Fuente: Adaptado de Sogreah Ingenierie SNC-Gómez, Cajiao y Asociados S.A. -Sinergia 69 S.A (1999).

Variables socioeconómicas.

El análisis socioeconómico se debe realizar considerando/as las variables con incidencia en el aprovechamiento de los recursos presentes en la cuenca, por ello se analizarán las divergencias de uso de la tierra mediante una comparación entre las capacidad de uso y el uso que se da en un determinado periodo, esto permitirá establecer los conflictos por el uso de la tierra. Posteriormente se analiza el uso de la tierra de dos periodos para obtener un modelo de proyección de cambios en el uso de la misma.

Posteriormente, se debe realizar un análisis de la evolución de la población, así como de la productividad agropecuaria de la cuenca, resaltando la importancia del desarrollo de infraestructura vial como un factor decisivo en la presencia de transformaciones espaciales.

El análisis socioeconómico se complementará con la revisión y el análisis de la información existente, a través de fuentes secundarias como: imágenes satelitales, fotográficas, censos, estimaciones y proyecciones de población, documentos, monografías, tesis de grado, revistas y libros; después se debe validar la información secundaria con trabajo de campo.

A continuación, se explican cada una de las variables socioeconómicas consideradas para esta investigación.

Divergencias de uso de la tierra.

Para obtener las divergencias de uso se comparará la capacidad de uso de la tierra de la cuenca con el uso actual. Siguiendo a Sogreah Ingenierie SNC-Gómez, Cajiao y Asociados S.A. – Sinergia 69 S.A, (1999), para llevar a cabo el análisis y lograr caracterizar las divergencias de uso y su consecuente ordenamiento territorial, la capacidad de uso ha sido interpretada según los usos más apropiados de cada categoría, en la siguiente forma:

CATEGORÍAS

| DE CAPACIDAD DE USO | SIGNIFICADO |
|------------------------|---|
| I y II | Cl : Tierras cultivables, sin tratamientos especiales de conservación |
| III | Clc : Tierras cultivables, pero que requieren tratamientos de conservación de suelos |
| IV: | SAF : Tierras para sistemas agroforestales |
| VIe | SP : Tierras para cultivos perennes o sistemas silvopastoriles |
| VIse: | SF : Tierras para cultivos perennes o reforestación comercial |
| VIIe, VIIse, VIIsep: | F : Manejo forestal, regeneración natural. |
| VIIId, VIIIe, VIIIse: | BP : Bosques de protección |
| AP: | AP : Áreas protegidas (por legislación especial) |
| AU | AU : Áreas urbanas |

En la tabla 13 se ajustan los criterios de cada una de las divergencias de uso de la tierra, además se muestra la relación entre los usos actuales y la capacidad de uso de las tierras; a lo interno de la tabla se indica el tipo de divergencia y en la simbología se explican los significados de cada columna.

Tabla 13. Criterios para categorizar divergencias de uso de la tierra.

| CATEGORÍAS DE USO ACTUAL | CATEGORÍAS DE CAPACIDAD DE USO | | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----|----|----|----|----|----|----|
| | Cl _s | Cl _c | SAF | SP | SF | F | BP | AP | AU |
| Cultivos Anuales (Cl) | W | Wt | O | O | Ot | Ot | Ot | Ot | U |
| Cultivos Perennes (Csl) | W | Wt | O | Wt | Wt | O | Ot | Ot | U |
| Pastos (P) | U | U | W | Wt | O | O | Ot | Ot | U |
| Bosque Natural (BN) | U | U | U | U | U | W | W | W | U |
| Charral (Rpm) (Rastrojos) | U | U | U | U | U | W | W | W | U |
| Tierras misceláneas (uso mixto) | O | O | O | O | O | O | O | Ot | W |

Fuente: Sogreah Ingenierie SNC - Gómez, Cajiao y Asociados S.A. -Sinergia 69 S.A (1999).

La tabla 14 describe el símbolo y el criterio de definición de la divergencia con el respectivo peso asignado.

Tabla 14. Símbolo y criterio de definición según peso asignado

| Símbolo | Criterios de definición | Peso asignado |
|---------|--|---------------|
| W | Utilización dentro de su capacidad, no siendo necesarios tratamientos de conservación | 1 |
| Wt | Utilización dentro de su capacidad, pero con necesidad de tratamientos de conservación | 2 |
| U | Sub-utilizados | 3 |
| O | Sobreexplotado | 4 |
| Ot | Gravemente sobreexplotado | 5 |

Fuente: Sogreah Ingenierie SNC - Gómez, Cajiao y Asociados S.A. -Sinergia 69 S.A (1999).

Para interpretar apropiadamente las categorías de divergencias de uso de la tierra, se indican los siguientes criterios: la utilización dentro de la capacidad de uso sin necesidad de tratamientos adicionales de conservación (W) se presenta cuando el uso actual de la tierra es compatible con su capacidad de uso, en donde además las tierras no presentan problemas de conservación de suelos; por ejemplo, cultivos anuales en tierras de Clase I, II, III o IV, bajo prácticas de conservación de suelos apropiadas.

La utilización de la tierra dentro de su capacidad de uso, pero con necesidad de tratamientos de conservación de suelos (Wt) ocurre cuando el uso actual de la tierra es también compatible con su capacidad de uso, pero las tierras requieren obras complementarias de conservación de suelos por problemas de erosión.

El subuso o subutilización (U) se da cuando el uso actual es menos intenso que su capacidad de uso; por ejemplo, pastos en tierras de capacidad de usos I, II, III o IV.

El uso sobreexplotado (O) ocurre cuando el uso actual de la tierra es más intenso que su capacidad de usos; por ejemplo, cultivos anuales en tierras de Clase VI.

El uso gravemente sobreexplotado (Ot) se presenta cuando ocurre un uso intensivo en tierras muy frágiles; por ejemplo, cultivos anuales en tierras de Clases VII u VIII.

Cambios de uso de la tierra.

Está orientado al constante problema de la transformación acelerada de la tierra, por ello se tratan de modelar los cambios de manera que permita proyectar su curso en el futuro y evaluar sus implicaciones en el cambio del hábitat y la biodiversidad. Se trata de analizar cinco aspectos fundamentales mediante el análisis estadístico y de regresión logística, aplicando el módulo Land Change Modeler del SIG Idrisi.

Para lo anterior, el modelo requiere estimar cinco aspectos:

- Analizar cambios anteriores de cubierta de terreno,
- modelar el potencial para transiciones de terreno,
- predecir el curso de cambios en el futuro,
- evaluar sus implicaciones para la biodiversidad y
- evaluar intervenciones de planificación para mantener la sustentabilidad ecológica.

Uso de las tierras.

El uso de la tierra es de vital importancia para analizar el comportamiento y la modificación antrópica del ambiente natural de la cuenca para dar oportunidad a las actividades socioeconómicas.

Para ello se deben analizar imágenes de satélite y fotografías aéreas. Las fuentes disponibles son las imágenes de los sensores LandSat y Aster, que se complementarán con fotografías aéreas. El resultado de la interpretación se debe cubrir con las siguientes categorías de uso de la tierra: Bosque primario, 2. Bosque secundario, 3. Manglar o Humedal, 4. Charral y tacotal, 5. Plantación Forestal, 6. Pastos, 7. Pastos con árboles, 8. Cultivos

permanentes, 9. Cultivos anuales, 10. Uso mixto, 11. Terreno descubierto, 12. Área urbana, 13. Cuerpos de agua 14. Otras tierras.

Lo anterior permitirá obtener la dificultad del cambio de uso, para lo cual se debe realizar hacer una categorización y relacionar la extensión de uso según lo establecido en la tabla 15, en la que se excluyen las áreas urbanas, así como las áreas protegidas que están creadas por Ley o Decreto Ejecutivo, ya que las mismas tienen su propia categoría de manejo o su plan de gestión.

Se consideran cinco categorías, la cuales van desde *Muy baja dificultad* a *Muy alta dificultad* de cambio, asignándoles calificativos de uno a cinco.

Tabla 15. Calificativos para estimar la dificultad del cambio según uso la tierra en hectáreas

| Hectáreas | Calificativo | Peso asignado |
|-----------|---------------------|---------------|
| > 50 | Muy Baja Dificultad | 1 |
| 31 – 50 | Baja Dificultad | 2 |
| 11 - 30 | Mediana Dificultad | 3 |
| 6 – 10 | Alta Dificultad | 4 |
| 0 – 5 | Muy Alta Dificultad | 5 |

Fuente: Adaptado de Sogreah Ingenierie SNC - Gómez, Cajiao y Asociados S.A.
- Sinergia 69 S.A (1999).

Indicadores para analizar la población.

Para analizar la población se deben realizar las siguientes actividades:

- Revisar y analizar la información existente a través de fuentes secundarias como: censos, estimaciones y proyecciones de población, documentos, monografías, tesis de grado, revistas y libros.
- Aplicar una guía de entrevista a representantes de asociaciones e instituciones que tienen sede en la cuenca, lo mismo que a actores/actrices con representatividad y ascendencia dentro de la comunidad.
- Elaborar proyecciones y estimaciones de población para el año 2025, con el fin de contar con un horizonte de planeación de 15 años.

Estimación de la tasa de crecimiento de población. Dada la importancia que tienen las migraciones se debe realizar una observación en campo así como un análisis de información de los/las habitantes de la cuenca, ya que existe un número significativo de migrantes nacionales y extranjeros/as en algunos lugares de las cuencas. A partir de esta información se deben calcular tasas de crecimiento usando de la siguiente regresión lineal, mediante la ecuación que se presenta a continuación:

Ecuación 8

$$P_{2009} = P_{2025} / (1+y)^n, \text{ donde } y \text{ es igual a la tasa de crecimiento calculada.}$$

La tasa de crecimiento (TC) se calcula a partir de los resultados de los censos nacionales de población, según las estimaciones realizadas por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) referentes a encuestas de hogares.

Para estimar la TC de la población se divide la población final entre la población inicial, al resultado se le extrae la *n*-ésima raíz, es decir, el periodo que se analiza en años; una vez extraída la raíz se multiplica por 100, y a este resultado se le resta 1. La ecuación 9 se usará para dicha tasa.

Ecuación 9

$$TC = [100(n\sqrt{(P_f/P_i)})] - 1$$

En donde:

TC: Tasa de Crecimiento

Pf: Población Final

Pi: Población Inicial

n: Periodo de análisis en año

Con la información recolectada se calculará un porcentaje de población resultante de los procesos migratorios, este dato permitirá ajustar los totales de población de los distritos de la cuenca.

Lo anterior permitirá realizar comparaciones entre los datos presentados para la cuenca y los datos que se ofrecen a nivel nacional. En algunos casos, se elaboran gráficas comparativas que permiten visualizar las

diferencias que existen entre cantones, distritos y provincias, y entre la cuenca y los datos registrados para todo el país.

Para validar la información secundaria se debe elaborar una guía de entrevistas dirigidas a representantes de instituciones, organizaciones y empresas (ver guía de *entrevistas*).

Estimación de la tasa de natalidad. La tasa de natalidad se refiere al número de nacimientos en un lugar durante un año, y se calcula mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 9

$$TN = \frac{\text{n}^\circ \text{ de nacimientos} \times 1000}{\text{Población total}} = \text{‰}$$

Estimación de la tasa de mortalidad. Se refiere al número de defunciones en un lugar durante un año, y la ecuación para su cálculo es la siguiente.

Ecuación 10

$$TM = \frac{\text{n}^\circ \text{ de defunciones} \times 1000}{\text{Población total}} = \text{‰}$$

Estimación de la densidad de la población. La densidad permite indicar la relación que hay entre la cantidad de personas que viven en un territorio y la extensión de este, y se calcula dividiendo la cantidad de habitantes entre el área en metros o kilómetros cuadrados, o cualquier otra unidad.

Ecuación 11

$$\text{Densidad} = \text{habitantes} / \text{territorio}$$

Una vez establecida la densidad se deben definir cinco categorías, las cuales van desde una densidad *Muy baja*, a *Muy alta*. La tabla 16 muestra los calificativos con sus respectivos pesos asignados.

Tabla 16. Calificativos para estimar la densidad de población

| Habitantes por km ² | Calificativo | Peso asignado |
|--------------------------------|--------------|---------------|
| 0 - 200 | Muy baja | 1 |
| 201 - 400 | Baja | 2 |
| 401 - 600 | Media | 3 |
| 601 - 800 | Alta | 4 |
| 801 - 1.000 | Muy alta | 5 |

Fuente: Adaptado de Sogreah Ingenierie SNC - Gómez, Cajiao y Asociados S.A.
– Sinergia 69 S.A (1999).

A partir de lo anterior se deben elaborar mapas temáticos con los datos sobre la densidad de la población caracterizada, de acuerdo con la información demográfica y económica disponible.

Integración de las variables. El modelo propuesto integra las bases de datos geoespaciales en un SIG, para ello se requiere un algebra de mapas sumativa a partir de los pesos asignados a cada indicador del modelo. Su interpretación debe realizarse según los calificativos propuestos, de manera que entre más alta sea la resultante integrada mayores limitantes existen en la cuenca, por tanto se requiere orientar prácticas para priorizar sobre estos espacios críticos.

En la tabla 17 se muestra la forma de integración matricial de los indicadores, según calificativo y peso asignado.

Tabla 17. Matriz de integración según variable y peso asignado

| Variables | Muy baja | Baja | Media | Alta | Muy alta |
|----------------------------------|----------|------|-------|------|----------|
| | P | E | S | O | S |
| Amenaza ante deslizamientos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Amenaza ante inundaciones | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Limitantes de uso por sismicidad | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Zonas de protección natural | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Riesgo ante incendios forestales | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Manejo agropecuario y forestal | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Divergencias de uso de la tierra | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Cambios de uso y proyecciones | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Conflictos territoriales | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Dificultad del cambio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Fuente: Elaboración propia

El mínimo valor esperado en una sumatoria lineal de las variables alcanza valores de 10 y el máximo de 50, tal como se muestra en la tabla 18. A partir de esta se puede interpretar el resultado y se definen las formas de intervención y atención prioritaria a nivel de microcuencas, por lo tanto se establecen cinco clases con un rango de 10, que van desde *Muy baja* a *Muy alta*.

Tabla 18. Calificativos para definir áreas de intervención y atención prioritaria

| Rango | Calificativos | Peso Asignado | Propuestas de usos |
|---------|---------------|---------------|---|
| 1 - 10 | Muy baja | 1 | Residencia |
| 11 - 20 | Baja | 2 | Agrosilvopastoril |
| 21 - 30 | Media | 3 | Pecuario - Agrícola |
| 31 - 40 | Alta | 4 | Forestal |
| 40 - 50 | Muy alta | 5 | Conservación y protección (presencia de amenazas naturales) |

Fuente: Elaboración propia

Aplicación a un estudio de caso (síntesis)

Aplicación del modelo en la cuenca del río Tuis

Después de plantear la base metodológica se presenta un estudio de caso en el que se aplicó el modelo propuesto. El mismo se aplicó en la cuenca del río Tuis, ubicada en la vertiente del Caribe costarricense.

El resultado obtenido contiene una recomendación sobre los usos de la tierra compatibles con un aprovechamiento racional de los recursos naturales renovables de la cuenca y la conservación de su productividad a largo plazo. La propuesta está dirigida a la identificación de los principales cambios que deben realizarse en el uso de la tierra.

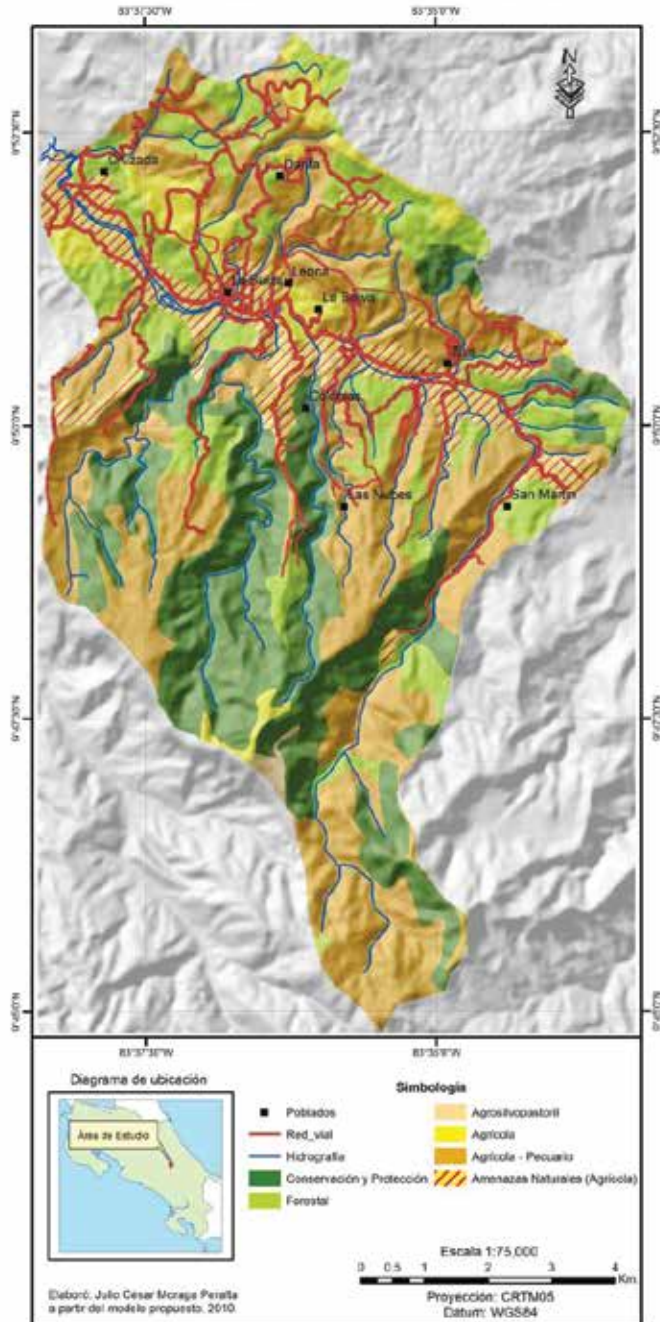
Lo anterior se logró mediante el análisis de la información disponible a través del uso de SIG; además, se estructuró el modelo de datos y se llegó a una propuesta de zonificación de usos de la tierra.

El análisis biofísico se integró a las variables de uso actual de la tierra y de capacidad de uso, que permiten determinar las divergencias de uso, con las cuales se identificaron las áreas subutilizadas, sobre explotadas y gravemente sobre explotadas que dan base para definir las áreas que requieren un cambio de uso o reordenamiento.

La introducción de variables socioeconómicas a través de los rangos y mapas de tenencia de la tierra, densidad de población, productividad agropecuaria y forestal, así como las zonas de vida, permitieron identificar las limitantes de cambio de uso, que, mediante la superposición de capas en el SIG, delimitan las áreas con diferentes grados en cuanto a la dificultad de cambio o reordenamiento.

La propuesta de usos de la tierra para el OT (mapa 1), que consistió en delimitar las zonas a través de los criterios propuestos en el modelo. Es importante resaltar que a cada categoría de uso propuesto se le asignaron recomendaciones para orientar las prácticas de uso.

Figura 2. Cuenca del río Tuis propuesta de uso de la tierra



Conclusiones

Recapitulando se aplicó el modelo propuesto y se introdujo el concepto de OT aplicado a cuencas, además, la estructura de la base de datos permitió modelar y crear escenarios propicios para el ordenamiento, sugiriendo alternativas para realizar cambios en el desarrollo de las prácticas de uso de la tierra.

Asimismo, se transformaron los datos iniciales bajo procedimientos controlados para generar análisis espacial, realizando sobreposición, álgebras de coberturas, correlaciones y comparaciones de los resultados

Es importante señalar el procesamiento de los datos puede variar según el tipo de indicador, pero en términos generales la metodología del modelo permite llegar a los resultados sin dificultades. También cabe destacar que los procesamientos en el SIG están directamente relacionados con los objetivos propuestos.

Muchos de los datos procesados no requieren tratamientos complicados, sino procedimientos directos para clarificar la variable de interés que se esté procesando, por lo tanto es importante crear un buen modelo cartográfico para no perder de vista el objetivo que se persigue, esto permitirá extraer conclusiones válidas.

Finalmente recomiendo el uso del modelo en otras cuencas del país, siempre y cuando se logren obtener con precisión los insumos requeridos. En la actualidad se está utilizando el modelo en otra cuenca de mayor extensión para lograr un mejor ajuste de las variables.

Referencias

- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (1978). Ley de Planificación Urbana N° 4240.
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (2001). Ley de Planificación Nacional N° N° 5525.
- Bases conceptuales y guía metodológica para la formulación y elaboración del plan de ordenamiento territorial municipal. (s. f.). Recuperado de: http://rangeland.tamu.edu/bolivia/pdf_spanish/Guia%20Municipal-urbano.pdf
- Centro de Derecho Ambiental y de los Recursos Naturales, CEDARENA. (2004). *La situación de manejo de cuencas en Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo, INVU (2005). *Manual para Procedimientos para Redacción y Elaboración de Planes Reguladores*. Mimeografiado.
- Mora, R., Vahrson, W.G. y Mora, R. (1992). *Amenaza ante deslizamientos*. Mimeografiado. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica.
- Obregón, M. T. (2010). *Plan Nacional de Desarrollo 2011-2014 Costa Rica*. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. San José, Costa Rica. MIDEPLAN. Recuperado de: <http://www.casapres.go.cr/web/docs/plannacional.pdf>
- Ordoñez, C. y Martínez, R. (2003). *Sistemas de Información Geográfica*. Aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de los riesgos naturales y problemas medioambientales. México: Editorial ALFA OMEGA.
- Roviralta, G. (1990). *Manual Sobre la Preparación de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Para Afrontar la Situación de Emergencia*. San José, Costa Rica. OPS/OMS.
- Sogreah Ingenierie SNC-Gómez, Cajiao y Asociados S.A. – Sinergia 69 S.A, (1999). *Plan General de Ordenamiento Territorial y Manejo Integral de los Recursos Naturales de la Cuenca del río Reventazón*. San José, Costa Rica.
- Vahrson, W.G. y Mora, R. (1990) *Amenaza ante deslizamientos*. Mimeografiado. Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional.