



Modelación del uso de la tierra para orientar el ordenamiento territorial en la sub cuenca del Río Copán, Honduras

ROVELL IVÁN GUILLEN ZELAYA

**CATIE**

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN  
ESCUELA DE POSGRADUADOS

Plataforma Comemorativa  
ORFON - IGA - CATIE  
17 DIC 2002  
**RECIBIDO**  
Turrialba, Costa Rica

**Modelación del uso de la tierra para orientar el  
ordenamiento territorial en la sub-cuenca del Río Copán,  
Honduras**

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Postgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y  
la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza como requisito parcial  
para optar al grado de:

*Magister Scientiae*

*en Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas*

Por

**ROVELL IVÁN GUILLÉN ZELAYA**

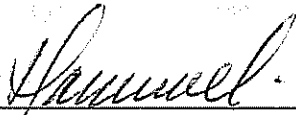
Turrialba, Costa Rica

2002

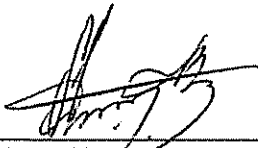
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

**MAGISTER SCIENTIAE**

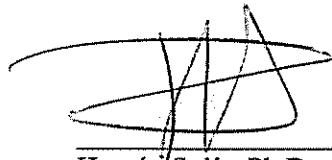
**FIRMANTES:**



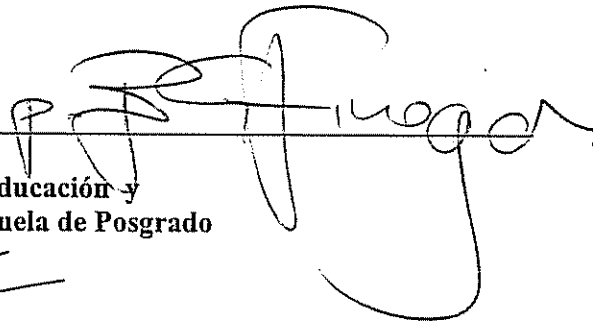
Jorge Faustino, Ph.D.  
**Consejero Principal**



Sergio Velásquez, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



Hernán Solís, Ph.D.  
**Miembro Comité Consejero**



Ali Moslemi, Ph.D.  
**Director Programa de Educación y  
Decano de la Escuela de Posgrado**



Rovell Guillén Zelaya  
**Candidato**

## **DEDICATORIA**

A mi hijo, Max Ernesto, por llegar a mi vida y llenarla de plena felicidad, y ser la inspiración para hacer mi máximo esfuerzo hoy y siempre.

A Jenny, por su amor y gran apoyo en todo momento, por significar para mí mucho más que eso.

A mis padres, Iván y Leydi a quienes honro y espero que estén orgullosos por un nuevo triunfo.

A mis hermanos Edwin, Erick y Leydi y sobrinos Iván y Anthony con quienes comparto alegremente mi logro.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por brindarme la vida y permitirme la oportunidad de concluir con bien mis estudios.

A FOCUENCAS por el financiamiento de mis estudios.

A mi comité asesor por sus acertados e invaluable aportes para el desarrollo de esta investigación.

A la Escuela de Posgraduados por seleccionarme para ser parte de la comunidad del CATIE.

Al Sr. Emilio Villela, Alcalde Municipal de Santa Rita y Presidente de la Mancomunidad del Río Copán, por su apoyo pleno para el desarrollo de la investigación.

A los Señores Francisco López, Director Ejecutivo de la Mancomunidad, Leonidas Alemán miembro de la Unidad Técnica Municipal de Santa Rita y especialmente al señor Miguel Ángel Dubón, representante de COHDEFOR, por su apoyo logístico y por su valiosa información para la realización de esta investigación.

A todos los representantes, líderes comunales que participaron en los talleres y personas que fueron entrevistadas en sus comunidades y colaboraron para la obtención de los datos utilizados en la investigación.

A mi amigo turrialbeño Geovanny.

Al personal técnico y administrativo del CATIE, por brindar su colaboración.

A todos muchas gracias y que Dios los bendiga.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	Objetivo General.....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
1.2	HIPÓTESIS.....	14
<b>2</b>	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	GENERALIDADES DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	15
2.2	ENFOQUE DE MANEJO DE CUENCAS.....	15
2.3	USO DEL SUELO Y EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN HONDURAS.....	17
2.4	LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN.....	18
2.4.1	Aplicaciones de los sistemas de información geográfica.....	18
2.4.2	Experiencias con la aplicación de SIG en el manejo de recursos naturales.....	19
2.5	MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL.....	20
2.5.1	Experiencias con modelos de programación lineal en el manejo de los recursos naturales.....	21
<b>3</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	22
3.1.1	Aspectos Biofísicos.....	22
3.2	METODOLOGÍA.....	28
3.2.1	Recopilación de información.....	29
3.2.2	Levantamiento de la encuesta socioeconómica.....	29
3.2.3	Determinación de la cobertura y uso actual del suelo.....	31
3.2.4	Determinación de las unidades de tierra homogénea.....	33
3.2.5	Construcción del modelo de programación lineal.....	33
3.2.5.1	Definición de las actividades.....	34
3.2.5.2	Definición de las restricciones.....	34
3.2.5.3	Definición de la función objetivo.....	34
3.2.5.4	Proceso de optimización de la sub-cuenca.....	35
3.2.6	Modelación del escenario base.....	35
3.2.6.1	Parametros considerados para la elaboración del modelo.....	35
3.2.7	Elaboración de mapas.....	49
3.2.8	Análisis de los escenarios.....	49
3.2.9	Análisis de conflictos con base al ordenamiento territorial.....	50

<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>51</b>
4.1.1	Condiciones actuales del sistema .....	51
4.1.2	Proceso de optimización.....	53
4.1.3	Generación del escenario base.....	56
4.1.4	Análisis de conflictos de uso de la tierra .....	62
4.1.4.1	Conflictos entre el uso actual y el escenario base .....	62
4.1.4.2	Conflictos entre ordenamiento territorial propuesto y uso actual .....	65
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>67</b>
5.1	CONCLUSIONES.....	67
5.2	RECOMENDACIONES.....	68
<b>6</b>	<b>LITERATURA CONSULTADA.....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE ANEXOS

### ANEXOS A

1A	Mapa de accesibilidad sub-cuenca del Río Copán.....	74
2A	Mapa restricciones Legales, sub-cuenca del Río Copán.....	75
3A	Mapa de suelos, sub-cuenca del Río Copán.....	76
4A	Mapa de zonificación, sub-cuenca del Río Copán.....	77
5A	Modelo de elevación digital, sub-cuenca del Río Copán.....	78
6A	Mapa de pendientes, sub-cuenca del Río Copán.....	79
7A	Unidades de tierra homogénea, sub-cuenca del Río Copán.....	80

### ANEXOS B

1B	Modelo general para el diseño del escenario base.....	81
2B	Formulas utilizadas para el cálculo de captura de carbono.....	89
3B	Categorías de ordenamiento territorial, sistema PLOTEUS .....	90

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de uso del suelo en la sub-cuenca del Río Copán.....	27
Tabla 2. Tasa de erosión anual por tipo de uso del suelo .....	36
Tabla 3. Rangos de pendiente y erosión por uso del suelo.....	37
Tabla 4. Número de curva para el cálculo del escurrimiento .....	41
Tabla 5. Aporte de agua al caudal por uso de la tierra, sub-cuenca del Río Copán .....	47
Tabla 6. Datos de cuantificación del carbono almacenado en bosque sin uso.....	48
Tabla 7. Resumen de encuesta socioeconómica, situación actual de la sub-cuenca Río Copán.....	52
Tabla 8. Escenario Base, resultados obtenidos del proceso de maximización.....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama metodológico simplificado. ....	28
Figura 2. Secuencia metodológica de la investigación.....	30
Figura 3. Esquema metodológico para la obtención del factor S.....	42
Figura 4. Definición del factor P de la fórmula de precipitación de esorrentía.....	43
Figura 5. Ejemplo de operaciones para obtener la precipitación de esorrentía. ....	44
Figura 6. Ingreso porcentual uso actual, sub-cuenca del Río Copán.....	53
Figura 7. Comparación de ingresos totales entre EB y UA, sub-cuenca Río Copán .....	55
Figura 8. Ingreso mensual por zona latitudinal (PEA), EB; sub-cuenca Río Copán.....	55
Figura 9. Áreas de uso de la tierra propuestas por el modelo de optimización.....	58
Figura 10. Análisis de conflictos de uso entre EB y UA, sub-cuenca del Río Copán.....	62
Figura 11. Uso de la Tierra entre EB y UA, sub-cuenca del Río Copán .....	64
Figura 12. Análisis de conflictos de uso entre OT y UA, sub-cuenca del Río Copán.....	65



## LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación de la sub-cuenca del Río Copán, Honduras.....	23
Mapa 2. Vulnerabilidad, sub-cuenca del Río Copán.....	26
Mapa 3. Uso actual, sub-cuenca Río Copán .....	32
Mapa 4. Caudales promedio, sub-cuenca del Río Copán .....	45
Mapa 5. Escenario base, sub-cuenca del Río Copán.....	59
Mapa 6. Ordenamiento territorial, sub-cuenca del Río Copán .....	61
Mapa 7. Conflictos de uso entre EB y UA, sub-cuenca del Río Copán .....	63
Mapa 8. Conflictos de uso entre OT y UA, sub-cuenca del Río Copán .....	66

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

AFE - COHDEFOR	Administración forestal del Estado, Corporación Hondureña de Desarrollo Forestal.
CCAD	Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo.
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical.
CIEF – COHDEFOR	Centro de Información y Estadísticas Forestales.
ESRI	Environmental Systems Research Institute.
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations.
GAMS	General Arithmetical Modeling System.
IGN	Instituto Geográfico Nacional.
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
NCGIA	National Center for Geographic Information and Analysis.
PLOTEUS	Plan de Ordenamiento Territorial y Uso del Suelo.
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
PROCUENCA	Programa de Manejo de los Recursos Naturales Renovables de la Cuenca del Embalse El Cajón.
SCS	Servicio de Conservación de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

## ABREVIATURAS

AF	Aprovechamiento forestal
BsU	Bosque sin uso
C	Café
EB	Escenario base
F1	Frijol siembra de primera
F2	Frijol siembra de postrera
ha	Hectárea
IMA	Incremento medio anual
M	Matorrales o guamil
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mz	Manzanas
NC	Número de Curva
P	Pastizales
PEA	Población económicamente activa
PL	Programación lineal
OT	Ordenamiento Territorial
SIG	Sistemas de Información Geográfica
ton	Toneladas
UA	Uso actual
UTH	Unidades de tierra homogénea

Guillén, R. 2002. Modelación del uso de la tierra para orientar el ordenamiento territorial en la sub-cuenca del Río Copán, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 90 p.

*Palabras clave:* programación lineal, GAMS, SIG, modelación, ordenamiento territorial, uso de la tierra, optimización, conflictos de uso, escenario base, uso actual.

---

## RESUMEN

El diseño de estrategias para el uso de la tierra debe considerar diversos aspectos; sociales, políticos, económicos, ambientales, culturales, etc. Con base en esto, si se toma a la cuenca hidrográfica como unidad de planificación es importante generar diferentes opciones o escenarios para el manejo de estas áreas, ya que la situación que se encuentra en la realidad es diferente para cada zona en particular.

El presente estudio consistió en la modelación del uso de la tierra en la sub-cuenca del Río Copán, zona occidente de Honduras. Se utilizó programación lineal y sistemas de información geográfica para la elaboración de un modelo el cual integró variables socioeconómicas y biofísicas de la sub-cuenca con base en la situación actual, incluyendo restricciones de tipo ambiental que limitan el uso de la tierra. Con esto se maximizó el ingreso neto de la sub-cuenca y a la vez se minimizaron los daños que causan las actividades productivas.

Como resultado de la modelación, se obtuvo un ingreso neto de L 5 579 017 371.82 un 43.8% mayor que en las condiciones actuales del sistema, el ingreso mensual por zona altitudinal para la Población Económicamente Activa (PEA), fue de L 4584.56 en la zona baja y de L 2286.33 en la zona alta.

En el escenario base, el bosque sin uso, pasto y las áreas de matorral o guamil disminuyen en su totalidad con respecto al uso actual. En el caso del café, este disminuye en un 78.2%, el bosque para aprovechamiento forestal aumentó un 34.2% y el área para el cultivo de granos básicos aumentó un 21.3%.

Con el análisis de conflictos de uso de la tierra entre el escenario base modelado y el uso actual se determinó que existe un 75.43% de zonas en conflicto, para el uso correcto fue de 24.57%.

Se realizó también un análisis de conflictos entre el uso actual y el ordenamiento territorial propuesto, el cual tomo como base el escenario modelado integrando a estas restricciones legales establecidas en la ley forestal de Honduras. Este análisis muestra un 36.56% de la sub-cuenca con uso correcto y un 63.44% en conflicto de uso.

Guillén, R. 2002. Land use modeling with a guide for the territorial ordering, Copán River sub-basin, Honduras. Thesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 90 p.

*Keywords:* linear programming, GAMS, GIS, modeling, territorial ordering, land use, optimization, land use conflicts, base scenario, current use.

---

## **ABSTRACT**

The design of strategies for land use should consider several aspects: social, political, environmental, cultural, etc. In this order of that, if the watershed is taken as a planning unit, it is very important to generate different options or scenarios for the management of these areas, because of the situation encountered in reality differs from every particular zone.

The present study consisted in modeling land use in "Copán" River sub-watershed, in the western side of Honduras. Linear programming and Geographic Information Systems were used for the elaboration of a model, integrating socio-economic and biophysical variables of the sub-watershed in based on the current situation. It maximized the net profits of the basin and minimized the damaged caused by productive activities, including environmental restrictions that limit the land use.

As a result of this modeling, a net profit of L 5 579 017 371.82 was obtained, a 43.8% greater than current conditions of the system, the monthly profit by altitudinal zone for the Economically Active Population (EAP) was L 4584.56 downstream and L 2286.33 in upstream.

Regarding current land use the base scenario, the unused forest, pastures and heath areas diminished in totally. In case of the coffee, it diminished in 78.2%, the harvesting forest increased 34.2% and the cropland of basic grains increased 21.3%.

Finally the analysis of land use conflicts realized between the base modeled scenario and the current use determined that there is 75.43% conflict zones; on the other hand, the correct use was 24.57%.

In addition a conflicts analysis between the current use and the territorial ordering proposed by base scenario and legal restrictions established in the forest law from Honduras was carried out. This analysis showed 36.56% of the sub-watershed in correct use, and the remaining 63.44% in conflict use.

## 1 INTRODUCCIÓN

La degradación de las tierras tiene su raíz en factores económicos, sociales y culturales, que se traducen en la sobreexplotación de los recursos y en las prácticas inadecuadas del manejo de los suelos y aguas, que conllevan a la pérdida de la fertilidad del suelo y consecuentemente de su productividad, causando una reducción de los rendimientos de la producción agropecuaria, afectando la calidad de vida de las generaciones actuales y futuras (FAO, 2001).

El suelo es un recurso limitado y no renovable, siendo el incremento de la población humana el que establece la presencia de conflictos en torno a su utilización, manejo y aprovechamiento. Es de suma importancia la búsqueda de un manejo adecuado del territorio tratando de armonizar la gran diversidad de tipos de tierras y los usos a que éstas son sometidas, teniendo como objetivo la optimización de la producción de forma sostenible y la satisfacción de diversas necesidades de la sociedad en general, además de la conservación de aquellos ecosistemas frágiles y la herencia genética (FAO, 1994).

La disponibilidad oportuna de información confiable y significativa sobre los potenciales y las limitaciones de los recursos naturales, es un prerrequisito para la planificación y el manejo integrado de los mismos. En particular, la información sobre diversas opciones de los usos de las tierras es de vital importancia para poder planificar un desarrollo silvoagropecuario sostenible y, por consiguiente, lograr la conservación de los recursos naturales (FAO, 2001).

Tomando como base esta problemática se considera necesario formular diferentes alternativas para la utilización del recurso suelo que busquen mejorar las condiciones económicas de los productores. Estas alternativas pueden ser generadas a través de la simulación de escenarios que permitan maximizar los ingresos netos de la sub-cuenca del Río Copán basados fundamentalmente en la aptitud del suelo y las diferentes variables socioeconómicas que caracterizan la zona de estudio, que a la vez repercutan en un manejo adecuado que conlleve a la planificación del ordenamiento territorial en pro del mejoramiento ambiental de la sub-cuenca.

En Honduras, durante varios años han sido aplicadas metodologías de clasificación de tierras por capacidad de uso para la recomendación de usos que permitan desarrollar íntegramente el contexto de una cuenca hidrográfica. No obstante, en la práctica los resultados no han sido tan exitosos, un bajo nivel del enfoque socioeconómico, y tomar como base casi exclusivamente los elementos biofísicos, son algunas de las razones por las cuales estos métodos no han tenido el impacto positivo esperado.

Por años, la planificación del territorio en la región se ha realizado sin una mirada integral, desarrollando ésta, sin un conocimiento más profundo de los recursos del suelo, del subsuelo y el incremento de los impactos en la calidad del aire y las aguas, o los peligros de levantar poblaciones en zonas de riesgo. Además mucha de la información existente se encuentra disgregada en distintas instituciones centrales, regionales y locales. Por esta razón, se ve la necesidad de armonizar el uso de la tierra, mediante la planificación del uso de la misma, partiendo de una evaluación sistemática del potencial de la tierra y el agua, de las alternativas de su aprovechamiento, manejo, utilización y de las condiciones económicas y sociales que permitan orientar la búsqueda, selección y adopción de las mejores opciones (FAO, 1985, 1994).

En el presente estudio se modelaron diferentes escenarios de uso del suelo, concatenando aspectos tanto de orden biofísico como socioeconómico, mismos que condicionan el manejo y uso de los recursos naturales de la sub-cuenca del Río Copán, aplicando parte de metodologías ya desarrolladas en otras investigaciones realizadas en el país, además de la integración de nuevas variables, mediante la utilización de sistemas de información geográfica y programación lineal ambos elementos complementarios para la consecución de los objetivos propuestos en este estudio.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 *Objetivo General***

Modelar el uso de la tierra integrando variables biofísicas y socioeconómicas que permita orientar la planificación del ordenamiento territorial y el manejo de los recursos naturales utilizando programación lineal y un sistema de información geográfica la sub-cuenca del Río Copán.

### **1.1.2 *Objetivos específicos***

- a) Elaborar una propuesta de ordenamiento territorial mediante la modelación del uso de la tierra, que integre las variables biofísicas y socioeconómicas de la sub-cuenca del Río Copán.
- b) Aplicar una metodología de modelación mediante Programación Lineal y de Sistema de Información Geográfica (SIG) que maximice el ingreso neto, y optimice el uso de la tierra en la sub-cuenca del Río Copán.
- c) Establecer la relación que se presenta entre el escenario base, el ordenamiento territorial propuesto y las condiciones actuales de la sub-cuenca, mediante un análisis de conflictos de uso de la tierra para la sub-cuenca del Río Copán.

## **1.2 HIPÓTESIS**

Es posible, utilizando metodologías de modelación (programación lineal) y sistemas de información geográfica, generar escenarios de uso de la tierra que permitan la integración de las características biofísicas (aptitud del suelo) y actividades socioeconómicas que condicionan la producción y el manejo del recurso tierra en la sub-cuenca del Río Copán.



## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GENERALIDADES DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

La cuenca hidrográfica es todavía un término que para muchas personas crea un poco de confusión. Por tal motivo, es posible escuchar comentarios tales como: “la cuenca se ha desbordado”, o “la cuenca se ha secado” cuando el término correcto sería el río se ha desbordado (Rivera, 1998). Una cuenca hidrográfica se define como una área geográfica drenada por un río. Ésta es un área que posee límites naturales y en donde al caer la precipitación, las aguas superficiales y subterráneas son conducidas hacia una red natural que confluye en un cauce común. Profundizando detenidamente en la definición, se observa que la palabra clave es área (Carapayca, 1992; Cubero, 1996; Rivera 1998).

El río es solamente un elemento de la cuenca, pero es el elemento más importante de la misma, ya que es el elemento integrador, el que produce la conexión: aguas arriba y aguas abajo. En otras palabras, a través del río ocurre el efecto de que lo que hagamos aguas arriba tenga repercusión, positiva o negativa (llámese impacto) en la parte baja de la cuenca (Rivera, 1998). Esto implica que todas las actividades productivas y/o recreativas que se efectúen dentro de esta área deberán considerarse como factores que alteran la cantidad y calidad del agua. Entonces, el manejo de una cuenca hidrográfica, es la administración de los recursos naturales en conjunto de una área, usando la cuenca hidrográfica (que es un área geográfica) como la unidad de planificación (Faustino, 1997 citado por Rivera 1998).

### 2.2 ENFOQUE DE MANEJO DE CUENCAS

Manejar las cuencas es administrar todos los recursos naturales (bosque, tierras agrícolas, poblaciones humanas, fauna, hombre, minería, agua, etc.), enmarcados en esta unidad de planificación. Pero, ¿por qué usar la cuenca como unidad de planificación y no los límites políticos y administrativos (departamentales y municipales) ya existentes? Varios autores, entre ellos Richter (1995), hacen mención de que “la cuenca hidrográfica es la unidad de planificación con coherencia lógica natural, porque cumple con dos grandes principios: *homogeneidad y funcionalidad*”. La primera se refiere a que todos los elementos biofísicos y socioeconómicos de una cuenca están asociados y tienen una gran similitud entre sí, y el segundo a que existe una interrelación muy estrecha entre lo que pasa en las montañas (parte alta de las cuencas) y lo que sucede en los valles

(parte baja de las cuencas). De esta forma, la cuenca hidrográfica posee una mejor relación entre el contexto ambiental y el desarrollo socioeconómico que el resto de unidades territoriales.

Las tendencias actuales de desarrollo conciben la cuenca hidrográfica como la unidad básica de planificación para el manejo de los recursos naturales, pero no solamente como un elemento geográfico, sino que también se considera que acoge poblaciones humanas que hacen uso de los recursos que en ella existen o se producen (Herz, 1994).

Al hablar de manejo de cuencas, en los últimos años, algunos expertos en desarrollo han utilizado básicamente tres conceptos relevantes: el manejo de cuencas, el uso potencial del suelo y el ordenamiento territorial. El manejo de cuencas consiste en lo que los científicos denominan el uso potencial de la tierra en la cuenca y las autoridades buscan la forma de adaptar el uso real al uso potencial mediante el ordenamiento territorial.

El manejo de cuencas hidrográficas se puede definir como: “la gestión que el hombre realiza a través de la cuenca para aprovechar, proteger, y conservar los recursos naturales que le ofrece, con el fin de obtener una producción óptima y sostenida para una calidad de vida acorde a sus necesidades” (Faustino, 1998).

Por medio de una planificación adecuada del manejo de cuencas, es posible controlar y revertir la degradación de los recursos naturales, mitigar la pobreza en áreas rurales y solventar conflictos de orden ambiental. La planificación debe ser fundamentada básicamente en función de los usuarios, recursos disponibles y sus medios de producción (Rivas, citado por Meléndez y Faustino, 1998).

Una importancia muy particular que presenta una cuenca hidrográfica como unidad de planificación y desarrollo radica primordialmente en que ésta presenta condiciones muy especiales única en su clase como unidad geográfica natural: “El carácter de independencia condicional, por sus límites naturales bien definidos y su constituida dinámica funcional”, misma que se da en primera instancia por los intercambios de sustancias y energías que tienen en la dinámica de los elementos del clima y su fuente vital, “el agua” (González y Rojas, 1996). Es aquí en donde el suelo, agua, aire, fauna y flora se relacionan estrechamente con el paisaje, definiendo de esta manera, aspectos relevantes que pueden ser esenciales al momento de la planificación del uso y manejo de las áreas, tales como: tipos de suelos, volumen persistencia y dirección de aguas superficiales y subterráneas, direcciones e intensidades de vientos, tipos de vegetación, nubosidad, neblina y brillo solar, entre otros. Básicamente, la cuenca hidrográfica es el ámbito en el cual la interacción de los recursos naturales se pueden visualizar y mensurar de forma más clara, sencilla y

fácilmente comprensible para todos los actores (población y técnicos) que interactúan dentro de la misma y hacen uso de los recursos presentes en ella. (Cubero, s.f.).

### 2.3 USO DEL SUELO Y EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN HONDURAS

Actualmente, el entorno general del uso del suelo en la región hondureña se caracteriza por el deterioro y la degradación de las cuencas hidrográficas causadas primordialmente por prácticas inadecuadas de manejo y uso de la tierra (Vargas, 1992).

El territorio hondureño, necesita de forma inminente un plan de ordenamiento territorial. Este se puede hacer tomando diferentes metodologías o preparando una de acuerdo a las necesidades actuales. En la actualidad, si se toma la pendiente del suelo, como el elemento determinante de la *capacidad de uso* de la tierra se observa que, casi el 70% del territorio nacional es de vocación forestal, esto significa que idealmente, estas áreas deberían estar cubiertas de bosque. Por ahora, se tiene que solo el 50% está cubierto de bosque y el resto ya se ha convertido a otros usos de la tierra, como la agricultura y ganadería (Rivera, 1998). De mantenerse esta trayectoria constante, las áreas de bosque disminuirán considerablemente, produciendo un sobre uso de la tierra (ya que la agricultura y ganadería representan usos más intensivos), y consecuentemente un deterioro constante del recurso tierra (Stonich, 1993; Agenda Ambiental de Honduras, 1991). A nivel de cuenca esto se transforma en la pérdida de la fertilidad, erosión de los suelos y el asolvamiento de cauces y represas.

Chávez *et al.*, 1992, menciona que el ordenamiento territorial conlleva una serie de situaciones. A veces cuando es enfocado sobre la conservación de grandes áreas, es necesario analizar muy de cerca el aspecto del desarrollo socioeconómico de las comunidades involucradas, ya que no es posible lograr la conservación total de las áreas sin contar con el mejoramiento socioeconómico de las mismas.

El ordenamiento territorial es un acopio de estrategias que buscan adecuar el uso actual al uso potencial del suelo. En tal sentido el uso adecuado toma en cuenta varios aspectos para obtener el beneficio esperado sin degradar el recurso. El ordenamiento territorial se enfoca en la conservación y valoración del territorio nacional, dándole gran importancia a la protección del medio ambiente y favorecer la expansión económica con base en necesidades socioeconómicas.

En Honduras se ha generado la "Estrategia Nacional de Ordenamiento Territorial" mediante la cual se persigue articular y concertar iniciativas que apunten al uso racional de los recursos

naturales del país y asumir políticas adecuadas de uso, manejo y ocupación nacional en el futuro (Ogata, 2000).

Un elemento determinante en el uso del suelo es la tenencia de la tierra, que en los países de la región centroamericana se caracteriza por el latifundio, un sistema ineficaz e improductivo, y por el minifundio, el cual absorbe la fuerza de trabajo familiar sin repercusión en el margen de ganancias para invertir o mejorar de alguna forma. (Salas, 1987).

Rivas, Citado por Meléndez y Faustino (1998), comenta que “El único que realmente maneja los recursos naturales es el dueño de la propiedad, y que sus motivaciones sobre el manejo por lo general son más económicas que ecológicas”. En tal sentido es importante mencionar que la tecnología y las respuestas que al final interesan son aquellas que presenten un beneficio económico y conlleven paralelamente a la consecución de resultados positivos en el aspecto ecológico. Es aquí donde se considera de suma importancia los intereses económicos de los productores en la planificación del manejo de las cuencas y uso del suelo, en tal sentido, se visualiza la aplicación de modelos de optimización como una herramienta básica para facilitar este proceso.

## **2.4 LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN**

Un sistema de información geográfica (SIG) se puede definir ampliamente como: un sistema de hardware, software y procedimientos diseñado para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y presentación de datos referenciados espacialmente para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión (NCGIA, 1990). Es un conjunto organizado de hardware, software, datos geográficos y personal diseñado para capturar, almacenar, actualizar, manipular, analizar y mostrar eficientemente cualquier clase de información referenciada geográficamente (ESRI, 1992).

### **2.4.1 Aplicaciones de los sistemas de información geográfica**

Existe una gran diversidad en las aplicaciones en un sin número de campos en los que los SIG's pueden ser utilizados, los cuales pueden variar desde la reproducción de mapas hasta la realización de análisis de situaciones presentes, pasadas o futuras de áreas o regiones determinadas.

Una característica importante de un SIG es la alta capacidad de generación de modelos de simulación, predicción, y decisión, que pueden ser utilizados en la elaboración de escenarios (Valenzuela, 1994, citado por Jiménez, 2001).

#### **2.4.2 Experiencias con la aplicación de SIG en el manejo de recursos naturales**

Sáenz *et al.* en 1997, en la cuenca del Río Pacuare en Costa Rica, zona con características tropicales, tomó como unidad de investigación la cuenca hidrográfica y adaptó y realizó pruebas con una metodología cualitativa española, con la finalidad de identificar áreas críticas de degradación, partiendo de la sobreposición de capas de pendiente, geología, grados de protección del suelo, uso actual y capacidad de uso del suelo.

Saborío 1996, hace mención a diferentes aplicaciones que formaron parte del curso regional "La aplicación de los SIG's a la gestión del manejo de cuencas" en Venezuela. Entre estas aplicaciones de tienen:

- Elaboración de mapas para localizar pequeñas áreas para determinados cultivos, aplicando la metodología de evaluación de la FAO, para hacer una proyección de la aptitud de las mismas para 40 años.
- Tomando como base las características físicas del suelo y áreas de accesibilidad próximas a sitios que faciliten el transporte terrestre se generó un modelo de aptitud de áreas para el cultivo del café.
- Metodología para la detección de zonas con uso recomendado, correspondientes a un ordenamiento territorial, comenzando con una metodología de aptitud de suelos y comparando con el uso actual, adicionando condiciones geológicas, nivel de tecnología, riesgo de erosión, tenencia de la tierra, proximidad a centros urbanos y muchos otros que pueden ser agregados según el grado de complejidad que requiera el analista.

En 1998, Barbier y Bergeron simularon el efecto de la presión poblacional, la integración del mercado, el mejoramiento tecnológico y decisiones políticas en el manejo de los recursos naturales en los suelos de ladera de Honduras.

Los modelos de simulación son útiles para comprender, diseñar, predecir y evaluar diferentes opciones de forma rápida y económica, sin detrimento en el desarrollo del sistema. Favorecen al establecimiento de conexiones mutuas entre los componentes de un sistema y pueden

ser expresados con base en los objetivos, funciones, criterios y restricciones (Ramírez y Torres, 1995, citados por Hernández, 2001).

Dentro del campo del manejo de recursos naturales, el cual generalmente tiene una visión a largo plazo, la aplicación de modelos de simulación se convierte en una herramienta fundamental dentro de la planificación y en la toma de decisiones ya que se incorpora la variable tiempo en el análisis de la unidad de producción en base a la función objetivo, entendida ésta como “aquella situación deseable por los productores o centro decisorio” (Estrada *et al.*, 1999).

## 2.5 MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL

El uso de la programación lineal en este estudio forma parte fundamental de su desarrollo. Ésta puede definirse en sentido matemático como “aquella que estudia la optimización (maximización o minimización) de una función lineal sujeta a desigualdades lineales y es la aplicación del álgebra de matrices a la solución de ecuaciones mediante la utilización de algunas reglas que aseguran que la solución satisface todas las restricciones y permite obtener mejores resultados frente al objetivo propuesto” (Estrada *et al.*, citado por Hernández, 2001).

Enfocando los sistemas de producción en una cuenca hidrográfica, los modelos se pueden comprender como la representación simplificada de la cuenca, que siendo distintos, pueden imitar su comportamiento (Aguilar *et al.*, citado por Estrada *et al.*, 1999). “Para que los modelos sean útiles se requiere de una alta correlación entre los efectos previstos por el modelo y lo que sucede en la realidad” (Tragsatec, citado por Jiménez, 2001).

Estrada *et al.*, (1999) asevera que “en la construcción de sistemas de producción más eficientes desde el punto de vista fisiobiológico, económico, social y energético, los modelos de programación lineal han probado ser herramientas de gran utilidad”.

En la actualidad, la utilización de la programación lineal como herramienta de planificación en el sector agrícola ha tomado un gran auge, debido a la generación de programas computarizados los cuales están basados en métodos convencionales. Uno de estos programas es el “General Arithmetical Modeling System” (GAMS), que asocia ideas teóricas de programación matemática y una base de datos relacional, que suministra un sistema estructurado para establecer de forma general los datos a procesar. La programación matemática ayuda a describir un problema y diferentes métodos para resolverlo (Brooke *et al.*, citado por Hernández, 2001).

A juzgar por Estrada *et al* 1999, La programación lineal tiene tanto ventajas como desventajas. Entre las ventajas menciona:

- Permite identificar acciones que conlleven al desarrollo de tecnología de mayor impacto y que genere más ingresos con el fin de mejorar aquellas.
- Ahorro de tiempo para estimar el resultado de combinar varios factores.
- El costo es menor en comparación con métodos estrictamente experimentales.

Entre las desventajas están:

- Por ser lineal, sobreestima los valores, una vez que las variables son numerosas.
- Aún no se logra dar valores confiables y acertados a las variables cualitativas.

### ***2.5.1 Experiencias con modelos de programación lineal en el manejo de los recursos naturales***

En Southern, Illinois, USA, Beautilieu *et al.*, (1998) desarrolló un modelo ecológico-económico, utilizando una integración de programación lineal y sistemas de información geográfica para optimizar el uso del suelo de las fincas, donde también se hizo un análisis del transporte de sedimentos y químicos con la finalidad de generar una estrategia que permitiera utilizar los recursos en una cuenca de esta zona.

Hernández en 1999, utilizando programación lineal y sistemas de información geográfica analizó diferentes escenarios de uso del suelo en la cuenca del río Jalapa en Honduras, donde el escenario con la mejor opción de manejo fue el de pago por servicios ambientales, donde se reduce considerablemente el área de cultivos agrícolas pues éste garantiza el autoconsumo.

Hernández en el 2000, desarrolló un estudio en el cual se simularon 7 escenarios de uso de la tierra en la cuenca del río Choluteca, este estudio integró programación lineal en GAMS con la utilización de SIG. En el estudio se consideraron factores biofísicos como socioeconómicos para comparar la rentabilidad de los diferentes usos de la tierra, definir el uso óptimo del suelo en la cuenca, analizar diferentes modelos de simulación de uso con base en la rentabilidad económica simulada y determinar las limitantes principales para maximizar los ingresos en la cuenca.

Jiménez en el 2000, utilizó la integración de programación lineal y SIG para comparar diferentes opciones de uso de la tierra, integrando los aspectos biofísicos y socioeconómicos que condicionan la producción, el manejo de los recursos naturales e ingresos netos de la cuenca del río Calan en Siguatepeque, Honduras.

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en el occidente de Honduras, dentro del Departamento de Copán, específicamente en la sub-cuenca del Río Copán. Ésta forma parte de la cuenca del Río Motagua (Cuenca binacional, compartida entre Honduras y Guatemala). La sub-cuenca abarca las jurisdicciones municipales de Copán Ruinas, Santa Rita, Cabañas y Concepción.

El área total que comprende la sub-cuenca del Río Copán se estima en 61914.11 hectáreas (ver tabla 1) y cartográficamente se plasma en las hojas de Copán Ruinas, Dulce Nombre, San Fernando y Santa Rosa de Copán, escala 1:50,000 (fuente: IGN).

Se localiza entre las coordenadas siguientes:

Latitud Norte: Entre las 1655200 y las 1627500.

Longitud Oeste: Entre las 260300 y las 297000 (ver mapa 1).

##### 3.1.1 Aspectos Biofísicos

###### a) Topografía

La sub-cuenca del Río Copán presenta una topografía bastante irregular con pendientes fuertes en su mayoría, los rangos altitudinales oscilan entre los 600 y 1600 msnm.

###### b) Climatología

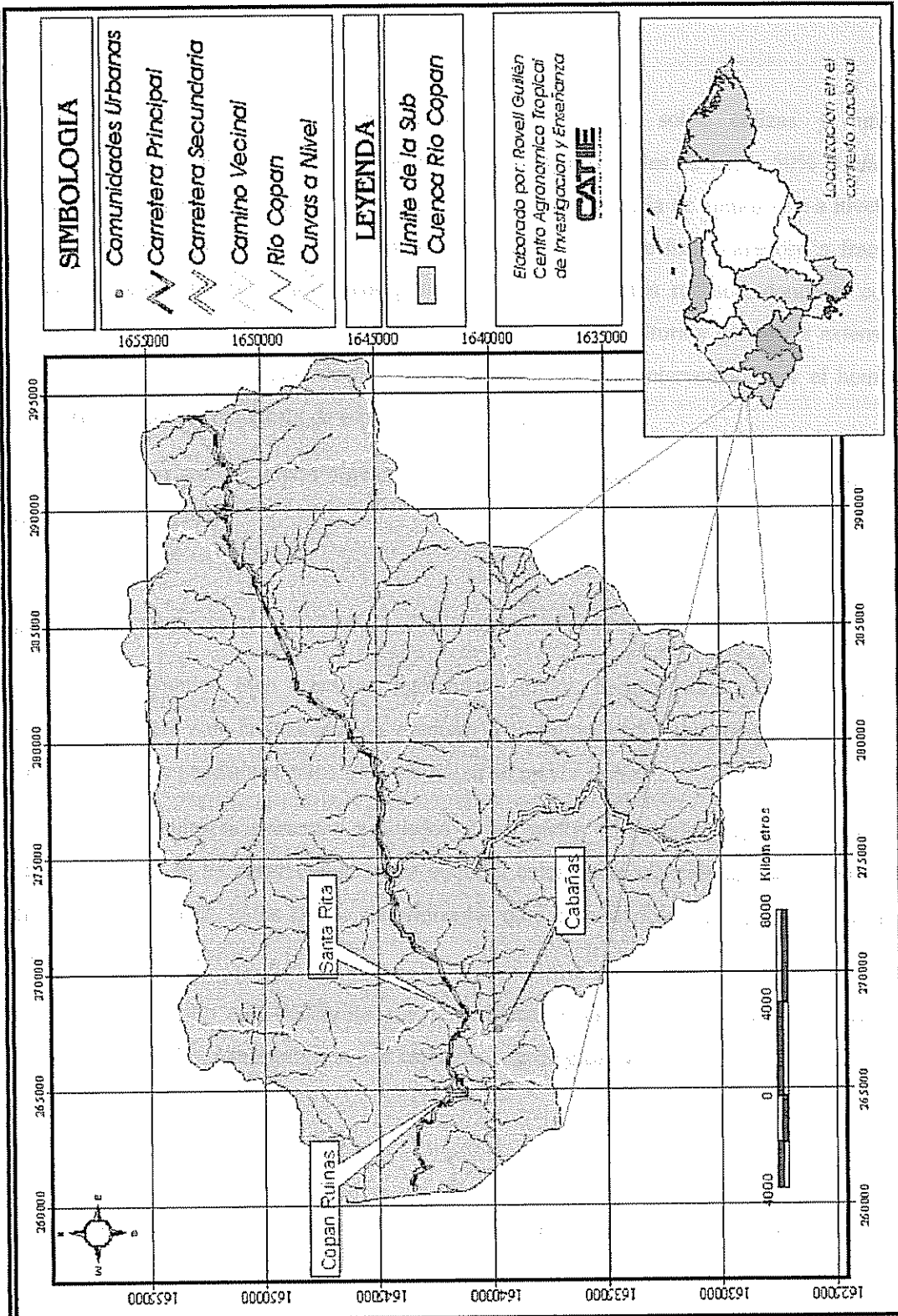
La estación pluviométrica más cercana a la zona se encuentra ubicada en La Entrada, Copán, donde se han registrado promedios anuales de precipitación de 1609 mm., El área se caracteriza por presentar un comportamiento bimodal de precipitaciones, siendo septiembre con 228.9 mm, el mes con más altos registros pluviales, y el más seco marzo con 11 mm. de precipitación.

###### c) Geología y suelos

Los suelos encontrados en la sub-cuenca según la metodología de serie de suelos de Simmons y Castellanos son: Chandala, Naranjito, Sulaco y los Suelos de los Valles.



# Mapa de Ubicacion Sub Cuenca del Rio Copan



### *Suelos Chandala (CHA)*

Son un conjunto de suelos bien drenados, desarrollados sobre calizas y lutitas interestratificadas; Tienen un relieve alomado a escarpado con pendientes de hasta 50% o más y están asociadas con los suelos Chimbo y Sulaco, o constituyen una mezcla de ambos que a nivel de estudio resulta difícil su separación. La textura de estos suelos varía de franco-arenoso a franco-arcilloso y muchas áreas presentan alta pedregosidad con afloramientos rocosos, donde el color varía desde rojo oscuro a gris rojizo. Estos suelos se usan para la agricultura y ganadería extensiva aunque por lo general, están cubiertos de matorrales, y en lugares no intervenidos por el hombre tienen una cobertura vegetal compuesta de especies arbóreas latifoliadas.

Estos suelos son rendzinas con algunas inclusiones de litosoles y en la 7ª. Aproximación revisada son Ultic Haplustalfs

### *Suelos Naranjito (NA)*

Son suelos profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, desarrollados sobre limonitas y calizas interestratificadas con inclusiones de arenisca y conglomerado, que ocupan un relieve alomado a escarpado, con pendientes entre 20% y 40% en su mayor parte.

Los suelos naranjito se presentan asociados a los suelos Chimizales, Ojojona, Sulaco y Chimbo. Donde el suelo se ha desarrollado sobre material calcáreo la reacción es menos ácida en todos los horizontes del suelo. Estos suelos son utilizados para el cultivo del café, granos básicos y en algunos casos para pastos.

Los suelos Naranjito son Podzoles rojo amarillento y en la 7ª aproximación revisada corresponden a los Typic Tropohumults con una capacidad agrológica de clases IV y VII.

### *Suelos Sulaco (Su)*

Son suelos poco profundos, relativamente bien drenados, desarrollados sobre caliza o mármol, en gran parte dolomíticos y de relieve escarpado con pendientes de hasta 60% y más. Estos suelos están asociados a los suelos Chimbo y Chandala. Por lo general estos suelos contienen una gran cantidad de piedras, alcanzando una pedregosidad de 40 a 60% en la superficie. La vegetación predominante la constituyen árboles latifoliados, aunque también se encuentran en bosques de pino y mixtos. Muchas áreas se dedican a la agricultura con métodos primitivos por lo que su rendimiento en productividad es bastante bajo.

Los suelos Sulaco son rendzinas y en la 7ª aproximación revisada corresponden a los Typic Ustorthents con una capacidad agrológica de clases IV y VII.

#### *Suelos de los Valles (Sv)*

En esta unidad se encuentran agrupados los suelos que mejor pueden responder al desarrollo de la agricultura en forma intensiva, por su profundidad, drenaje, fertilidad y topografía. Muchas áreas pueden ser irrigadas y son aptos para toda clase de cultivos propios del clima. No obstante, se encuentran enclavadas en esta unidad, otras unidades con problemas de drenaje, pedregosidad, disección e inundación.

#### d) Vulnerabilidad a desastres naturales

La sub-cuenca del Río Copán, a través de los años se ha visto afectada por diversos fenómenos de origen natural, situación que aunada a factores de naturaleza antrópica han causado daños a los recursos naturales y por ende a la población que habita dentro de la zona.

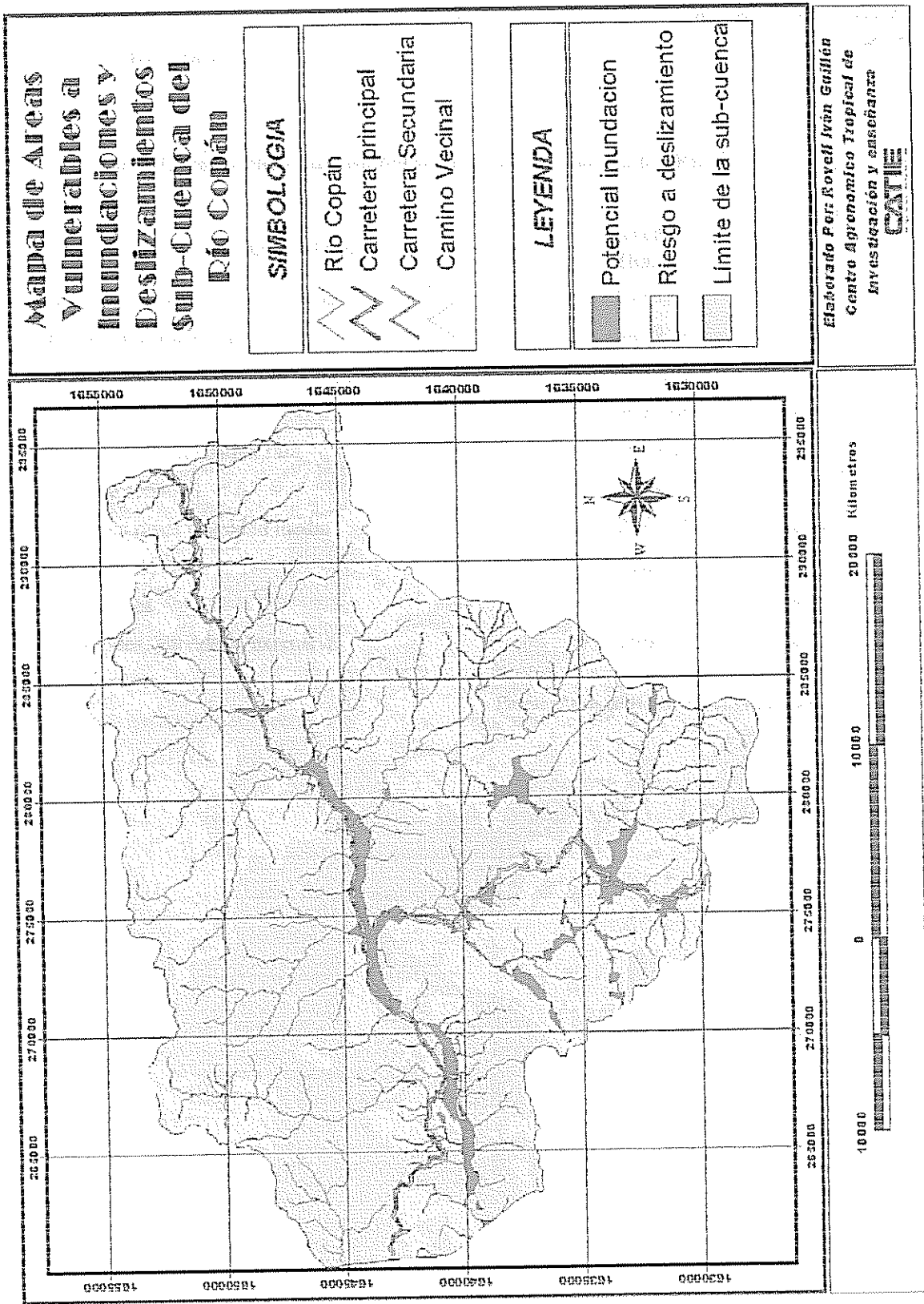
El huracán Mitch, vino a reflejar con mayor impacto el estado de los recursos naturales y la alta susceptibilidad que presenta la sub-cuenca en la actualidad para soportar eventos de esta magnitud. En el mapa 2 se puede observar gráficamente la susceptibilidad que presenta esta zona a fenómenos tales como riesgo a inundaciones y deslizamientos.

Es preciso mencionar que el 3.6% de la sub-cuenca presenta amenaza a inundaciones y el 36.23% de la misma es susceptible a la presencia de deslizamientos. (Fuente: CIAT)

#### e) Uso actual del suelo

En general en la sub-cuenca los cultivos agrícolas anuales permanentes y la ganadería de doble propósito son las actividades que se presentan como la base de la economía local, ocupando estos rubros una gran área dentro de la misma.

Además otras actividades productivas como el aprovechamiento forestal y el cultivo del café son otras opciones para algunos de los habitantes.



Mapa 2. Vulnerabilidad, sub-cuenca del Río Copán

En la tabla 1 se presenta un resumen de las áreas ocupada por cada tipo de uso del suelo en la sub-cuenca del Río Copán.

**Tabla 1. Distribución de uso del suelo en la sub-cuenca del Río Copán**

Uso del suelo	Área (ha)	%
Áreas agrícolas, cultivos anuales	6484.45	10.47
Bosque latifoliado denso	13819.78	22.32
Bosque latifoliado intervenido con cultivos agrícolas	1179.48	1.91
Bosque mixto	3070.04	4.96
Bosque pinar densidad rala	14939.76	24.13
Bosque seco	1592.73	2.57
Bosques pinar densidad media	2655.98	4.29
Cultivos de café	5786.95	9.35
Matorrales	9424.00	15.22
Pastizales, ganadería extensiva	2960.94	4.78

Fuente: Atlas de Honduras CIAT/LADERAS.

### 3.2 METODOLOGÍA

El estudio realizado se conformó por una serie de etapas, que en la figura 1 se describen en forma simplificada.

El presente estudio se realizó para modelar de uso de la tierra en la sub-cuenca del Río Copán, utilizando programación lineal a través del diseño de un modelo adaptado a la zona antes mencionada. El trabajo consistió en realizar un perfil socioeconómico de la sub-cuenca mediante talleres con los pobladores de las comunidades y entrevistas personales con los productores. Esta fase del estudio fue necesaria para definir la función objetivo del modelo de optimización.

Con la finalidad de obtener datos necesarios para el desarrollo del estudio, la encuesta practicada a los productores se diseñó con preguntas cerradas, de fácil tabulación y las que proporcionaron los datos siguientes:

- Actividades productivas principales.
- Disponibilidad de capital.
- Mano de obra por cultivo.
- Precio de venta de los productos.
- Rendimientos por actividad.
- Autoconsumo.

Estos datos fueron introducidos en una hoja electrónica (Excel) para su tabulación. Esta información fue analizada para determinar el ingreso neto de la situación actual de la sub-cuenca.

Más adelante se definen y describen los coeficientes y parámetros utilizados para la elaboración del modelo base.

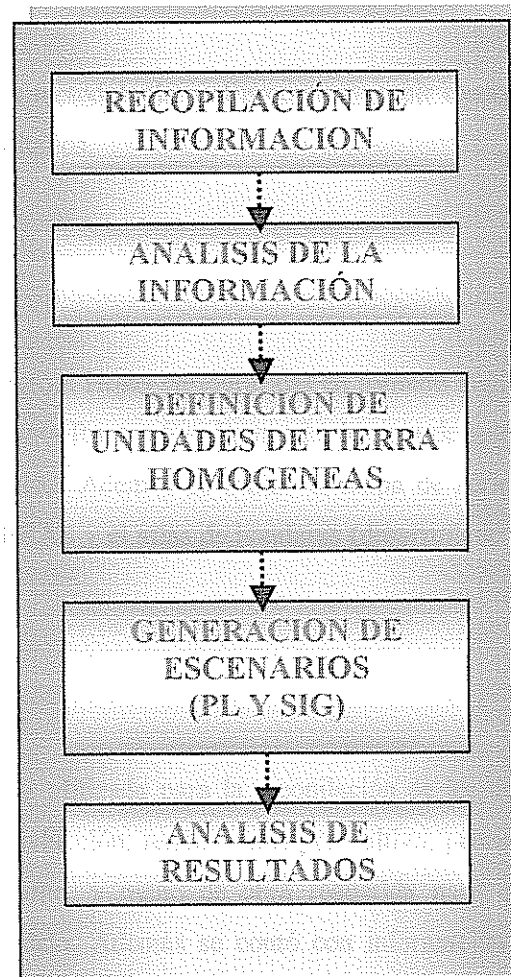


Figura 1. Diagrama metodológico simplificado.

### **3.2.1 Recopilación de información**

Los elementos que se conjugan para el desarrollo de los objetivos propuestos son los siguientes:

- Recopilación de datos geográficos.
- Levantamiento de la encuesta socioeconómica (datos no geográficos).
- Determinación de la cobertura actual del suelo.
- Determinación de las unidades de tierra homogénea (UTH).
- Generación de los escenarios.
- Análisis comparativo de los escenarios.
- Análisis de conflicto de uso de la tierra.

En la figura 2 se describe esquemáticamente la metodología y el proceso a seguir mediante la integración de PL y SIG para la obtención de los resultados.

Los datos recopilados se dividen en dos tipos:

- a) Datos geográficos
- b) Datos no geográficos

En cuanto a los datos geográficos obtenidos fueron: Hojas cartográficas en formato análogo a escala 1:50,000 de Copán Ruinas, Dulce Nombre, Santa Rosa y San Fernando, imagen de satélite Landsat para la determinación del uso actual del suelo. Además se utilizó el mapa de serie de suelos de Honduras, digitalizado por el CIAT / LADERAS y el atlas de honduras (desarrollado por el CIAT).

### **3.2.2 Levantamiento de la encuesta socioeconómica**

La encuesta socioeconómica fue la herramienta utilizada para la recopilación de los datos no geográficos, de la que se pudo extraer: costos de producción, rendimientos por cultivo, precio de venta de los productos, capital disponible, autoconsumo, y mano de obra requerida para cada cultivo, convirtiendo éstas en los coeficientes del modelo. Además se contó con información del diagnóstico participativo de la subcuenca del Río Copán preparado por EMPRENDE consultores para la FAO, de donde se extrajo la información socioeconómica restante, como población total de la sub-cuenca, población económicamente activa PEA.

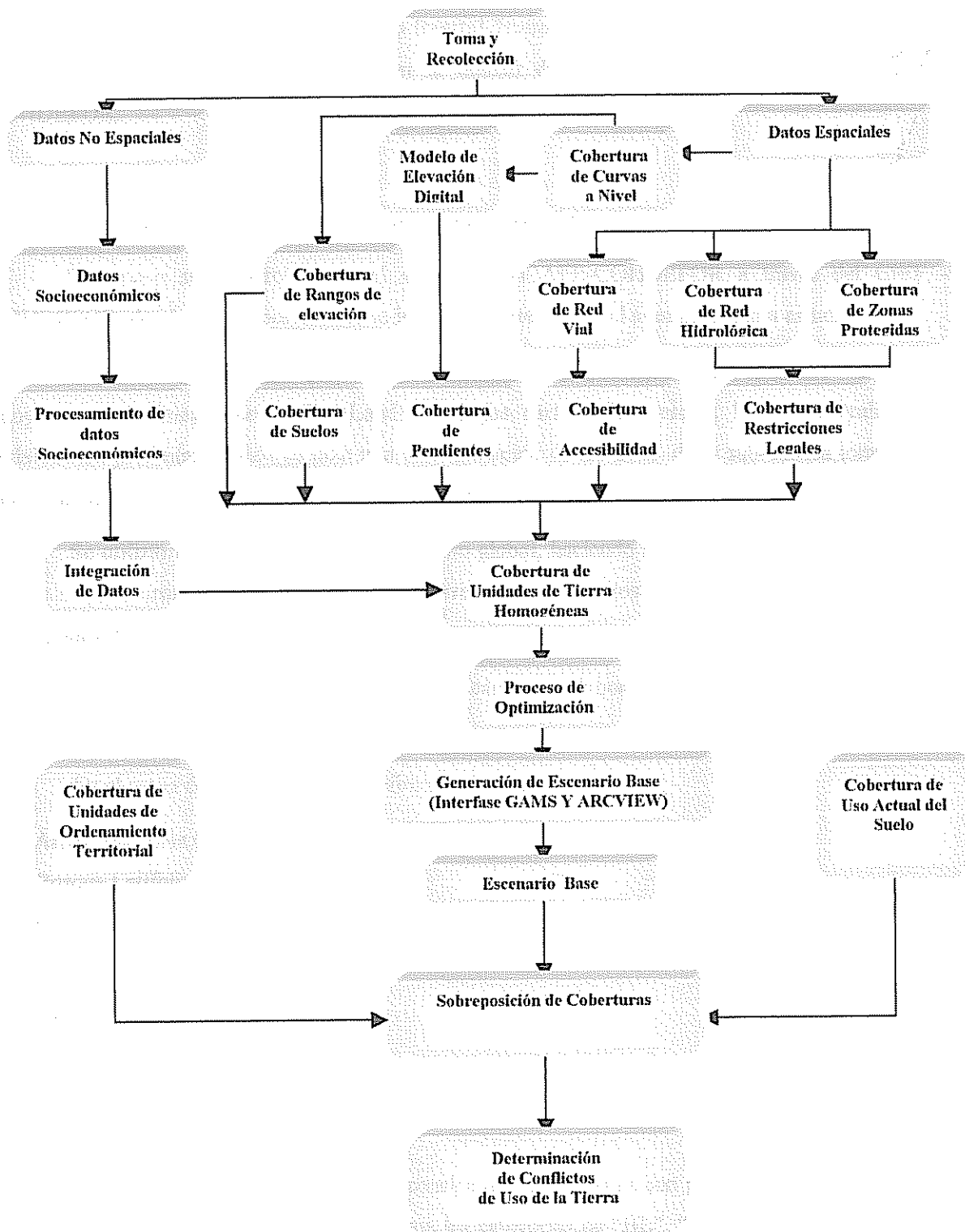


Figura 2. Secuencia metodológica de la investigación.



Los datos utilizados para el manejo forestal dentro de la sub-cuenca fueron obtenidos de los planes de manejo y planes operativos en la unidad de gestión forestal de Santa Rita AFE-COHDEFOR.

### **3.2.3 *Determinación de la cobertura y uso actual del suelo***

Este paso se desarrolló con el apoyo de la AFE-COHDEFOR a través del CIEF - COHDEFOR, donde fue proporcionada la imagen de satélite con el área sometida a estudio.

El proceso que se siguió para determinar la cobertura y uso actual del suelo fue el siguiente; apoyados en la imagen de satélite Landsat y hojas cartográficas escala 1:5000 se realizó una rodalización preliminar donde se hizo una discriminación de los usos de la sub-cuenca tomando en cuenta la base de datos original que posee la AFE-COHDEFOR.

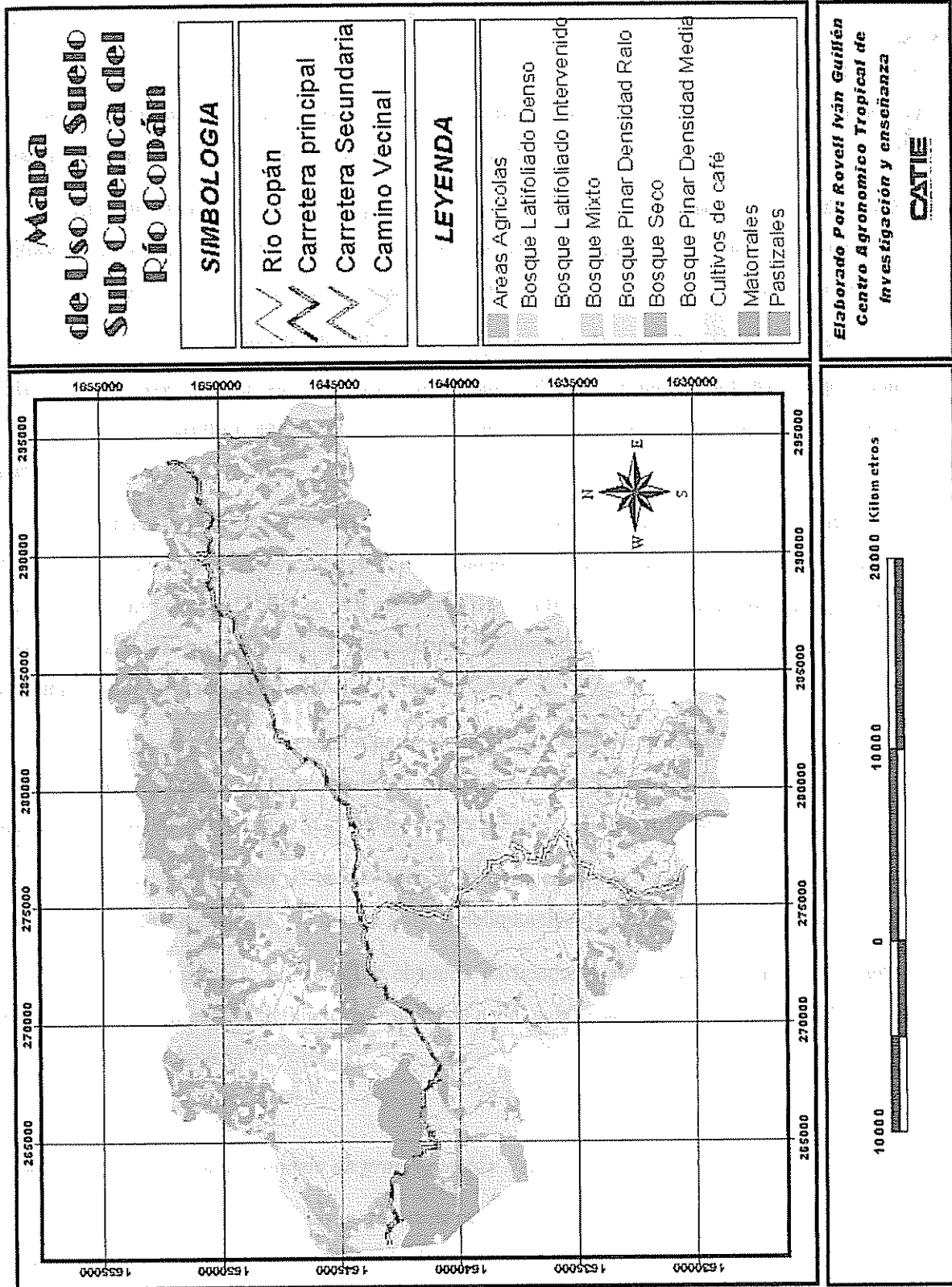
Se utilizaron sistemas de posicionamiento global, haciendo recorridos por el área estudiada, donde se realizaron reconocimientos y se georrefereciaron puntos de control con usos diferentes, estos puntos fueron tomados al azar.

Con estas correcciones hechas a nivel de campo se elaboró finalmente el mapa de cobertura y uso del suelo.

En el mapa de uso del suelo se definieron 8 clases:

1. Áreas Agrícolas (A)
2. Bosque Latifoliado (BL)
3. Bosque Mixto (BM)
4. Bosque Pinar (BP)
5. Bosque Seco (BS)
6. Cultivos de Café (C)
7. Matorrales o Guamil (M)
8. Pastizales (P)

La clase definida como "BP" fue considerada como áreas con potencial para la realización de aprovechamientos forestales, mientras que las categorías de "BL", "BM" y "BS" como bosques sin utilización, la finalidad de esta clasificación fue para realizar una comparación con las categorías que se utilizaron en el modelo de programación lineal (ver mapa 3).



Mapa 3. Uso actual, sub-cuenca Río Copán

### **3.2.4 Determinación de las unidades de tierra homogénea**

La unidad de tierra homogénea se puede definir como una superficie de terreno con atributos múltiples y características similares, de acuerdo a ciertos criterios previamente establecidos, mismos que pueden ser representados cartográficamente.

En este estudio se utilizó el programa ArcView 3.2 para la determinación de las UTH, utilizando el comando "geoprocessing wizard" donde se realizó la sobreposición lógica en las capas de: accesibilidad, restricciones legales, suelos, zonificación altitudinal y pendientes (ver anexo 7A).

Se utilizó el comando "buffer" del programa ArcView 3.2 para establecer zonas de influencia alrededor de las vías de acceso transitables de la sub-cuenca del Río Copán, para las cuales se establecieron los rangos de: 0- 500 m, 500-1000 m, 1000-1500 y mayor de 1500 m (ver anexo 1A).

Para la definición de las restricciones legales se tomó como base lo establecido en la ley forestal, determinando básicamente tres categorías: área forestal declarada, zona de amortiguamiento de ríos (150 metros a cada lado de los afluentes permanentes de agua y 250 metros alrededor de los nacimientos). Estableciendo finalmente dos categorías en el modelo zona restringida y zona sin restricción de uso (ver anexo 2A).

La capa de suelos se generó a partir de la clasificación de suelos de Honduras, desarrollada por Simmons y Castellanos digitalizada por el CIAT-LADERAS. En esta se encuentran cuatro tipos de suelo: Chandala, Naranjito, Suelo de los Valles y Sulaco (ver anexo 3A).

Para la zonificación de la sub-cuenca se definieron dos clases: zona alta y zona baja, se tomó la cota de referencia de 900 msnm. Para la delimitación de las zonas (ver anexo 4A).

La cobertura de pendientes fue obtenida partiendo de un modelo de elevación digital (ver anexo 5A), para la cual se definieron 4 rangos de pendientes, entre éstos: 0-15%, 15-30%, 30-45% y > de 45% (ver anexo 6A).

### **3.2.5 Construcción del modelo de programación lineal**

Una vez establecidos los parámetros se construyó el modelo lineal para la simulación utilizando para este el programa "General Algebraic Modeling System" (GAMS).

El problema de programación lineal planteado envuelve un conjunto de ecuaciones lineales simultáneas, que representaron las condiciones del problema (restricciones) y una función lineal en la cual se enuncia el objetivo de éste (función objetivo).

### 3.2.5.1 Definición de las actividades

La definición de los parámetros básicos fue necesaria para la determinación del modelo. Inicialmente se consideraron las variables estructurales del modelo, las cuales corresponden a las diferentes alternativas de producción en la sub-cuenca: bosque (AF y BsU), pasto, matorrales, cultivos agrícolas, (maíz, frijol de primera y postrera) y cafcultura.

### 3.2.5.2 Definición de las restricciones

Mediante inecuaciones o desigualdades lineales se establecieron las restricciones del modelo, representando las condiciones del problema de la forma siguiente:

- Límite de tierra: El área asignada a cada uso del suelo debe ser igual a aquella que reúna las condiciones óptimas para su establecimiento generadas en las UTH, y la sumatoria no debe sobrepasar el área que comprende la sub-cuenca.
- Límite de capital: El costo de producción no debe superar el capital disponible.
- Límite de mano de obra: La cantidad de jornales utilizados para la producción debe ser menor o igual a la población económicamente activa (PEA) de la subcuenca.
- Límite de Consumo: Las áreas cultivadas deben asegurar el autoconsumo de la población.

Con la definición de estas limitaciones se maximizó el ingreso neto de la sub-cuenca usadas en las condiciones actuales, para finalmente generar del escenario base.

### 3.2.5.3 Definición de la función objetivo

Para la definición de la función objetivo, la cual se planteó como la diferencia entre los ingresos brutos (por la venta de productos provenientes de las cosechas) menos los costos de producción de éstos. La forma de la ecuación resultante para definir el modelo, el cual fue la guía para la optimización, se desarrolló de la siguiente forma:

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_jx_j + \dots + a_nx_n = f(x) \quad (\text{Ec. 1})$$

Geoméricamente estas relaciones son semejantes a líneas rectas en dos dimensiones, donde las variables conocidas  $a_j$  representan los ingresos o en caso contrario los costos de producción de

los cultivos por hectárea, y  $f(x)$  es el margen bruto de ganancia. Las variables desconocidas  $x_i$ , corresponden a la superficie de terreno que ocupa cada actividad productiva en hectáreas.

#### *3.2.5.4 Proceso de optimización de la sub-cuenca*

Con este modelo se permite la toma de decisiones a partir del planteamiento de desarrollo del modelo matemático proveniente del sistema de producción. Además permite el planteamiento de problemas que se caracterizan por la necesidad de asignar recursos limitados al sistema y obtener mediante su desarrollo soluciones óptimas de acuerdo con el objetivo propuesto.

El modelo fue construido como una matriz de doble entrada, en donde se cruzan las actividades productivas del sistema cuenca, con las restricciones a las cuales éste es sometido.

#### *3.2.6 Modelación del escenario base*

En este escenario se refleja la tendencia del entorno actual de los sistemas de producción de la sub-cuenca, lo cual se puede ver reflejado en los datos utilizados para la definición de la función objetivo y las limitaciones implicadas en el modelo de maximización. Para las limitantes se consideraron las actividades productivas y la manera en que éstas son realizadas actualmente en la sub-cuenca. A continuación se describen los parámetros y cálculos de las variables incluidos para la elaboración del modelo de programación lineal, que son elementos claves para la maximización del ingreso neto y la optimización del uso de tierra de la sub-cuenca del Río Copán.

##### *3.2.6.1 Parámetros considerados para la elaboración del modelo*

###### a) Utilización del bosque

Dentro de la sub-cuenca se desarrollan diversas actividades entre las que se incluye la extracción de madera, administrada mediante planes de manejo forestal por la AFE-COHDEFOR. La cobertura de bosques de coníferas en la sub-cuenca es una de las opciones productivas para sus habitantes. En la generación de este escenario se consideran las variables de decisión tomando en cuenta las condiciones actuales, pero se hace factible la utilización del bosque de pino para la producción de madera aserrada. El incremento medio anual (IMA) considerado fue de 8.34 m<sup>3</sup>/ha/año. Tanto el IMA como los datos de rendimiento, los costos de producción y los ingresos por la venta de madera en rollo fueron obtenidos de los planes de manejo forestal de la hacienda El

Jaral (1997-2001) registrados por la Unidad de Gestión Forestal de Santa Rita. Dentro del modelo se considera como ingreso neto el precio de la venta de madera, el cual incluye implícitamente los costos de producción y mano de obra.

b) Valoración de servicios ambientales

i) Valoración de costos por erosión

La erosión de los suelos es un problema que se presenta fuertemente en la sub-cuenca, problema que afecta directamente en la calidad del agua y disminuye la producción de los suelos, razón por la cual se consideró importante, dentro de la valoración de los servicios ambientales, la implicancia que puede presentar esta situación.

En la modelación de este escenario se incluye un costo por el suelo erosionado, tomado de la propuesta de Kidd y Pimentel, citados por Ruiz (1999) y Jiménez (2000), en el que se plantea un valor de US \$ 5 por tonelada métrica de suelo, lo cual equivale en moneda nacional al cambio actual a L 85 (US \$1 = L 17).

Las tasas de erosión anual en los diferentes usos del suelo en la cuenca consideradas fueron las utilizadas en el estudio realizado por Jiménez, Hernández (2000) quienes citaron las investigaciones realizadas por Rivera y León (2000) de varias investigaciones hechas en el país (ver tabla 2).

Para la erosión anual en pastizales y guamiles o matorrales fue utilizado un estudio comparativo del aumento de la erosión por cultivo respecto a la erosión bajo bosque natural sin perturbar, propuesto por Cubero (citado por Jiménez 2000).

**Tabla 2. Tasa de erosión anual por tipo de uso del suelo**

Uso del suelo	Erosión (t/ha)
Bosque sin utilización	0.2
Bosque con Aprovechamiento Forestal	13.5
Café	4.7
Maíz y Frijol	118
Pastizal	3.2
Matorral	4.8

Fuente: Jiménez y Hernández, 2000

Además se planteó un aumento del 10 % por cada incremento en los rangos de pendientes considerados en el modelo (Jiménez , 2000). Los valores de pendientes que se presentan en la tabla 3 son los que se incluyeron en el modelo de optimización.

**Tabla 3. Rangos de pendiente y erosión por uso del suelo**

Pendientes (%)	Bosque sin uso*	Bosque Aprovechado*	Café*	Pastizales*	Maíz y Frijol*	Matorral*
0 – 15	0.20	13.50	4.70	3.20	118.00	4.80
15 – 30	0.22	14.85	5.17	3.52	129.80	5.28
30 – 45	0.24	16.34	5.69	3.87	142.78	5.81
> de 45	0.27	17.97	6.26	4.26	157.06	6.39

Fuente: Rivera y León (citado por Jiménez y Hernández , 2000).

\* Erosión en t/ha por tipo de uso del uso

## ii) Valoración de la producción de agua

### **Cálculo del caudal**

#### *▪ Método Número de Curva*

El agua como elemento integrador en una cuenca hidrográfica y casi invaluable por su significado para la existencia de los seres vivos, fue uno de los elementos más importantes considerados en el estudio, con el fin de determinar la manera en que el modelo, basándose en la producción de agua, puede restringir la utilización de la tierra.

Para el cálculo del caudal se empleó el método de “Número de Curva” (NC) desarrollado por el Servicio de Conservación de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (SCS, por sus siglas en inglés) y haciendo uso de sistemas de información geográfica (ArcView) con el fin de calcular la escorrentía superficial y el caudal promedio de la sub-cuenca del Río Copán.

El método fue desarrollado a partir de una serie de estudios, en su mayoría no publicados. De acuerdo a Woodward *et al.*, (2000) fue Mockus (1964) quien permitió definir las bases hidrológicas para su posterior publicación por el SCS del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en 1972, luego de una serie de ajustes.

Dentro de las posibles aplicaciones del Método del Número de Curva, Woodward *et al.*, (2000) refieren las siguientes:

- Determinación del volumen de escorrentía en un periodo de retorno dado.
- Determinación del volumen de escorrentía para eventos específicos.
- Modelación Hidrológica del impacto de diversas alternativas de uso de la tierra (cobertura vegetal).

Según Jones (2000), el método establece la hipótesis de que la tasa de abstracción real  $F_a$  dividida por la abstracción potencial  $S$ , es igual a la tasa de precipitación de escorrentía  $P_e$  dividida por la precipitación máxima potencial de exceso  $P - I_a$ .

$$F_a/S = P_e/(P - I_a) \quad (Ec. 2)$$

De la ecuación de continuidad se tiene:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (Ec. 2.1)$$

$$F_a = P - P_e - I_a \quad (Ec. 2.2)$$

Sustituyendo  $F_a$  en la ecuación 3.1 y despejando  $P_e$  se obtiene:

$$P_e = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S) \quad (Ec. 2.3)$$

De estudios realizados por el SCS en cuencas pequeñas se obtuvo la relación empírica:  $I_a = 0.2 S$ , de manera que la precipitación de escorrentía estaría determinada por la fórmula:

$$P_e = (P - 0.2 S)^2 / (P + 0.8 S) \quad (Ec.3)$$



Donde:

$P$  = Precipitación (real acumulada – en adelante Factor  $P$ ).

$S$  =  $1000/NC-10$  (precipitación máxima acumulada de abstracción – Factor  $S$ ).

$NC$  = Número de Curva (depende del tipo de suelo y de la cobertura vegetal).

El valor del  $NC$  oscila entre 0 y 100 ó  $0 \leq CN \leq 100$ , el valor de 100 es asignado a superficies impermeables y cuerpos de agua. Para superficies permeables y bajo diferentes usos de la tierra el valor del  $NC$  es siempre menor que 100.

El número de curva de escorrentía depende específicamente del grupo hidrológico de suelo y del uso de la tierra.

Según el SCS (1972), Dunne (1986) y Nielsen and Hjelmfelt Jr (2000), existen cuatro posibles grupos hidrológicos (A, B, C, D) entre los que se pueden agrupar los diferentes tipos de suelo. Estos son:

*Grupo A: suelos muy permeables.* Suelos arenosos y gravosos profundos. Estos suelos tienen bajo potencial de escorrentía superficial debido a que se caracterizan por una alta tasa de infiltración, cuando están mojados.

*Grupo B: suelos permeables.* Suelos franco-arenosos superficiales. Estos suelos se caracterizan por tener una tasa moderada de infiltración cuando mojados completamente. El movimiento del agua por estas tierras es moderadamente rápido. La profundidad a cualquier capa restrictiva del movimiento normal del agua es mayor que 50 cm.

*Grupo C: suelos moderadamente permeables.* Suelos franco arcillosos, suelos franco arenosos superficiales. Tienen una baja tasa de infiltración cuando húmedos. El movimiento del agua en estos suelos es moderado o moderadamente lento y pueden tener una capa que impide el movimiento normal del agua en el suelo.

*Grupo D: suelos impermeables.* Suelos arcillosos expansivos, suelos franco arcillosos superficiales. Se caracterizan por una muy baja tasa de infiltración cuando húmedos. El movimiento del agua en

estos suelos es lento o muy lento. Pueden tener una capa que limita el movimiento del agua dentro de los 50 cm.

El uso actual de la tierra (tipo de cubierta vegetal) fue considerado en conjunto con el grupo hidrológico para definir el número de curva a incluir en el proceso para la estimación de la escorrentía.

Para la aplicación del método NC se contó con información acerca del tipo y profundidad del suelo, uso actual de la tierra y precipitación media anual de la sub-cuenca.

▪ *Procedimiento SIG para la estimación del Esgurrimiento Superficial (Pe)*

El proceso se dividió en tres etapas para la estimación del escurrimiento superficial y los caudales promedio de la sub-cuencas:

- ◊ Cálculo del NC y Factor S (de la fórmula Pe).
- ◊ Cálculo del Factor P (de la fórmula Pe)
- ◊ Estimación de la Precipitación de Escurrimiento y Caudales Promedio.

Cálculo del NC y Factor S (de la fórmula Pe):

En este caso se empleó información secundaria para el desarrollo de los cálculos (mapa de suelos y uso actual de la tierra, límite de la sub-cuenca), estas coberturas se utilizaron en formato "Shape" para su manipulación.

Los grupos hidrológicos asignados a partir de la textura, profundidad y permeabilidad de los suelos de la sub-cuenca. En la tabla 4 se presentan los valores de número de curva determinados en función del grupo hidrológico y del tipo de cobertura vegetal en la sub-cuenca.

En la tabla 4 se presentan los valores de número de curva para el uso actual del suelo en la sub-cuenca del Río Copán.

**Tabla 4. Número de curva para el cálculo del escurrimiento**

Uso actual del suelo	Grupos Hidrológicos de Suelos			
	A	B	C	D
Áreas Agrícolas	72	81	88	91
Bosque Latifoliado denso	30	55	70	77
Bosque Latifoliado intervenido	36	60	73	79
Bosque mixto	36	60	73	79
Bosque pinar ralo	45	66	77	83
Bosque seco	45	66	77	83
Bosque pinar densidad media	36	60	73	79
Café	68	79	84	88
Matorrales	45	66	77	83
Pasto	68	79	86	89

Valores de curva definidos en base a U.S. Soil Conservation Service (1972) y Dunne and Luna (1986).

Una vez definido el mapa de grupos hidrológicos y del número de curva (en formato *shp*), se procedió a unir las tablas de atributos de ambas coberturas.

Teniendo una sola tabla con ambos atributos se calculó el Factor S se activo la tabla de atributos y se definió un nuevo campo denominado Factor S y en la vista *Field* la fórmula (Factor S =  $1000/NC-10$ ) a través de la opción *Calculate*.

El mapa obtenido fue considerado el factor S, este se convirtió a formato *grid*, creando de esta manera cuadrículas de iguales dimensiones (30 x 30 m), cada una de las cuales tiene asignado el valor S. En la figura 3 se muestra el esquema para la obtención del factor S.

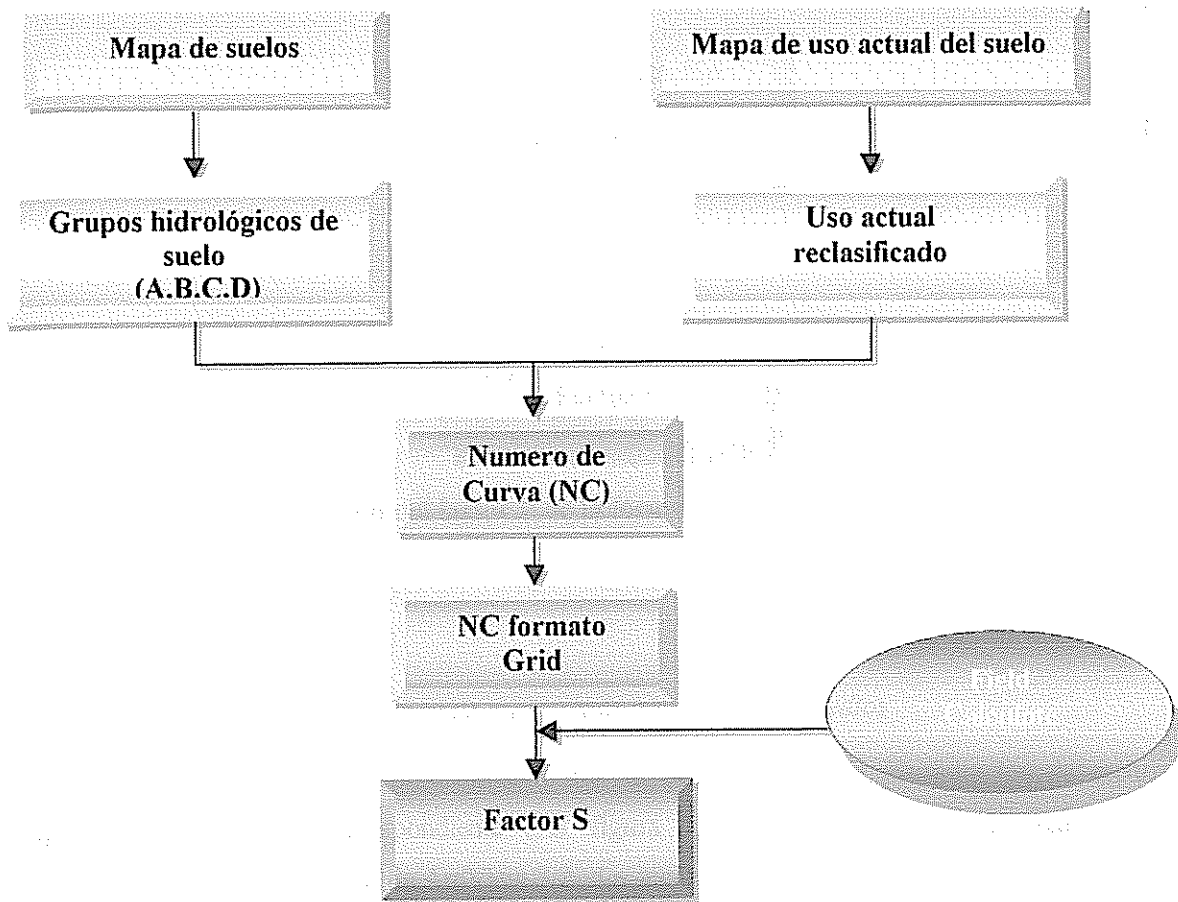
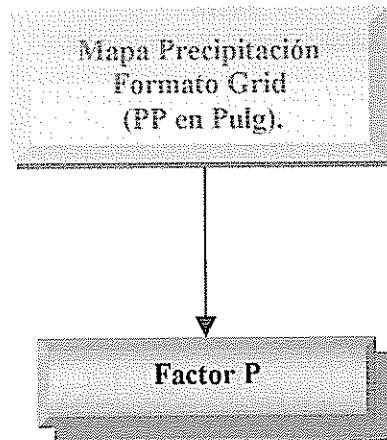


Figura 3. Esquema metodológico para la obtención del factor S.

#### Cálculo del Factor P

Para el cálculo del Factor P de la fórmula de precipitación de escorrentía, se contó con información digital de la precipitación promedio anual de la sub-cuenca en pulgadas. Esta capa se convirtió a formato *Grid* y se determinó como el factor P del método.

En la figura 4 se presenta un esquema metodológico que resume el procedimiento desarrollado para obtener el Factor P.



**Figura 4. Definición del factor P de la fórmula de precipitación de escorrentía.**

▪ *Estimación de la precipitación de escorrentía y caudales promedios*

La última parte del procedimiento fue la estimación de la precipitación de escorrentía aplicando la fórmula correspondiente (ver figura 5). Este procedimiento se realizó con la herramienta *Map Calculation* de ArcView 3.2. La secuencia de fórmulas es la siguiente:

$$Pe = (P - 0.2 S)^2 / (P + 0.8 S)$$

- 1) [ 0.2 \* (Factor S) ]
- 2) [ (Factor P) - (0.2 S) ]
- 3) [ (Factor P) - (0.2 S) ] \* [ (Factor P) - (0.2 S) ] = Numerador de Pe
- 4) [ 0.8 + (Factor S) ]
- 5) [ (Factor P) + (0.8 S) ] = Denominador de Pe
- 6) [(Numerador) / (Denominador) ]

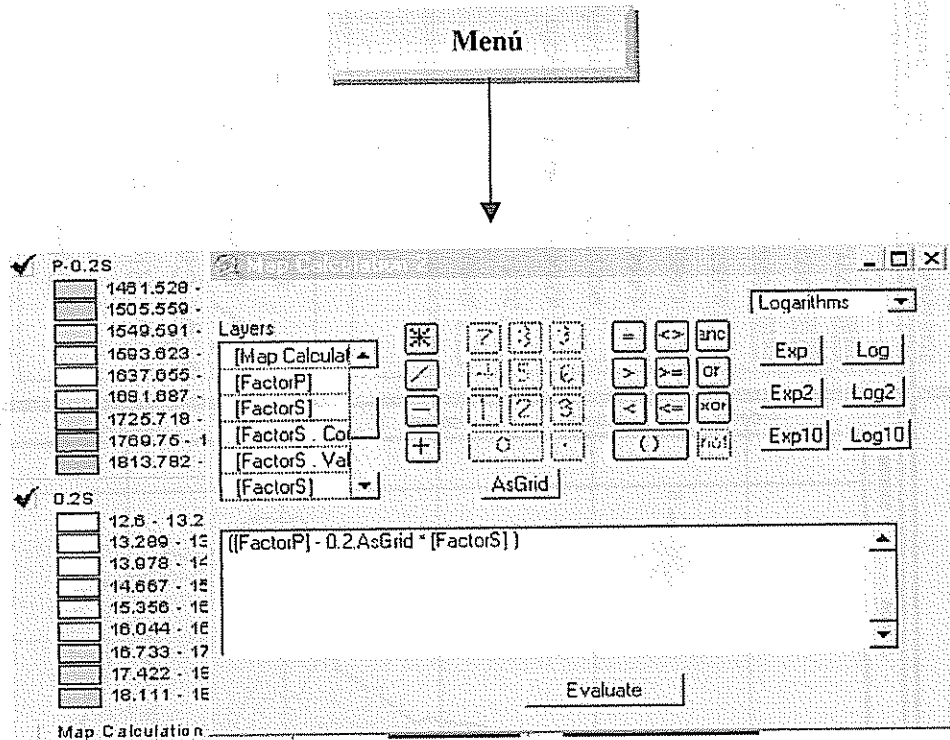
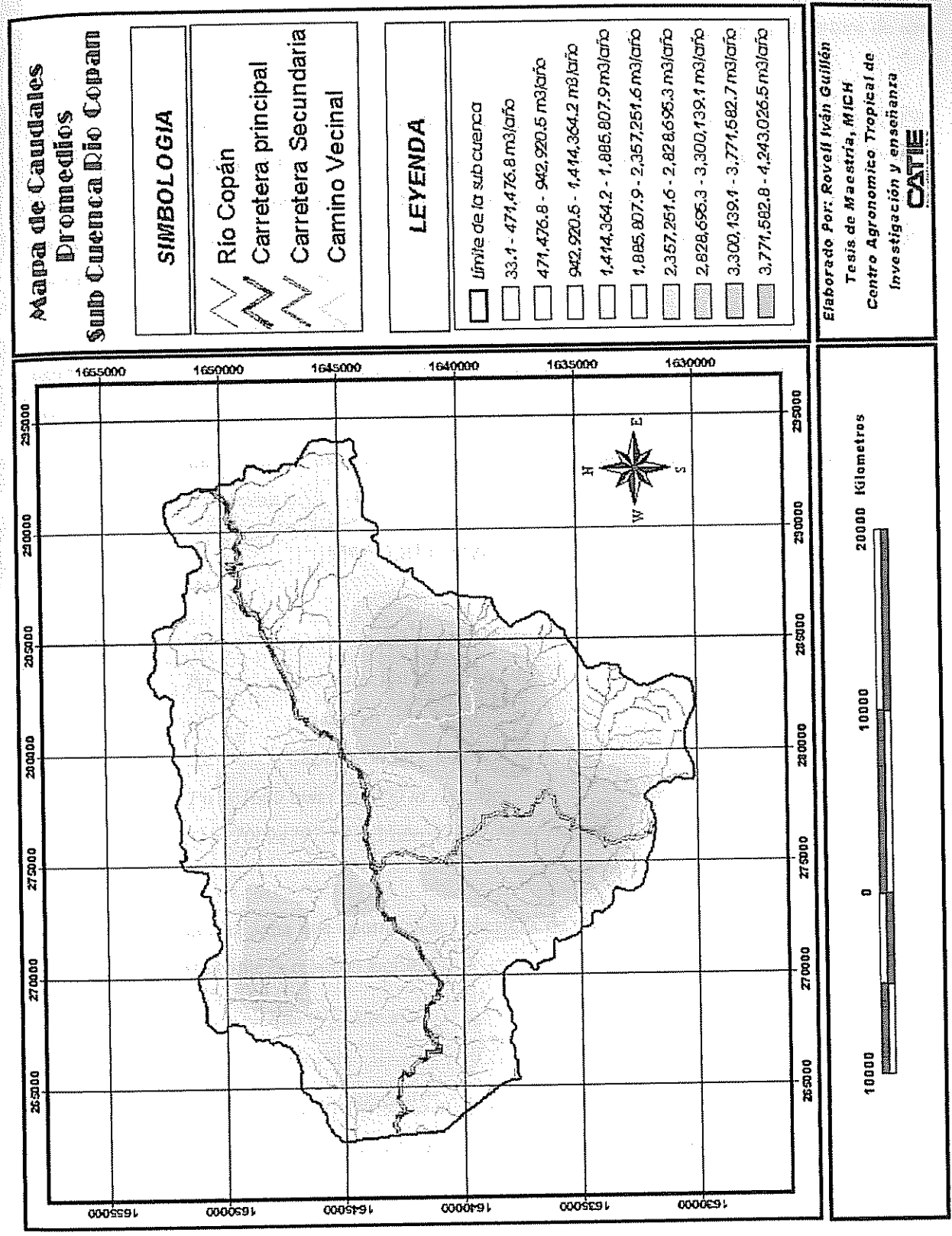


Figura 5. Ejemplo de operaciones para obtener la precipitación de escorrentía.

El resultado del proceso anterior fue un mapa con rangos de distribución de la escorrentía superficial en pulgadas. Para obtener la precipitación de escorrentía para toda la subcuenca, se sumaron los valores para cada celda, en el menú *Theme* se eligió la opción *Summarize by zone* y el resultado final fue el valor de la Precipitación de Escorrentía en pulgadas cúbicas por año. Posteriormente se hizo la conversión a metros cúbicos por año, con lo que se generó un mapa de caudales promedio de la subcuenca (ver mapa 4).



Mapa 4. Caudales promedio, sub-cuenca del Río Copán

Además se calculó el aporte de agua al caudal de la sub-cuenca por cada cobertura de uso de la tierra.

Tomando en cuenta que cada uso del suelo aporta diferentes porcentajes de agua se partió de la premisa de que no toda el agua precipitada llega al río, debido a las pérdidas que existen a través de su recorrido, planteándose de esta manera que: "la tasa en que el suelo retiene el agua precipitada es directamente proporcional a la tasa en que el agua llega caudal una vez producidas las perdidas en su recorrido".

Para esto se tomaron como parámetros los valores denominados capacidad de campo, calculados por el Proyecto Lempira Sur, los cuales miden el porcentaje de agua retenida en el suelo posterior a efectuarse el drenaje.

○ Se determinó el agua total retenida para cada cobertura de uso de suelo, para la cual se utilizó la siguiente relación:

$$A_{tc} = \sum[(P_p - Q) \times C_c] \quad (Ec. 4)$$

Donde:  $A_{tc}$  = Aporte de agua total al caudal en  $m^3/ha/año$

$P_p$  = Precipitación en  $m^3/ha/año$ .

$Q$  = Caudal en  $m^3/ha/año$ .

$C_c$  = Capacidad de Campo.

$P_p = 1609 \text{ mm } (160900 \text{ m}^3/ha/año)$

$Q = 70094797.78 \text{ m}^3/año. (1132.13 \text{ m}^3/ha/año)$

○ El cálculo del agua que aporta cada cobertura de uso de la tierra al caudal base de la sub-cuenca se hizo mediante la relación siguiente

$$A_{ac} = \sum[A_{tc} \times A] \quad (Ec. 5)$$

Donde:  $A_{ac}$  = Aporte de agua al caudal en  $m^3/año$ .

$A$  = Área por cobertura de uso de la tierra en hectáreas.

Los valores resultantes de este proceso fueron introducidos al modelo, y se presentan en la tabla 5.



**Tabla 5. Aporte de agua al caudal por uso de la tierra, sub-cuenca del Río Copán.**

USO ACTUAL	Área (has.)	Capacidad de Campo	Aporte de agua al caudal por cobertura (m <sup>3</sup> /ha/año)	Aporte total al caudal (m <sup>3</sup> /año)
Bosque Latifoliado	18482.55	49.04	78350.16	1448110578.39
Pasto	2960.94	47.82	76401.00	226218610.62
Café	5786.95	47.37	75682.04	437968030.12
Aprovechamiento Forestal	17595.74	36.07	57628.27	1014012068.05
Maíz y Frijol	7663.93	29.46	47067.61	360722949.88
Matorrales	9424.00	33.7	53841.77	507404914.96
<b>TOTAL</b>	<b>61914.11</b>	<b>--</b>	<b>388970.86</b>	<b>3994437152.01</b>

*iii) Valoración del almacenamiento de carbono*

En este escenario se consideró la obtención de un pago por la captura y almacenamiento de carbono por la cobertura arbórea de la sub-cuenca. Corrales *et al*, citado por Jiménez (2000), toma un valor de US \$ 10 por tonelada de carbono almacenada, dicho valor fue utilizado en el modelo.

Para la cuantificación del almacenamiento de carbono dentro del modelo de optimización se utilizó la metodología que propone Jiménez (2000) en su investigación, desarrollada por CCAD *et al*, (1998) en la evaluación del potencial de carbono y fijación de dióxido de carbono de la biomasa en pie por encima del suelo en los bosques de Honduras (ver anexo 2B).

▪ Cuantificación de carbono en bosque no utilizado

Dentro de la sub-cuenca la mayor cobertura boscosa existente es de coníferas, en general el bosque de pino se clasifica como pino en estado medio de desarrollo. Las actividades de manejo forestal han permitido la regeneración natural, además se pueden observar árboles maduros, suprimidos y los semilleros, los cuales han sido la base genética para el desarrollo del bosque.

En tal sentido, se tomó como base a esta cobertura forestal en el modelo para representar la captura de carbono en bosque sin utilización. Un aspecto importante de resaltar es que existe un porcentaje de área donde la cobertura pertenece a bosque latifoliado, bosque mixto y bosque seco, de los cuales no se pudieron realizar cálculos debido a la poca información disponible, es preciso

apuntar que el modelo no hace una distinción espacial entre los tipos de cobertura, sino que hace una discriminación entre el aprovechamiento y la no-utilización misma del bosque.

Los datos considerados fueron:

- Volumen promedio por hectárea del bosque de pino.
- Incremento medio anual (IMA).

Estos datos fueron tomados de las tablas de rodal de los planes de manejo forestal, promediando los valores para cada uno (Fuente: Unidad de Gestión Forestal de Santa Rita).

Los datos usados para la cuantificación del carbono almacenado en bosque sin uso se resumen en la tabla 6:

**Tabla 6. Datos de cuantificación del carbono almacenado en bosque sin uso**

Datos utilizados	Valor
Volumen promedio	121.30 m <sup>3</sup> /ha
Volumen ajustado	163.35 m <sup>3</sup> /ha
Biomasa	73.51 t/ha
Factor de expansión del volumen	2.824950886
Biomasa ajustada	207.66 t/ha
Estimación del carbono total fijado	103.83 t/ha

Desde la perspectiva de la captura de carbono, el aprovechamiento forestal, aún considerando los principios de manejo sostenible no se presenta como una actividad rentable, pero se incluyeron en el estudio, tomando como base los planteamientos realizados por Jiménez (2000) en su investigación.

Para éste fin se utilizó la ecuación propuesta por Alpizar W. (CCAD *et al.*, 1998):

$$Cf = Dm \times IMA \times Rc \quad (Ec. 6)$$

Donde:  $Cf$  = carbono fijado proveniente de actividades de manejo

$Dm$  = densidad o peso específico de la madera en t/m<sup>3</sup>

*IMA = incremento medio anual en m<sup>3</sup>/ha*

*Rc = fracción de carbono en la biomasa, establecida en un valor de 0.5 por el IPCC en 1996*

*Entonces: Cf = 0.5 t/m<sup>3</sup> x 8.3455 m<sup>3</sup>/ha x 0.5 = 2.086 t/ha*

En el caso de las coberturas de café y matorrales introducidas en el modelo, se tomaron en cuenta los mismos valores que utilizó Jiménez (2000). Este cálculo se realiza multiplicando el valor de la biomasa por la fracción de carbono en la biomasa establecida por el IPCC de 0.5, CCAD *et al*, citado por Jiménez (2000).

### **3.2.7 Elaboración de mapas**

Para la elaboración de los mapas, se diseñó una interfase entre los programas GAMS y ArcView. Ésta permite reconocer automáticamente en la capa de las unidades de tierra homogénea los cambios hechos en el modelo al generar un escenario diferente, desarrollando una programación para identificar combinaciones de diferentes cultivos en una UTH independiente.

De esta manera, utilizando el programa GAMS se codificó un archivo de resultados, el cual representa en forma gráfica cada UTH con un identificador correspondiente a las combinaciones establecidas con base en los porcentajes de mixtura definidos preliminarmente.

El proceso final consistió en realizar una unión activa mediante el comando "Join" de ArcView entre la tabla de la capa base con el archivo creado en GAMS, el cual toma como campo común a las UTH y simultáneamente la tabla que contiene las combinaciones de los cultivos, permitiendo así que los programas (GAMS y ArcView) se comunicaran mutuamente.

### **3.2.8 Análisis de los escenarios**

Se realizó un análisis comparativo con base a la situación actual de la sub-cuenca, el escenario base y el ordenamiento territorial propuesto. En esta fase del estudio se tomaron como parámetros básicos el uso del suelo establecido, la rentabilidad económica, el aporte de agua y erosión de la sub-cuenca. Con este análisis se identificaron las restricciones más determinantes para definir el uso en las unidades de tierra homogénea.

### **3.2.9 *Análisis de conflictos con base al ordenamiento territorial***

La modelación del uso de la tierra en la sub-cuenca se muestra como una opción de uso del suelo que podría ser implementado en la zona. Sin embargo, el escenario de ordenamiento del territorio presenta una situación ideal de cómo los recursos naturales pueden ser manejados.

En este sentido, cada uno de los diversos escenarios que pueden ser desarrollados, conseguirían ser una alternativa de uso de la tierra que presenta las probabilidades de llegar a convertirse en un determinado tiempo y/o espacio en el uso de la tierra en la sub-cuenca.

Por este motivo se tomó en consideración el análisis de conflictos al comparar el uso actual, escenario base y el propuesto como ordenamiento territorial para la sub-cuenca, y el planteamiento de los aspectos relevantes que se conseguirían con la implementación del escenario base y visualizar en que medida éste se acerca al ordenamiento territorial. Para esto se superpusieron las capas de los escenarios desarrollados con el de ordenamiento territorial, definiendo para esto dos condiciones de uso del suelo: uso correcto y uso en conflicto.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de los objetivos se planteó el establecimiento de un escenario de uso de la tierra como propuesta de ordenamiento territorial para la subcuenca del Río Copán. En este sentido se modeló el uso de la tierra, utilizando como herramientas fundamentales la Programación Lineal y Sistemas de Información Geográfica, estructurando un modelo lineal, el cual maximizó el ingreso neto de la sub-cuenca. El mismo modelo determinó una propuesta de uso de la tierra, integrando variables biofísicas y socioeconómicas tomando como base a las condiciones actuales del área sometida al estudio.

### 4.1.1 *Condiciones actuales del sistema*

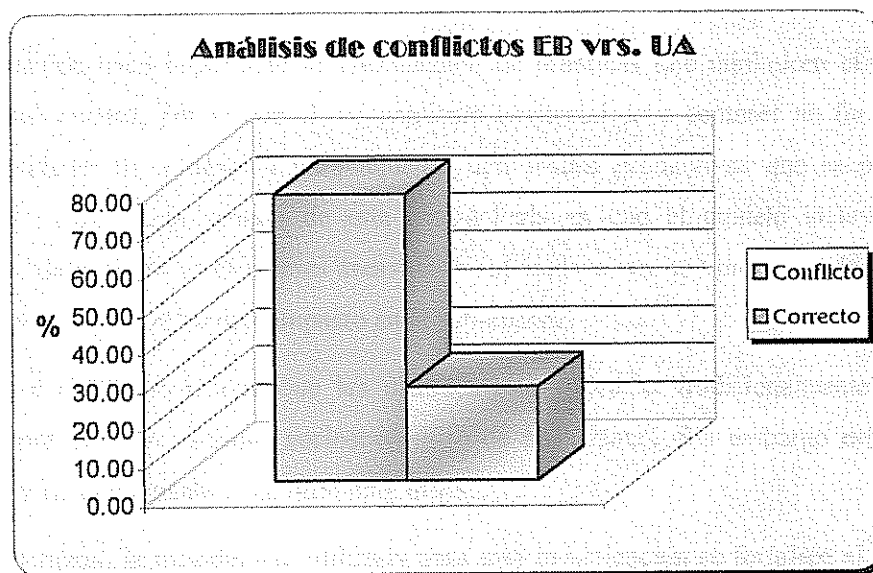
Las condiciones actuales del sistema en la sub-cuenca reflejan un ingreso neto de L 3134288.06. Además el ingreso por zona altitudinal que se determinó fue de L 1775769029.24 (56.66%) para la zona baja de la sub-cuenca y L 1358519033.76 (43.34%) para la zona alta.

En la figura 6 se presentan los ingresos porcentuales para cada zona altitudinal. Los resultados de la encuesta socioeconómica se resumen en la tabla 7.

A partir de esta información se determinó la situación socioeconómica actual de la sub-cuenca. Un aspecto que es importante mencionar es que los ingresos netos consideran únicamente los provenientes de las actividades productivas agropecuarias, siendo los resultados de la encuesta el reflejo de las mismas, ya que la metodología utilizada fue adaptada para la zona en estudio y esta considera únicamente actividades agropecuarias y forestales que practican los productores de la sub-cuenca.

Es preciso apuntar que la zona presenta una particularidad y es que en ella existe una gran actividad turística, debido a la afluencia tanto de turistas nacionales como internacionales al Parque Arqueológico Copán Ruinas. Sin embargo, el modelo usado no toma en cuenta el tipo de ingresos por concepto de turismo, ya que esta actividad es visualizada como un rubro potencial y no actual para los pobladores de la sub-cuenca.





**Figura 6. Ingreso porcentual uso actual, sub-cuenca del Río Copán**

#### **4.1.2 Proceso de optimización**

Esta fase del estudio se desarrolló mediante la modelación de la situación actual, utilizando el método de Programación Lineal como herramienta primaria. El producto de del proceso de optimización del uso de la tierra en la sub-cuenca del Río Copán muestra claramente un aumento del ingreso neto en un 43.8% del escenario base con relación a las condiciones actuales de la sub-cuenca (ver figura 7).

Lo descrito anteriormente presenta una estrecha relación con el estudio realizado por Chávez *et al.* (1992), en el cual un objetivo fundamental fue la conservación del sistema y la disminución de daños a la sub-cuenca a causa de las actividades productivas en zonas no aptas, las cuales fueron determinadas por el modelo permitiendo de esta forma el desarrollo socioeconómico de los actores involucrados, ya que el mejoramiento socioeconómico es una vía para la conservación de áreas sometidas a una fuerte presión en la utilización de sus recursos naturales.

Además, se puede mencionar que el modelo maximizó el sistema productivo tradicional desarrollado por los productores de la zona, quienes no utilizan prácticas agropecuarias tecnificadas (sistemas agroforestales, conservación de suelos, agricultura orgánica, etc.), siendo el sistema de producción convencional un agente de degradación en la zona, donde la mayoría de la cobertura boscosa

ha sido convertida a otros usos, principalmente a ganadería y agricultura, representando estos sistemas usos más intensivos del suelo tal y como lo expresa Rivera (1998).

Tal situación hace importante la introducción de prácticas que minimicen el impacto ecológico causado en la sub-cuenca, por lo que el ordenamiento territorial debe contener un fuerte componente de medidas o actividades de mitigación para aquellas actividades productivas que se prevean como más degradantes del suelo. Una ventaja de esta metodología es que el modelo incluye parámetros que restringen el uso de la tierra en diferentes áreas de la sub-cuenca, ya que promueve los usos que son más rentables y a la vez causan el mínimo impacto en la sub-cuenca.

Tragsatec (1998) menciona que las metodologías aplicadas tradicionalmente no han tenido el éxito esperado por el pobre enfoque socioeconómico de las mismas. Sin embargo estas han tenido una gran aplicación y en su momento resultaron muy útiles.

Por esta razón, la metodología utilizada para esta investigación se fortalece al considerar además de variables biofísicas los factores socioeconómicos que condicionan la utilización de la tierra actualmente en la sub-cuenca. Por lo que se debe tener en cuenta en un estudio de uso de la tierra que “además de revelar sus aptitudes, también revelará las preferencias de su destino al cumplimiento de ineludibles imperativos sociales o de obligadas exigencias de orden económico”.

Rivas, citado por Meléndez y Faustino (1998), comenta que los usuarios de los recursos naturales generalmente se motivan por el hecho de un mayor ingreso económico que por el accionar en forma racional y manejo ecológico de sus sistemas de producción. Esta situación se refleja al comparar la situación actual con el escenario modelado, donde el aumento en el ingreso neto de la sub-cuenca es mayor que en las condiciones actuales, por lo que la tecnología utilizada en este estudio va de acorde con estas consideraciones, ya que las respuestas que al final interesan son aquellas que presentan un beneficio económico y paralelamente la conservación, factores muy importantes a considerar en la planificación del manejo de cuencas y especialmente en la orientación del ordenamiento territorial.



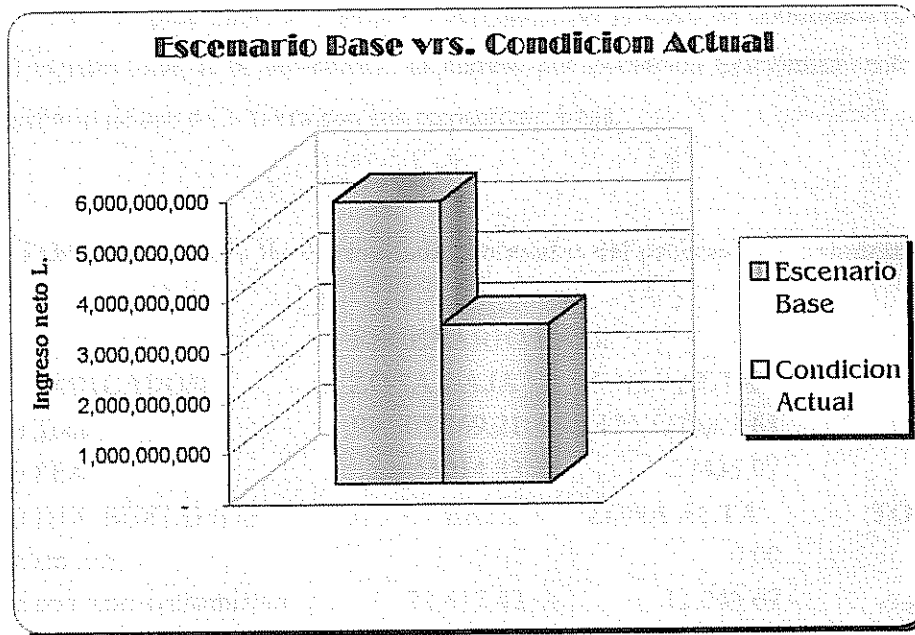


Figura 7. Comparación de ingresos totales entre EB y UA, sub-cuenca Río Copán

El ingreso mensual que presentó el modelo para la PEA fue de L 4584.56 en la zona baja de la sub-cuenca y de L 2286.33 en la zona alta (ver figura 8).

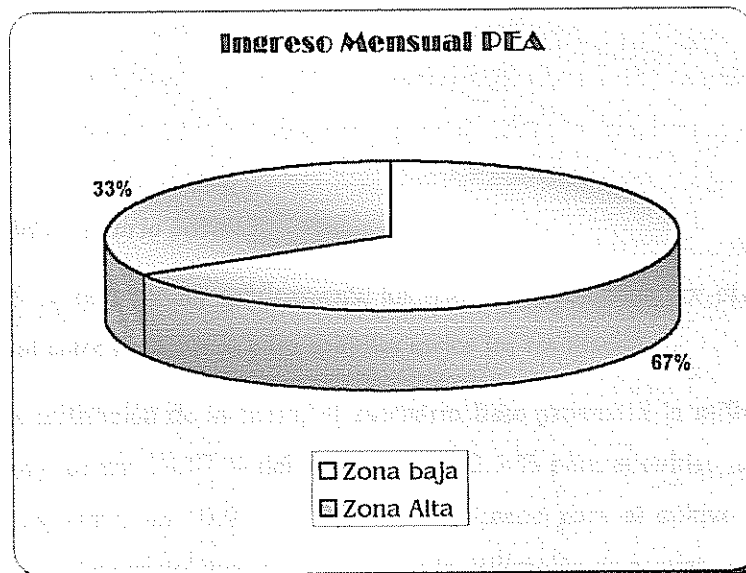


Figura 8. Ingreso mensual por zona latitudinal (PEA), EB; sub-cuenca Río Copán

En la tabla 8 se presentan los resultados derivados del proceso de optimización, donde el modelo proporciona el ingreso total de la sub-cuenca, el ingreso por Población Económicamente Activa (PEA) y propone un escenario de uso de la tierra con sus respectivas áreas.

**Tabla 8. Escenario Base, resultados obtenidos del proceso de maximización**

INDICADOR	ESCENARIO BASE		
	ZONA BAJA	ZONA ALTA	TOTAL
Ingreso Total	99,505,369.21	5,479,512,002.61	5,579,017,371.82
Ingreso PEA	55014.83	27435.97	
USO DEL SUELO (has.)	ZONA BAJA	ZONA ALTA	TOTAL
Bosque sin uso	0.00	0.00	0.00
Bosque con Aprovechamiento	21,617.42	12,045.67	33,760.4
Café	689.213	920.5126	1609.726
Pastizales	0.00	0.00	0.00
Maíz	6868.297	7584.013	14452.31
Frijol siembra de primera	3589.37	3334.045	6923.416
Frijol siembra de postrera	2952.674	3889.72	6842.394
Matorrales	0.00	0.00	0.00
<b>TOTAL</b>	<b>35716.97</b>	<b>27773.96</b>	<b>63490.93</b>

#### 4.1.3 Generación del escenario base

En la figura 9 se representan gráficamente los usos recomendados por el modelo realizando una comparación porcentual entre los mismos para asimilar mejor los resultados.

Con base a la utilización de la tierra, el escenario base promueve la utilización del bosque para aprovechamiento forestal en un 53.17 % del área total, un 2.5 % para el cultivo del café, 22.7 % para la producción de maíz, así como un 10.9 % y 10.77 % destinado para el cultivo de frijol de primera y postrera respectivamente. Además el modelo no favorece la utilización de pastizales ni de matorrales.

En lo referente al aumento del bosque para el aprovechamiento forestal en el escenario base, se observa claramente que las áreas que asigna el modelo para esta actividad se relacionan muy de cerca con el acceso, lo cual en la realidad es un factor fundamental para hacer esta actividad más rentable.

Las áreas de pastos y guamil se consideran no rentables y las propone para el establecimiento de bosque para aprovechamiento forestal. Además hay un gran incremento en los cultivos agrícolas (M, F1 y F2), esto es un indicativo de que el autoconsumo es una limitante y el modelo considera esta actividad más rentable que los pastos y el guamil.

Otro aspecto importante es que la producción de granos básicos se realiza simplemente para suplir las necesidades de consumo familiar (agricultura de subsistencia) y en muchos casos los productores deciden recurrir a préstamos por parte de cooperativas establecidas en la zona para la inversión inicial, debiendo cubrir estos costos con excedentes de producción. Esta problemática se describe en el diagnóstico participativo de la sub-cuenca del Río Copán, donde además se menciona que el Departamento de Copán es uno de los más pobres de Honduras.

Como se observó en la comparación realizada entre los escenarios base y uso actual (ver figura 9), se logró determinar que el bosque categorizado como bosque sin uso, las áreas de pasto y guamiles se redujeron en el escenario modelado en un 100%. Esto se aduce a que la sub-cuenca está limitada por el autoconsumo, ya que las áreas a cultivar deben asegurar el autoconsumo de la población. Por esta razón, se nota un considerable aumento en el establecimiento de bosque para aprovechamiento y en los granos básicos, el primero porque el modelo considera esta actividad más rentable que el guamil, pasto y el cultivo de café, y el segundo para asegura el consumo, además el escenario promueve estas actividades ya que en la realidad falta capital para desarrollarlas.

El uso de la tierra propuesto por el modelo de programación lineal se considera un sistema más eficiente, ya que el modelo utilizado presenta correlación entre los efectos previstos por el modelo y lo que sucede en la realidad lo que permite que la propuesta sea útil y se puedan determinar lineamientos del uso de la tierra en la sub-cuenca del Río Copán (Tragsatec, citado por Jiménez, 2001).

Estrada *et al.*, (1999) confirma que la utilización de la programación lineal para la integración de variables de tipo biofísico, social y económico son herramientas de mucha utilidad en la construcción de sistemas de producción más eficientes.

Para el caso de la sub-cuenca del Río Copán, la programación lineal fue aplicable en la modelación del uso de la tierra y la generación del escenario base para proponer las bases para orientar la planificación del ordenamiento territorial.

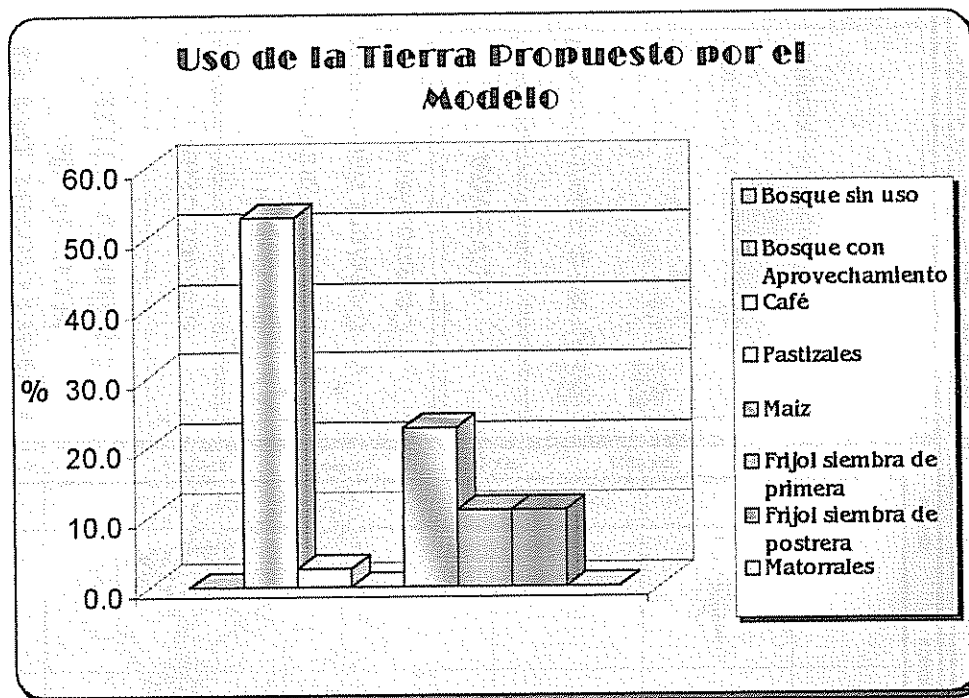


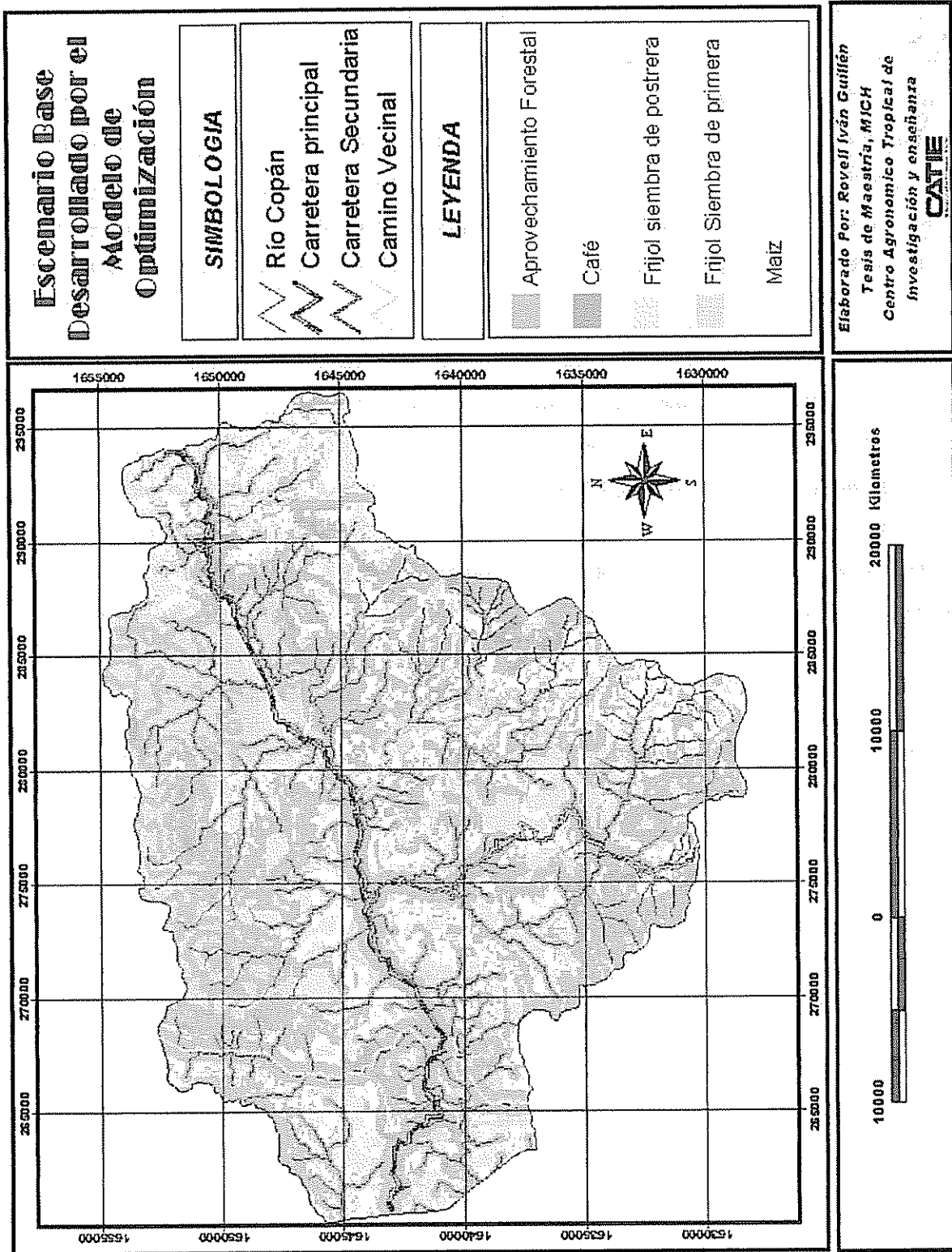
Figura 9. Áreas de uso de la tierra propuestas por el modelo de optimización

En el mapa 5 se representan geográficamente los usos propuestos mediante el proceso de optimización del uso de la tierra y la maximización de recurso económico en la sub-cuenca del Río Copán. Como se puede observar, y se mencionó anteriormente, el autoconsumo limita fuertemente la utilización de la tierra, por lo que las áreas que la ley establece como restringidas para su utilización éste las destina para la producción, sin tomar en cuenta esta categoría restrictiva.

Por lo que se propone un escenario de ordenamiento del territorio que considere ambas situaciones, por una parte la optimización mediante el fomento de aquellos usos propuestos por el modelo y la protección de los recursos tal y como lo determina la Ley Forestal vigente en Honduras.

Es importante mencionar que en la sub-cuenca se encuentra una zona de protección forestal, declarada por Acuerdo Ejecutivo del Congreso Nacional. Las otras áreas de restricción incorporadas al escenario fueron las zonas productoras de agua (un radio de 250 metros de los nacimientos de agua) y las zonas protectoras de las riveras de los ríos consideradas como bosques ribereños (150 metros a ambos lados del margen de ríos).

En este escenario el área destinada para la producción se reduce, por lo que el consumo debe ser suplido por la producción proveniente de áreas fuera de la sub-cuenca.

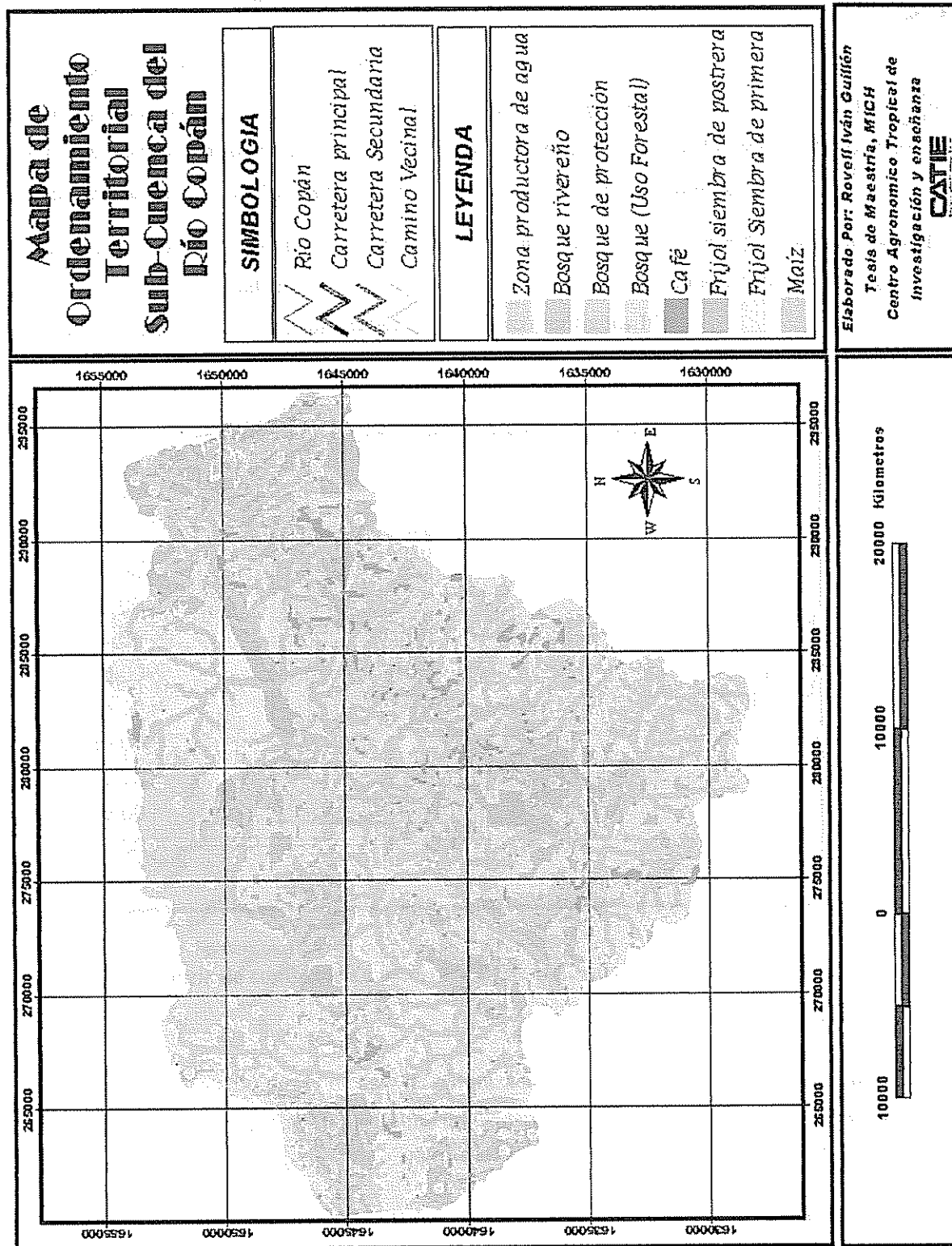


Mapa 5. Escenario base, sub-cuenca del Río Copán

En esta propuesta el uso de la tierra cambia considerablemente, además será necesario encaminar acciones sobre las áreas agrícolas, para fomentar la agricultura orgánica, misma actividad que permita complementarse con actividades turísticas mediante la implementación de paquetes turísticos que permitan a los visitantes conocer un poco más de acerca de los productores y el tipo de actividades que realizan, así como de sus costumbres, comidas etc. Por consiguiente el ingreso por este rubro puede ser una alternativa de despegue de los altos índices de pobreza existentes en la zona, tal y como lo promulga el ordenamiento territorial en busca de un desarrollo integral del territorio, trayendo como consecuencia el bienestar de la población.

De esta manera se asegura que la cobertura boscosa se conserve mediante el cumplimiento de las leyes, además de la reorientación de actividades de producción agropecuaria que permitan el desarrollo sostenible del territorio y la armonía con el medio ambiente. Dicha propuesta permitirá revertir en cierta medida la problemática actual de las cuencas hidrográficas de la región hondureña, expresada por Vargas (1992) al incorporar actividades de manejo y uso de la tierra adecuadas que minimicen el deterioro de la mismas y proteger el patrimonio de las futuras generaciones. Según lo expresado por Ogata, (2000) esta propuesta se enmarca dentro de los objetivos primordiales en la “Estrategia Nacional de Ordenamiento Territorial”, ya que apunta hacia el uso racional de los recursos naturales y los sistemas productivos de la sub-cuenca y consecuentemente del país.

En el mapa 6 se representa geográficamente la propuesta de ordenamiento territorial recomendada para la sub-cuenca del Río Copán.



Mapa 6. Ordenamiento territorial, sub-cuenca del Río Copán

#### 4.1.4 Análisis de conflictos de uso de la tierra

##### 4.1.4.1 Conflictos entre el uso actual y el escenario base

En esta fase del estudio se comparó el escenario base generado en la modelación de uso de la tierra con el escenario de uso actual del suelo, mediante un análisis de conflictos entre ambos, donde áreas con uso igual se determinaron como uso correcto, y áreas disímiles como conflictos de uso.

Al sobreponer las capas del escenario base y de uso actual de la tierra para generar el mapa de conflicto de uso se logró establecer que el 75.43% de las mismas presentan conflictos de uso entre sí, mientras que el restante 24.57% corresponde a uso correcto (ver figura 10).

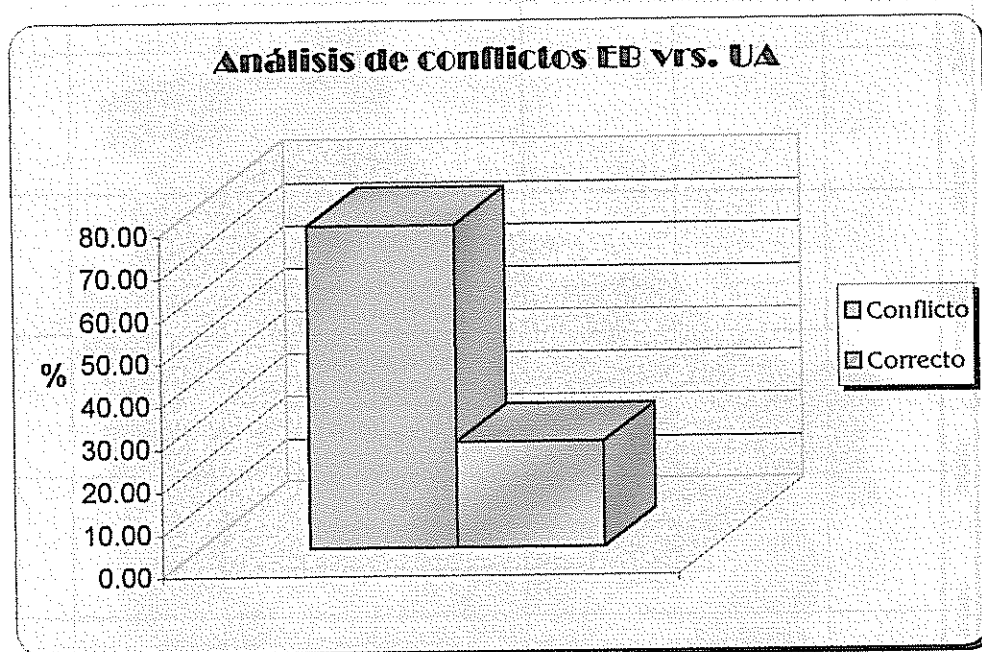
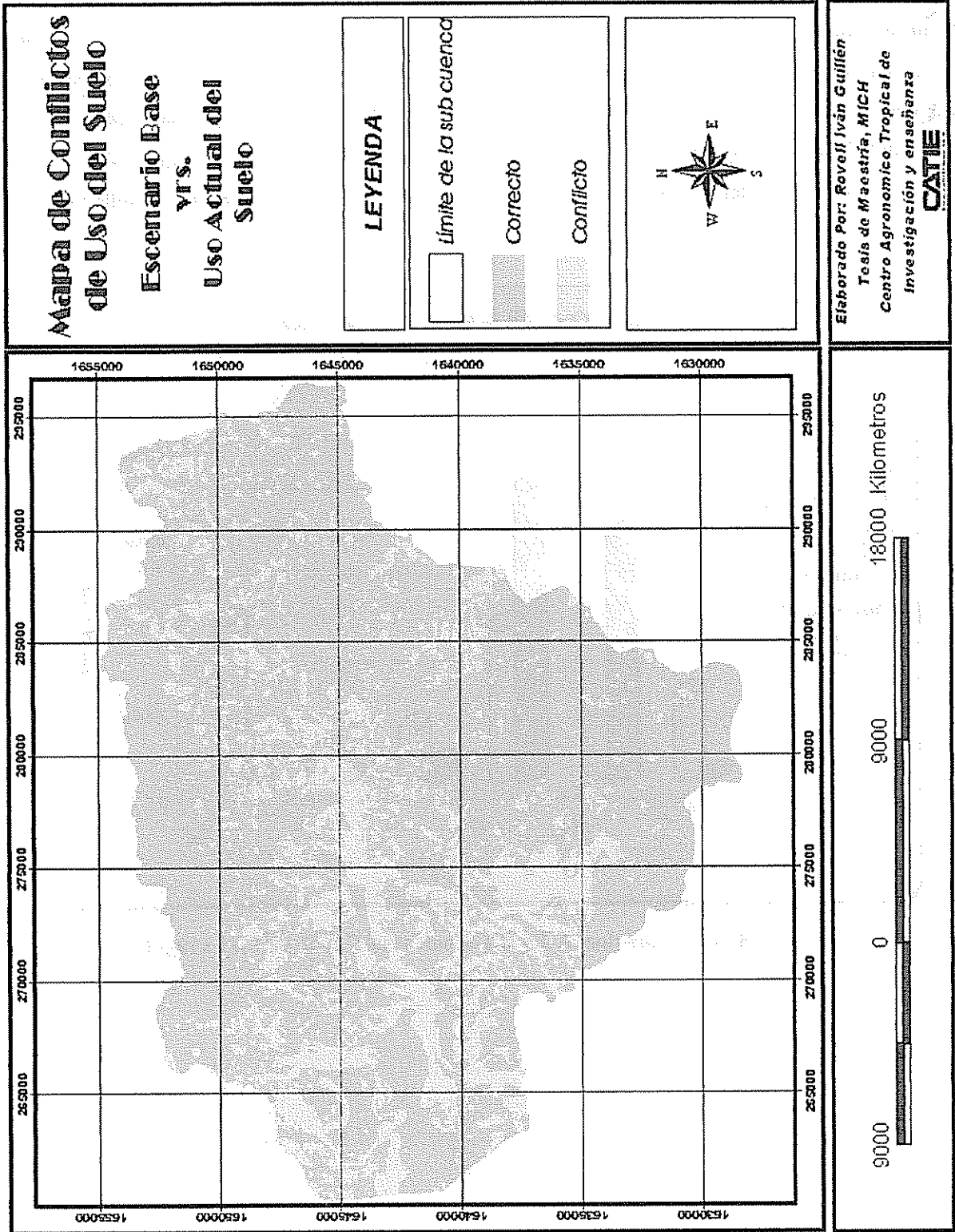


Figura 10. Análisis de conflictos de uso entre EB y UA, sub-cuenca del Río Copán

El escenario generado por el modelo de optimización (EB) a través de la interfase entre GAMS Y ArcView se muestra en el mapa 6, el mismo fue utilizado para sobreponerlo sobre la capa de uso actual y así realizar el análisis de conflictos.

En el mapa 7 se representan geográficamente los resultados obtenidos en el análisis de conflictos de sub-cuenca. En éste se muestran las áreas que presentan las categorías definidas como conflictos de uso y uso correcto entre las capas de condiciones actuales del sistema (uso actual del suelo) y el escenario base (OT propuesto por el modelo).





Mapa 7. Conflictos de uso entre EB y UA, sub-cuenca del Río Copán

Al realizar la comparación entre las áreas de los usos propuestos por el escenario base y el uso actual del suelo se encontraron discrepancias entre algunos usos (ver figura 11). El bosque sin uso y el pasto se disminuyen en un 100% en el escenario base. En el caso del cultivo del café, éste disminuye un 78.2%, el bosque para aprovechamiento forestal es promovido con un aumento del 34.2%, al igual que el cultivo de granos básicos (maíz, frijol de primera y de postrera) que aumenta en un 21.3% de su área actual, y finalmente las áreas de guamil se reducen en el escenario base en su totalidad (100%).

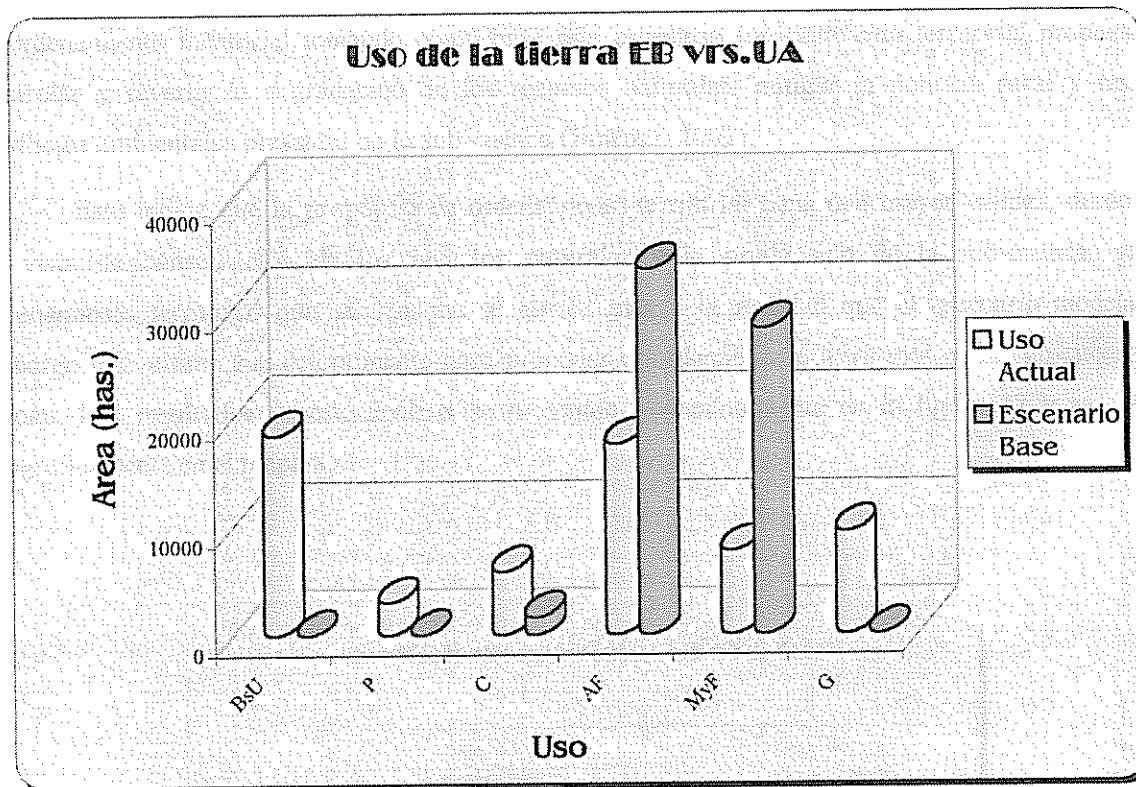


Figura 11. Uso de la Tierra entre EB y UA, sub-cuenca del Río Copán

#### 4.1.4.2 Conflictos entre ordenamiento territorial propuesto y uso actual

El análisis de conflictos de uso de la tierra, efectuado entre la propuesta de ordenamiento territorial y el uso actual de la tierra reflejaron un 63.44 % de áreas en conflicto de uso, mientras que el 36.56 % del área restante se establecieron como un uso correcto.

Al comparar los resultados de este análisis de conflictos y los resultados de los conflictos de uso entre el escenario base y el uso actual se puede observar una disminución en las áreas que se determinaron con conflictos de uso de la tierra, tal situación permite encaminar acciones para planificar adecuadamente el ordenamiento territorial tomando como base este escenario (ordenamiento territorial propuesto) y así controlar y revertir la degradación de los recursos naturales, mitigar la pobreza rural y resolver los conflictos ambientales presentes en la sub-cuenca (Jiménez, 2001).

Esto indica que la propuesta de ordenamiento territorial tiene una mayor validez, desde el punto de vista de conservación de los recursos naturales y la producción de la sub-cuenca, ya que el ordenamiento territorial que se propone se acerca más a la realidad que el escenario modelado. Sin embargo este último fue determinante para proponer el ordenamiento territorial en la sub-cuenca del Río Copán. Los resultados de este análisis se presentan porcentualmente en la figura 12 y se representan geográficamente en el mapa 8.

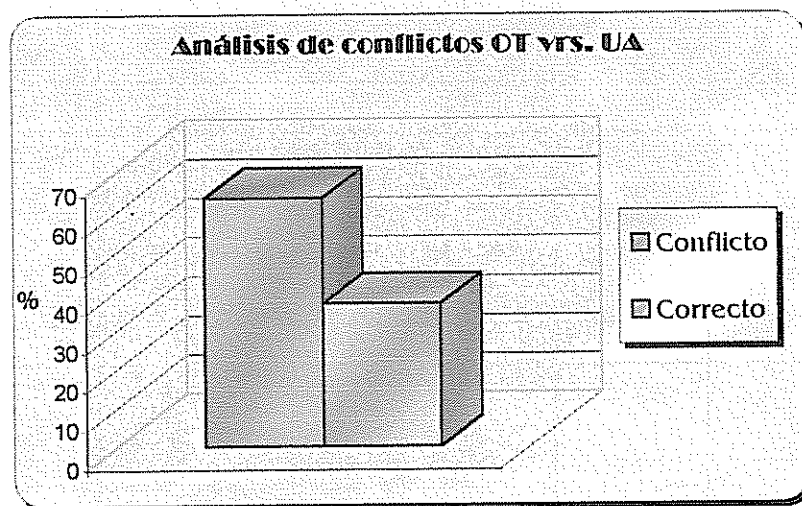


Figura 12. Análisis de conflictos de uso entre OT y UA, sub-cuenca del Río Copán

**Mapa de Conflictos de Uso del Suelo**

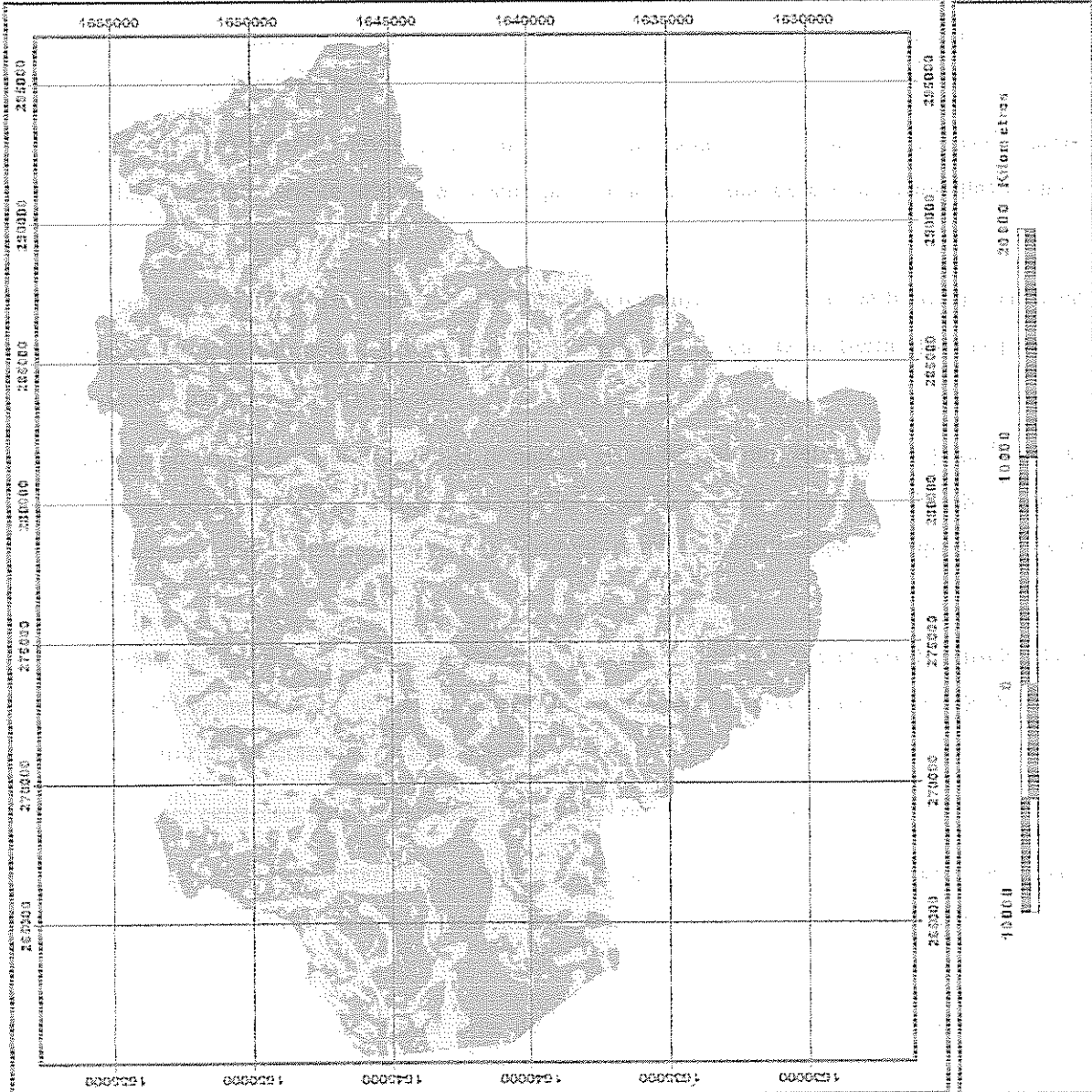
Ordenamiento Territorial vs. Uso Actual del Suelo

**LEYENDA**

Conflictos

Correcto

Escuela Politécnica Superior de Ingenieros de Montes, UNED  
Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza  
**CATIE**



Mapa 8. Conflictos de uso entre OT y UA, sub-cuenca del Río Copán

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- ❖ Se determinó una propuesta de ordenamiento del territorial para la subcuenca del Río Copán modelando la situación actual de la misma, en ésta se logró integrar variables biofísicas y socioeconómicas, con esta propuesta se permitirá orientar la planificación del ordenamiento del territorio en la zona.
- ❖ La metodología de programación lineal aplicada maximizó el desarrollo humano reflejado en el ingreso neto de la sub-cuenca, el cual aumentó en un 43.8% en el escenario modelado con base a la situación real existente en la actualidad en la zona, estableciendo un ingreso promedio mensual para la población económicamente activa de la sub-cuenca de L 4584.56 (77%) en la zona baja y de L 2286.33 (33%) en la zona alta.
- ❖ El modelo de programación lineal se adecuó a las condiciones de la sub-cuenca, siendo factible su aplicabilidad, lo que permite utilizar el mismo para otras áreas que deseen ser sometidas a un estudio similar.
- ❖ Se determinó un 75.43 % del área de la sub-cuenca con conflictos de uso de la tierra existentes entre el escenario base y el uso actual y un 63.44 % de conflictos de uso de la tierra entre la propuesta de ordenamiento territorial y el uso actual.
- ❖ El análisis de conflictos muestra que la propuesta de ordenamiento del territorio para la sub-cuenca presenta un menor porcentaje de áreas en conflicto, por lo que éste se acerca más a la realidad de la zona, situación que estratégicamente es positiva para la planificación e implementación de la propuesta.
- ❖ La principal limitante para la sub-cuenca es el consumo, razón por la cual áreas consideradas como restringidas legalmente para su uso, el modelo las utiliza para la producción de granos básicos con el fin de asegurar el autoconsumo de la población.
- ❖ Las relaciones existentes entre el escenario base y las condiciones actuales son:
  - El escenario base promueve el cultivo de los granos básicos y la utilización del bosque más que en la realidad ya que en las condiciones reales existe la falta de capital para desarrollar los mismos.
  - En la realidad existe mayor área de bosque sin uso, ya que éste no necesita inversión de capital.

- El escenario modelado tiene menos área de café, guamil pastos y bosque sin uso, porque la utilización del bosque para aprovechamiento es una actividad más rentable.
- El modelo distribuye el uso del bosque y los cultivos agrícolas en la zonas más cercanas a las vías de acceso, ya que esta condición facilita la disponibilidad de mano de obra.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- ✦ El escenario base generado en esta investigación puede ser una propuesta de ordenamiento territorial en la zona, sin embargo es importante considerar la generación de otros escenarios para realizar comparaciones entre éstos, con el fin de orientar mejor la planificación en el manejo del uso de la tierra y por ende de los recursos naturales de la sub-cuenca del Río Copán.
- ✦ De ser posible, un paso posterior y de mucha importancia sería la toma de decisiones basadas en la negociación del escenario de ordenamiento territorial con los habitantes de la sub-cuenca, quienes son los que mejor conocen su situación, ya que la implementación de un ordenamiento territorial se beneficiaría con la aceptación de los pobladores.
- ✦ El escenario generado a través de la modelación promueve usos (AF, M, F1 y F2) que aportan mayor cantidad de sedimentos, por consiguiente es importante la asistencia técnica en conservación de suelos e inspecciones rigurosas en las actividades de manejo forestal.
- ✦ Es importante utilizar en la generación de nuevos escenarios, la introducción de matrices que consideren los ingresos que percibe la sub-cuenca por concepto de turismo, así como los ingresos del Parque Arqueológico Copán Ruinas.
- ✦ La consideración de áreas vulnerables a riesgos naturales como deslizamientos e inundación debe ser fundamental y de mucha utilidad al momento de orientar la planificación del ordenamiento territorial en la sub-cuenca, así como la priorización de acciones en aquellas áreas más afectadas.

## 6 LITERATURA CONSULTADA

- BARBIER, B., G. BERGERON. 1998. Natural resource management in the hillsides of Honduras: Bioeconomic modeling at the micro-watershed level. Environment and production technology division – International Food Policy Research Institute, Eptd Discussion paper No.32. Washington, D. C. USA. 91 p.
- BEAULIEU, J., D.BENNET., S. KRAFT., R. SENGUPTA. 1998. Ecological – economic modeling on watershed basis: A case study of the Cache river of southern Illinois. Departament of Agribusiness Economics, Departament of Geography Southern Illinois University – Carbondale. Carbondale, USA. 13 p.
- BROOKE, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A. 1996. Release 2.25 gams, a user's guide. GAMS Development Corporation, N.W. Washington, DC.
- CARAPAYCA, I. 1992. La cuenca hidrográfica como unidad de manejo. Recursos 43:4.
- CASTILLO, E., MERLET, H., JANSSEN, P., VAN LEEUWEN., A. 2000. Sistema de información de recursos de tierras para la planificación una herramienta de apoyo para la planificación y ordenamiento del uso del territorio. Proyecto Regional "Información Sobre Tierras y Aguas para un Desarrollo Agrícola Sostenible". Informe Tecnico No.1 V 1. Santiago, Chile. 86 p.
- CASTILLO, E., AVILA, R., MERLET, H., JANSSEN, P., VAN LEEUWEN., A. 2000. Sistema de información de recursos de tierras para la planificación una herramienta de apoyo para la planificación y ordenamiento del uso del territorio. Proyecto Regional "Información Sobre Tierras y Aguas para un Desarrollo Agrícola Sostenible". FAO. Informe Tecnico No.1 V 2. Santiago, Chile. 122 p.
- COMISION CENTROAMERICANA DE AMBIENTE Y DESARROLLO (CCAD), INSTITUTO CENTROAMERICANO DE ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS (INCAE), CENTRO LATINOAMERICANO PARA LA COMPETITIVIDAD Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE., HARVARD INSTITUTE FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT (HIID). 1998. Potencial de carbono y fijación de dióxido de carbono de la biomasa en pie por encima del suelo en los bosques de la republica de Honduras. 56 p.
- CUBERO FERNÁNDEZ, D. 1994. manual de conservación de suelos y agua. MAG, FAO, Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica. 278 p.

- CUBERO., D. A. s.f. La cuenca hidrográfica como unidad de planificación agroconservacionista. Taller de agricultura conservacionista y sus proyecciones para el futuro. 19 p.
- CHAVEZ, S.E.; WO, E.; JIMÉNEZ, E. 1992. Documento de diagnóstico sobre las áreas de conservación; Proyecto de ordenamiento territorial. Centro de Derecho Ambiental y de los Recursos Naturales, CEDARENA.
- CORRALES, L., PRATT L. 1998. Estimación del carbono captado y almacenado (masa aérea) en los bosques de la republica de Honduras. Centro Latinoamericano para la Competitividad y el Desarrollo Sostenible del Instituto Centroamericano de Administración de Empresas (INCAE). 46 p.
- ENVIROMENTAL SYSTEMS RESEARCH INTITUTE (ESRI). 1992. Understanding GIS, the Arc/Info Method. ESRI. New York, U.S.A. 1 vol. Pags. var.
- ESTRADA, R. D., O. CHAPARRO., B. RIVERA. 1999. Utilización de modelos de simulación para la evaluación ex-ante. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Instrumentos para la toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales guía 8. 208 p. Cali, Colombia.
- FAO. 1985. Evaluación de tierras con fines forestales. Estudio FAO: Montes No. 48. FAO, Roma, Italia. 106 p.
- FAO. 1994. Directrices sobre la planificación del aprovechamiento de la tierra. Colección FAO: Desarrollo 1, FAO, Roma, Italia. 96 p.
- FAO. 2001. Programación lineal para la elaboración de escenarios óptimos de uso de la tierra: Un método para el ordenamiento territorial basado en la evaluación de tierra con estudios de caso de Brasil y Chile. Informe Técnico No. 3. proyecto regional "información sobre tierras y aguas para un desarrollo agrícola sostenible". Santiago, Chile. 71 p.
- FAUSTINO, J. 1998. Manejo de cuencas: un marco estratégico para promover el desarrollo sostenible. Agroforestería de las Américas. CATIE.5(20): 4-5.
- GONZALEZ., J. y D. ROJAS. 1996. Ensayo sobre los aspectos teórico metodológico de la relación medio ambiente - Manejo de cuencas. Revista Forestal Venezolana. 40 (2) : 93-97.
- HERNÁNDEZ., R. 2000. Escenarios de simulación del uso de la tierra en la cuenca del río Choluteca, Honduras. Escuela Nacional de Ciencias Forestales, ESNACIFOR, Siguatepeque. 78 p.



- HERZ, C. 1994. Hacia un enfoque sistémico de cuencas. Bosques y Desarrollo. Lima Perú. No. 10: 18-22.
- HONDURAS, 1991. Agenda Ambiental de Honduras. 2nd. ed. Teg.M.D.C., Honduras.
- JIMÉNEZ, A. 2000. Escenarios de desarrollo en la cuenca del río Calan, Siguatepeque, Honduras. Escuela Nacional de Ciencias Forestales, ESNACIFOR. 89 p.
- MELÉNDEZ, L., J. FAUSTINO. 1998. Carlos José Rivas: Veinte años de experiencia en gestión y manejo de cuencas hidrográficas. Agroforestería en las Américas. 5(20): 6-9.
- OGATA, G. 2000. Plan de operaciones para el desarrollo de una estrategia nacional de ordenamiento territorial Honduras: Borrador de discusión. Tegucigalpa, Honduras. 48 p.
- ORTIZ, A. 1998. Niveles de planificación del manejo de la cuenca del embalse general Francisco Morazán (El Cajón). Proyecto PROCUENCA. Tegucigalpa, Honduras. 9 p.
- RIVERA, S., 1998. Análisis de la deforestación usando técnicas de sensores remotos y sistemas de información geográfica (1965-1992). TATASCAN, Revista Técnica ESNACIFOR, Siguatepeque, Honduras.
- RICHTER, E. J., 1995. Manejo del uso de la tierra en América Central, hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra. Servicio Editorial IICA. San José Costa Rica. 439 p.
- ROSALES, J., D. OYUELA. 1998. Sistema de clasificación de tierras por su capacidad de uso para la cuenca hidrográfica el Cajón. E.N.E.E – COHDEFOR, Tegucigalpa, Honduras. 36 p.
- SAENZ, F., S. SHULTZ., G. IMÁN. 1997. Uso de los sistemas de información geográfica en la administración de recursos naturales: recomendaciones de las experiencias del INIFAP. Revista Ciencias Forestales en México. 20 (78): 93-104.
- SABORIO, L. J. 1996. Curso regional sobre: "Sistemas de información geográfica aplicados en la gestión de manejo de cuencas". Centro Interamericano de Desarrollo e investigación ambiental y territorial. Mérida, Venezuela.
- SALAS, G. DE LAS. 1987. Suelos y ecosistemas forestales; con énfasis en América tropical. IICA. San José, Costa Rica. 450 p.
- SIMMONS, C.S.; CASTELLANOS, V. 1968. Mapa general de suelos de la república de Honduras, Escala 1:1,000,000. Instituto Geográfico Nacional, Tegucigalpa, Honduras.

STONICH, S. C., 1993. I am destroying the land!, the political ecology of poverty and environmental destruction in Honduras. USA: Westview Press.

TOTOBESOLA M., BARBIER B., GARCÍA R., 2000., Evaluación económica de productos con potencial de mercado para pequeños productores: uso de la programación lineal con fincas de los municipios de Yorito y Sulaco. Proyecto Desarrollo de Agroempresas Rurales. Cali, Colombia. 49 P.

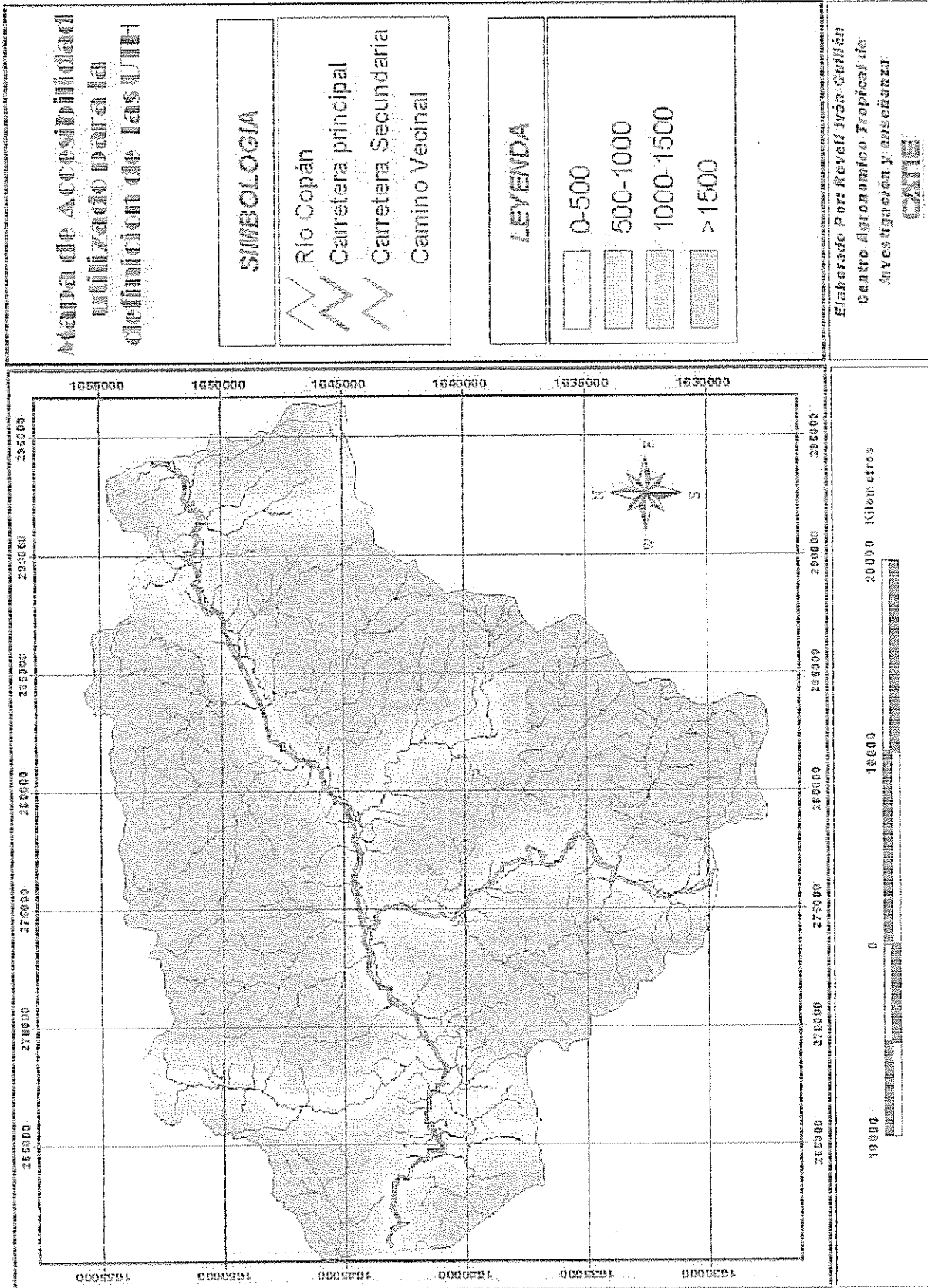
VARGAS, G. 1992. Estudio del uso actual y capacidad de uso de la tierra en América central. Anuario de estudios centroamericanos. 18(2):7-23.

CASTILLO, E., MERLET, H., JANSSEN, P., VAN LEEUWEN., A. 2000. Sistema de información de recursos de tierras para la planificación una herramienta de apoyo para la planificación y ordenamiento del uso del territorio. Proyecto Regional "Información Sobre Tierras y Aguas para un Desarrollo Agrícola Sostenible", FAO. Informe Tecnico No.1 V I. Santiago, Chile. 86 p.

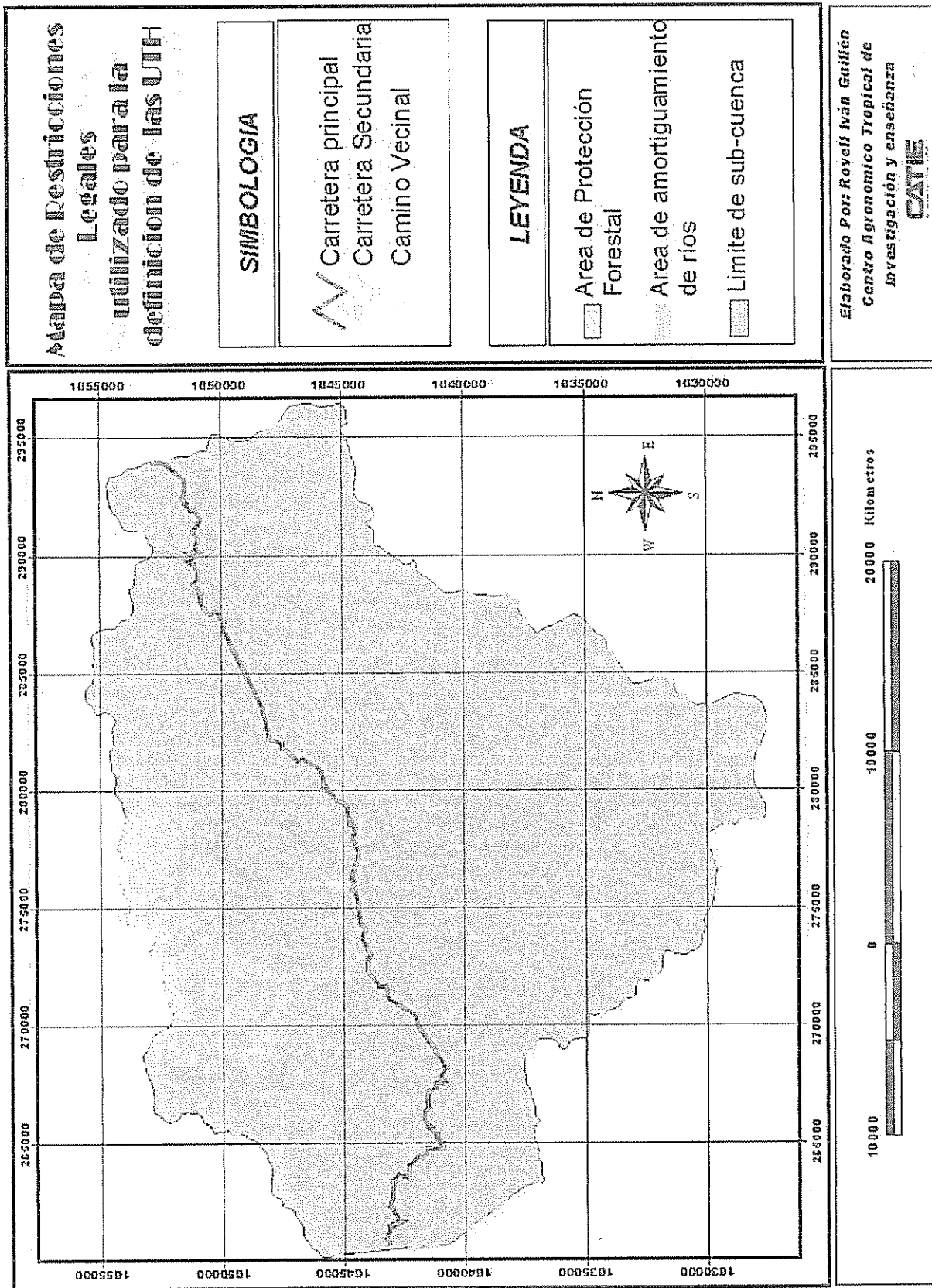
VAN LEEUWEN A.,CLAUS, G., MAINO, M. 2001. Programación lineal para la elaboración de escenarios óptimos de uso de la tierra; un método para el ordenamiento territorial basado en la evaluación de tierra con estudios de caso de brasil y chile. Proyecto Regional "Información Sobre Tierras y Aguas para un Desarrollo Agrícola Sostenible". FAO. Informe Tecnico No.3. Santiago, Chile, 71 p.

## 7 ANEXOS

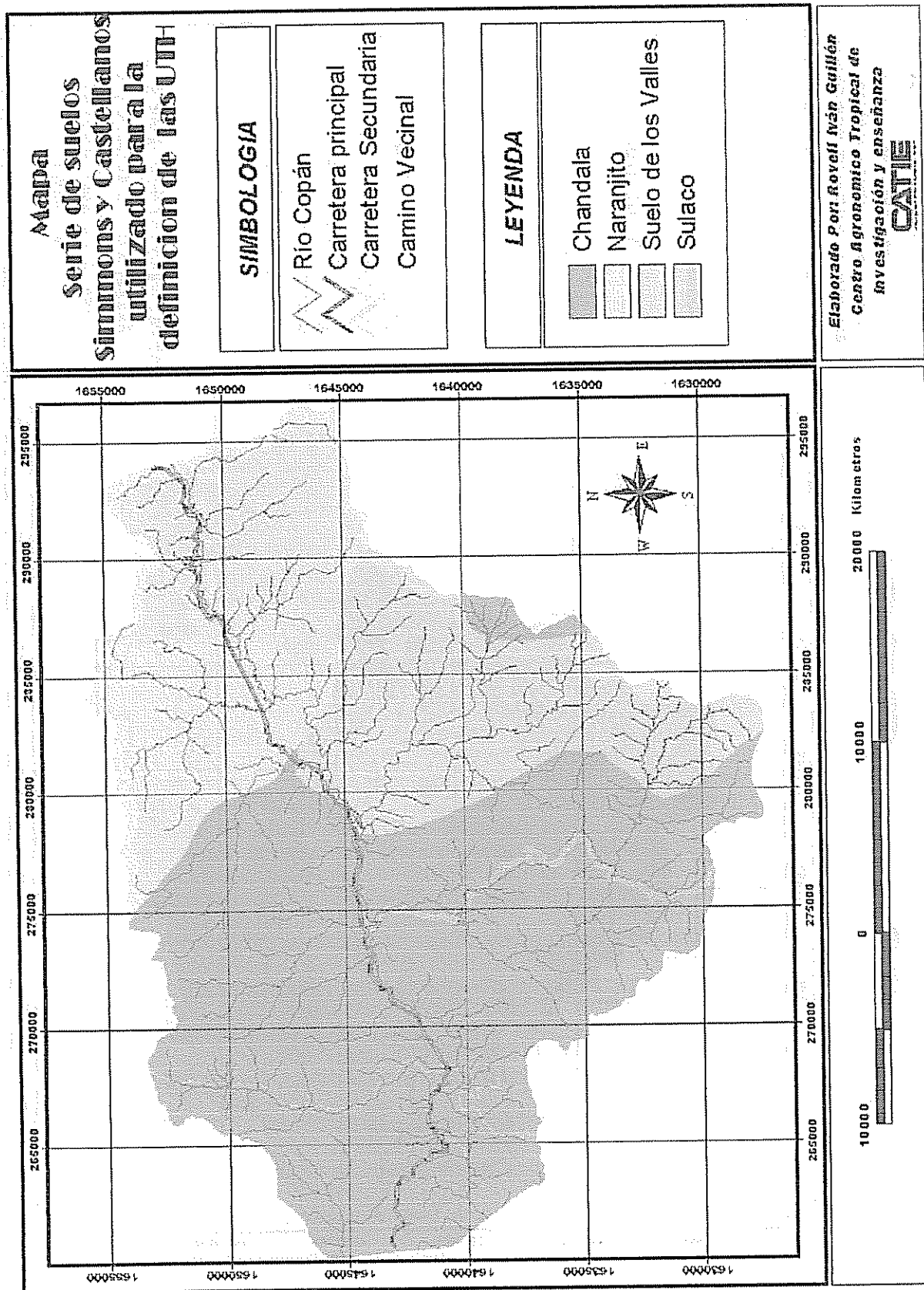
# 1A Mapa de accesibilidad sub-cuenca del Río Copán



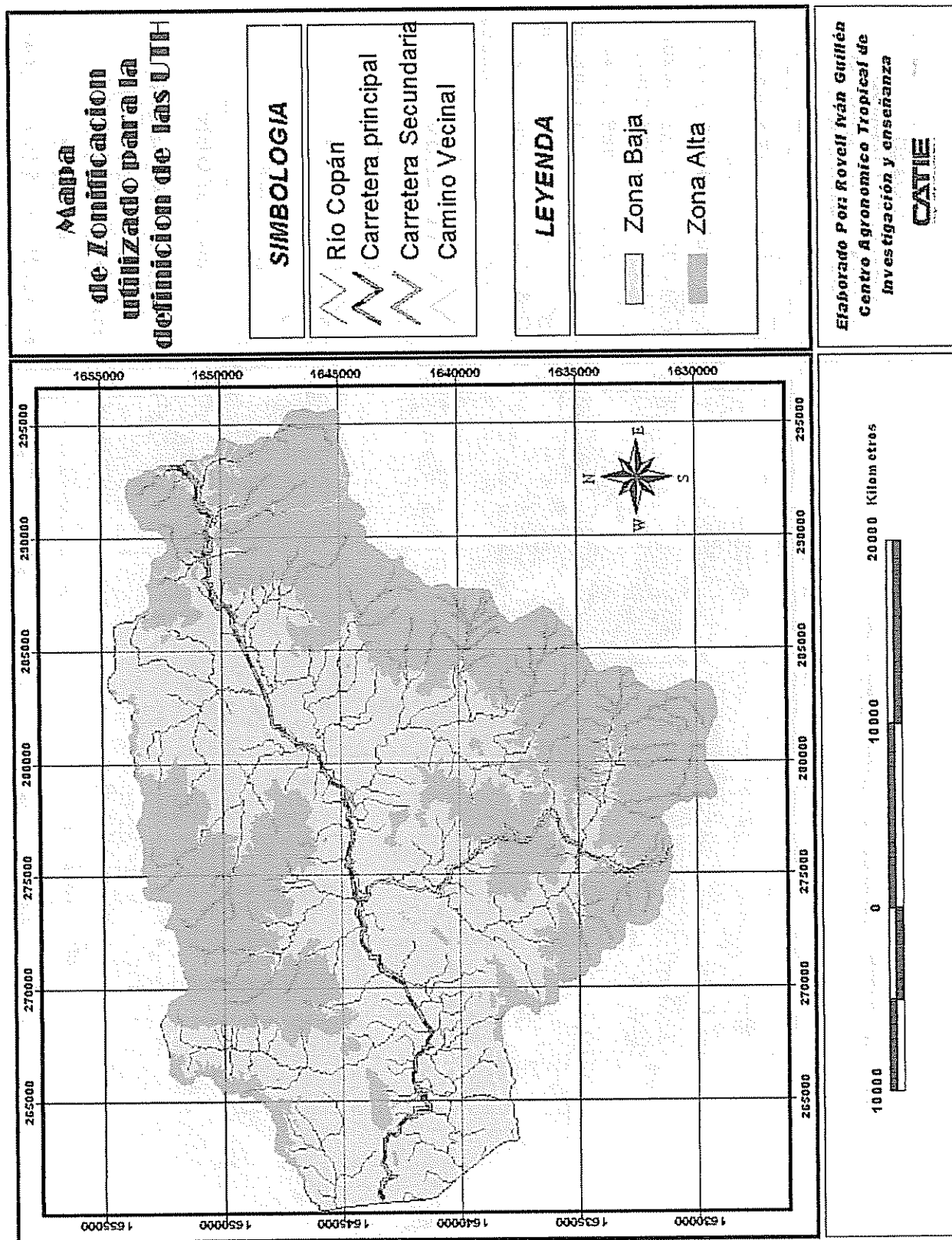
2A Mapa restricciones Legales, sub-cuenca del Río Copán



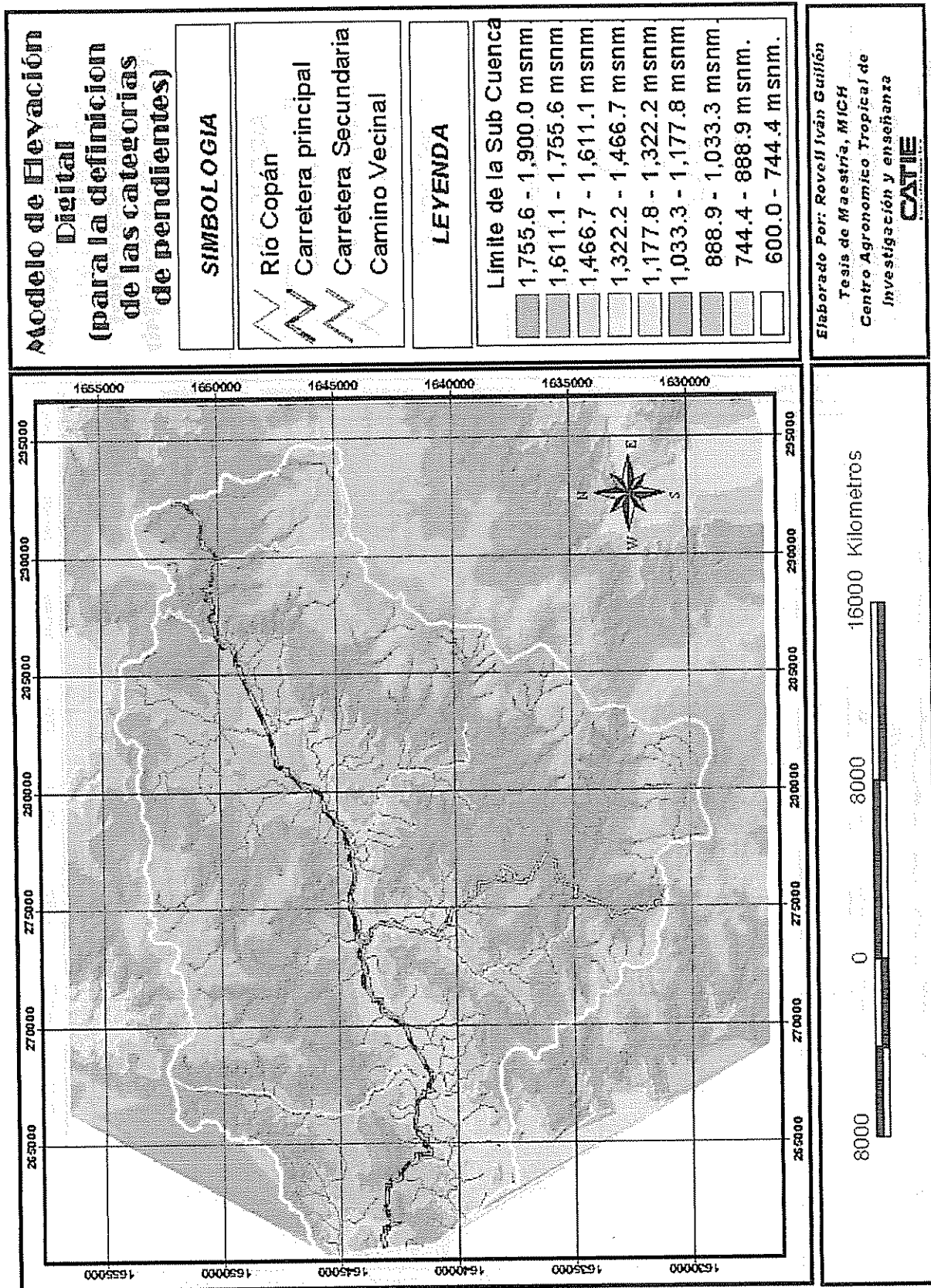
3A Mapa de suelos, sub-cuenca del Río Copán



4A Mapa de zonificación, sub-cuenca del Río Copán

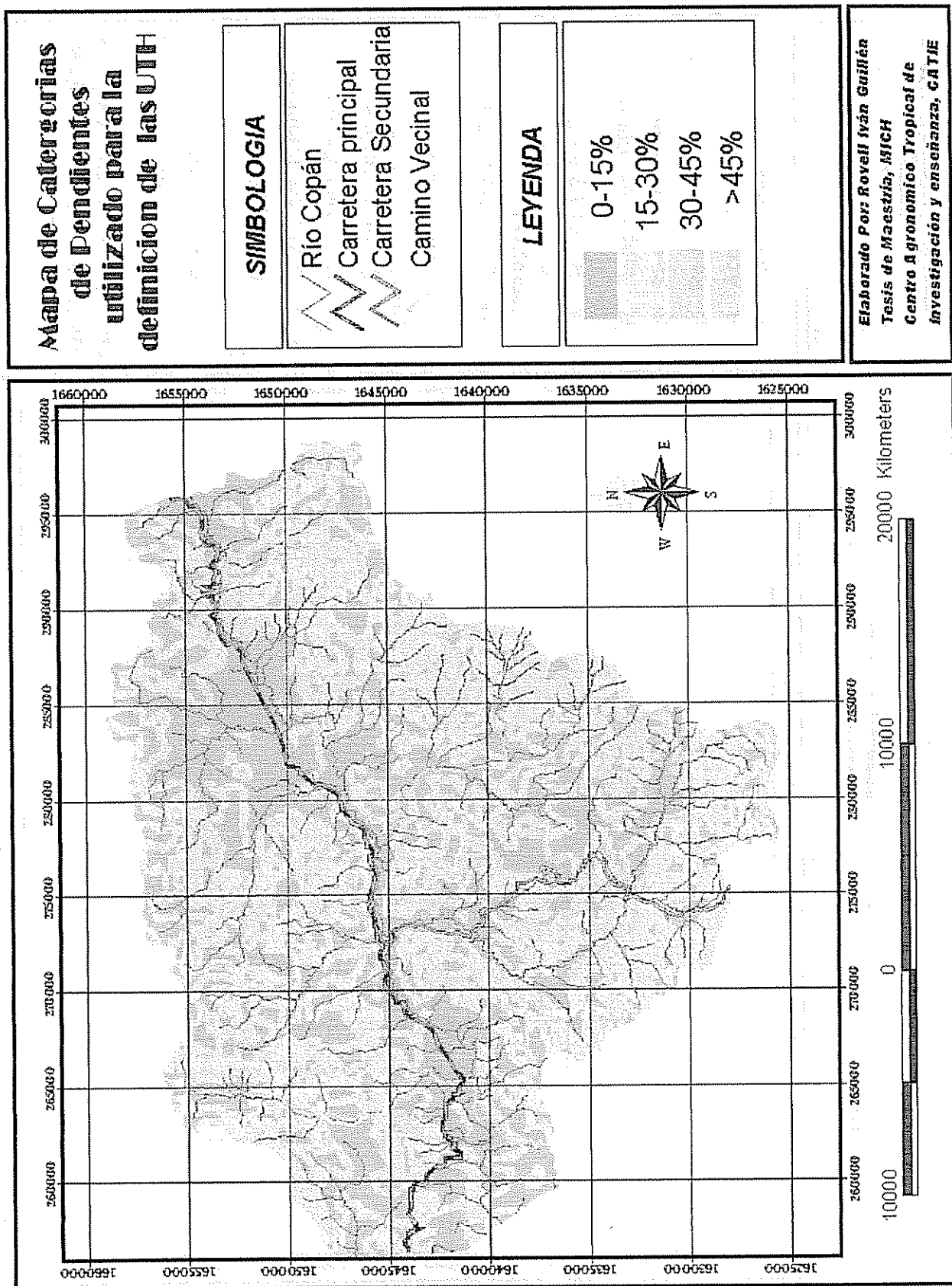


5A Modelo de elevación digital, sub-cuenca del Río Copán

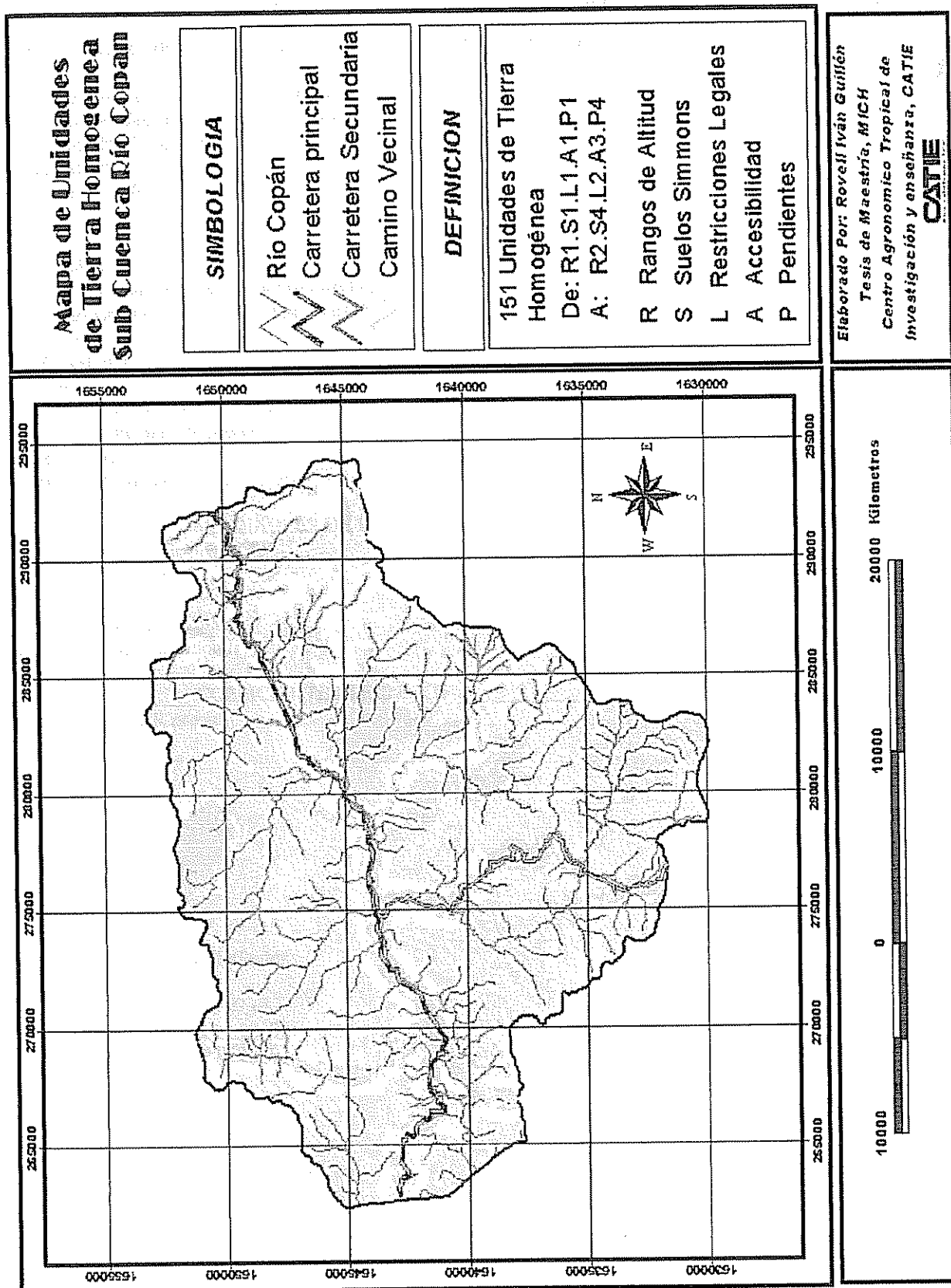




6A Mapa de pendientes, sub-cuenca del Río Copán



7A Unidades de tierra homogénea, sub-cuenca del Río Copán



## 1B Modelo general para el diseño del escenario base

Estructura del modelo de programación lineal utilizando el programa GAMS para la modelación de escenarios de uso del suelo en la sub-cuenca del Río Copán.

\*Escenarios de uso de la tierra, Subcuenca Río Copán

\*Tesis de Maestría, Rovell Iván Guillen

\*option NLP = conopt

option NLP = minos5

iterlim = 10000;

\* SET

SET

c "Cultivos"

/c1 Bosque sin aprovechamiento forestal

c2 Bosque con aprovechamiento forestal

c3 Cafe

c4 Pastizales

c5 Maiz

c6 Frijol siembra de primera

c7 Frijol siembra de postrera

c8 Matorrales/

c1(c) autoconsumo /c3,c5,c6,c7/

\* VARIABLES DE UTH

l restricciones legales /l1,l2/

a acceso /a1\*a3/

s suelo /s1\*s4/

p pendiente /p1,p2,p3,p4/

r Rangos de elevacion /r1,r2/

;

\* COEFICIENTES TECNICOS

PARAMETER precio

/c1 0.00

c2 400.99

c3 140.00

c4 1200.00

c5 300.00

c6 350.00

c7 350.00

c8 0.00/

;

Table rdmt(r,c) rendimientos

c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8

r1 0 84.5 40 1 30 14 12 0

r2 0 84.5 33 1 30 14 12 0

;

Table costo(r,c) costos

c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8

r1 0 0 4896 600 1897 1382 1382 0

r2 0 0 3800 500 1200 900 900 0

;

Table mo(a,c) mano de obra

c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8  
a1 0 0 140 12 60 80 80 0  
a2 0 0 90 12 68 88 88 0  
a3 0 0 80 12 76 96 96 0

;/  
Table keros(r,p,c) erosion ton. por ha. (Rivera y Leon)

c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8  
r1.p1 0.20 13.50 4.70 3.20 188.00 118.00 118.00 4.80  
r1.p2 0.22 14.85 5.17 3.52 129.80 129.80 129.80 5.28  
r1.p3 0.24 16.34 5.69 3.87 142.78 142.78 142.78 5.81  
r1.p4 0.27 17.97 6.26 4.26 157.06 157.06 157.06 6.39  
r2.p1 0.20 13.50 4.70 3.20 188.00 118.00 118.00 4.80  
r2.p2 0.22 14.85 5.17 3.52 129.80 129.80 129.80 5.28  
r2.p3 0.24 16.34 5.69 3.87 142.78 142.78 142.78 5.81  
r2.p4 0.27 17.97 6.26 4.26 157.06 157.06 157.06 6.39

;/  
parameter qagua(C) aporte de agua al caudal(m3 por ha)

/c1 78350.16  
c2 57628.27  
c3 75682.04  
c4 76401.00  
c5 47067.61  
c6 47067.61  
c7 47067.61  
c8 53841.77

;/  
parameter qcarbono(c) almacenamiento de carbono (ton. por ha.)

\*ton de Carbono/ha.

/ c1 103.833  
c2 2.086  
c3 48.36  
c4 0  
c5 0  
c6 0  
c7 0  
c8 20

;/  
Table mtierra(r,s,l,a,p) area de cada unidad de tierra homogenea

	al.p1	al.p2	al.p3	al.p4	a2.p1	a2.p2
r1.s1.11	1926.32	921.25	71.72	7.17	706.84	513.67
r1.s1.12	1726.73	1256.63	299.32	81.69	1167.90	1548.40
r1.s2.11	547.65	144.97	54.96	2.90	252.72	62.15
r1.s2.12	592.40	138.51	78.24	16.11	451.41	89.09
r1.s3.11	529.12	109.12	8.91	3.00	214.22	69.11
r1.s3.12	354.37	270.90	34.07	5.63	321.88	394.42
r1.s4.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
r1.s4.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
r2.s1.11	38.57	72.46	16.10	1.74	21.41	110.17
r2.s1.12	203.43	204.91	109.04	36.09	302.77	307.02

r2.s2.11	88.18	93.88	35.80	4.55	88.28	83.03
r2.s2.12	452.30	329.46	131.96	70.20	451.47	412.51
r2.s3.11	0.23	0.00	0.00	0.00	3.83	9.81
r2.s3.12	1.44	9.56	0.25	0.00	10.81	39.07
r2.s4.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
r2.s4.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

+	a2.p3	a2.p4	a3.p1	a3.p2	a3.p3	a3.p4
r1.s1.11	75.64	13.30	2151.96	1457.68	361.80	37.30
r1.s1.12	358.18	37.97	2645.98	3539.38	1489.06	148.90
r1.s2.11	25.40	5.07	1289.88	350.40	148.97	15.56
r1.s2.12	31.48	21.69	1927.92	1264.11	323.63	70.47
r1.s3.11	8.67	0.00	586.19	377.68	70.46	2.94
r1.s3.12	57.93	6.35	661.83	704.08	251.32	3.57
r1.s4.11	0.00	0.00	169.90	7.81	0.50	0.00
r1.s4.12	0.00	0.00	40.29	1.04	1.18	0.00
r2.s1.11	96.68	18.67	1450.57	2448.63	1205.49	162.16
r2.s1.12	153.80	64.96	1586.75	2541.39	1853.33	429.49
r2.s2.11	13.65	1.95	602.64	813.15	281.56	39.64
r2.s2.12	193.33	48.66	1056.27	1348.47	605.15	134.76
r2.s3.11	0.00	0.00	272.43	628.96	462.02	75.37
r2.s3.12	27.57	2.11	543.75	1257.25	1199.46	291.60
r2.s4.11	0.00	0.00	242.89	420.60	143.35	11.36
r2.s4.12	0.00	0.00	243.43	712.26	317.57	32.45

Parameter consu(c) autoconsumo

/c1 0

c2 0

c3 1.35

c4 0

c5 10.09

c6 2.07

c7 2.07

c8 0

;

Parameter dispomo(r) Poblacion Economicamente Activa (PEA)

/r1 18087

r2 19972

;

Parameter Pobtotl(r) Habitantes totales

/r1 29173

r2 32213

;

Parameter Aumpobl(r) Aumento de la Poblacion total

/r1 37048

r2 40910

;

Parameter AumPEA(r) Aumento Poblacion Economicamente Activa

/r1 22970

r2 25364

;

Parameter dispcap(r) Disponibilidad de Capital en Lps.

\*lempiras  
 /r1 48323725.21  
 r2 53359951.34

/\*  
 \_\_\_\_\_ VARIABLES \_\_\_\_\_

VARIABLES  
 ingtotal            lps;  
 POSITIVE VARIABLES  
 INGRESO ingreso    lps  
 X                    has  
 COMPRA             qq

;  
 EQUATIONS  
 \*Definicion de la funcion objetivo  
 Imax            Funcion Objetivo

\*Definicion de las restricciones  
 LINGRESO        Definicion del ingreso en lps  
 LTIERRA        Límite de Tierra  
 LCAPITAL        Límite de capital  
 LMANOBRA       Límite mano de obra  
 LCONSUMO       Límite de consumo

;  
 \*Ecuacion para la funcion objetivo

$$\text{Imax}.. \text{ingtotal} = \text{E} = \text{sum}(\text{r}, \text{ingreso}(\text{r}));$$

$$\begin{aligned} \text{LINGRESO}(\text{r}).. \text{INGRESO}(\text{r}) = \text{E} = \\ \text{sum}((\text{p}, \text{l}, \text{s}, \text{a}, \text{c}), \text{rdmt}(\text{r}, \text{c}) * \text{precio}(\text{c}) * \text{X}(\text{r}, \text{p}, \text{l}, \text{s}, \text{a}, \text{c}) \\ - 1.3 * \text{precio}(\text{c}) * \text{COMPRA}(\text{r}, \text{c}) \\ - \text{costo}(\text{r}, \text{c}) * \text{X}(\text{r}, \text{p}, \text{l}, \text{s}, \text{a}, \text{c}) \\ - 85 * \text{keros}(\text{r}, \text{p}, \text{c}) * (\text{X}(\text{r}, \text{p}, \text{l}, \text{s}, \text{a}, \text{c}) * 0.7) \\ + 170 * \text{qcarbono}(\text{c}) * (\text{X}(\text{r}, \text{p}, \text{l}, \text{s}, \text{a}, \text{c}) * 0.7)); \end{aligned}$$

\*Ecuaciones para definir las restricciones

$$\text{LTIERRA}(\text{r}, \text{s}, \text{l}, \text{a}, \text{p}).. \text{sum}((\text{c}), \text{X}(\text{r}, \text{p}, \text{l}, \text{s}, \text{a}, \text{c})) = \text{e} = \text{mtierra}(\text{r}, \text{s}, \text{l}, \text{a}, \text{p}) / 0.7;$$

$$\text{LCAPITAL}(\text{r}).. \text{sum}((\text{s}, \text{l}, \text{a}, \text{p}, \text{c}), \text{costo}(\text{r}, \text{c}) * \text{X}(\text{r}, \text{p}, \text{l}, \text{s}, \text{a}, \text{c})) = \text{l} = \text{dispcap}(\text{r}) * \text{dispomo}(\text{r});$$

$$\text{LMANOBRA}(\text{r}).. \text{sum}((\text{s}, \text{l}, \text{a}, \text{p}, \text{c}), \text{mo}(\text{a}, \text{c}) * \text{X}(\text{r}, \text{p}, \text{l}, \text{s}, \text{a}, \text{c})) = \text{l} = \text{dispomo}(\text{r}) * 200;$$

$$\begin{aligned} \text{LCONSUMO}(\text{r}, \text{c}) \$ \text{cl}(\text{c}).. \text{sum}((\text{l}, \text{a}, \text{s}, \text{p}), \text{X}(\text{r}, \text{p}, \text{l}, \text{s}, \text{a}, \text{c}) * \text{rdmt}(\text{r}, \text{c}) \\ + \text{COMPRA}(\text{r}, \text{c})) \\ = \text{g} = \text{consu}(\text{c}) * \text{pobtotl}(\text{r}); \end{aligned}$$

\* \_\_\_\_\_ Cierre del Modelo \_\_\_\_\_

MODEL RioCopán/all/  
 option limrow = 1;  
 RioCopán.scaleopt = 1  
 ;  
 file res / RioCopán.txt/;  
 file res1 / RioCopán.txt/;  
 file res2 / RioCopán.txt/;  
 file res3 / RioCopán.txt/;

file res4 / RioCopán.txt/;  
file res5 / RioCopán.txt/;

solve RioCopán using nlp maximizing INgtotal;

\* \_\_\_\_\_ Programacion para los archivos de resultados \_\_\_\_\_  
\*parametros para cálculo de indicadores

parameter erosion(l,a,s,p,r,c) erosion por UTH;  
erosion(l,a,s,p,r,c)=keros(r,p,c)\*(X.l(l,a,s,p,r,c)\*0.7);

parameter eros(r) erosion total;  
eros(r)=sum((l,a,s,p,c), erosion(l,a,s,p,r,c))

parameter carbono(l,a,s,p,r,c) carbono por UTH;  
carbono(l,a,s,p,r,c)=qcarbono(c)\*(X.l(l,a,s,p,r,c)\*0.7);

parameter carb(r) carbono total;  
carb(r)=sum((l,a,s,p,c), carbono(l,a,s,p,r,c));

parameter agua(l,a,s,p,r,c) volumen de agua por UTH;  
agua(l,a,s,p,r,c)=qagua(c)\*(X.l(l,a,s,p,r,c)\*0.7);

parameter agu(r) agua total;  
agu(r)=sum((l,a,s,p,c), agua(l,a,s,p,r,c));

parameter ing\_ha(r,c) ingreso por hectarea;  
ing\_ha(r,c)=(rdmt(r,c)\*(precio(c)-costo(r,c)))/0.7;

parameter ingpop(r) ingreso por trabajador(PEA);  
ingpop(r)=ingreso.l(r)/dispomo(r);

parameter trabajo(l,a,s,p,r,c) dias totales de trabajo por UTH;  
trabajo(l,a,s,p,r,c)=mo(a,c)\*X.l(l,a,s,p,r,c);

parameter HTtrabajo(r) dias hombre totales de trabajo por UTH;  
HTtrabajo(r)=sum((l,a,s,p,c), trabajo(l,a,s,p,r,c));

\*PROGRAMACION DE INTERFASE GAMS-ARC/VIEW

parameter peruso(l,a,s,p,r,c) porcentaje;  
peruso(l,a,s,p,r,c)\$mtierra(r,s,l,a,p)=X.L(l,a,s,p,r,c)/(mtierra(r,s,l,a,p)/0.7);  
display peruso;

parameter peruso1(l,a,s,p,r) mezcla maiz frijol;  
peruso1(l,a,s,p,r)\$mtierra(r,s,l,a,p)=(  
peruso(l,a,s,p,r,'c5')  
+peruso(l,a,s,p,r,'c6')  
+peruso(l,a,s,p,r,'c7'))  
/(mtierra(r,s,l,a,p)/0.7);  
;

parameter peruso2(l,a,s,p,r) bosque;  
peruso2(l,a,s,p,r)\$mtierra(r,s,l,a,p)=(  
peruso(l,a,s,p,r,'c1')  
+peruso(l,a,s,p,r,'c2'))/(mtierra(r,s,l,a,p)/0.7);  
;

\*Usos dominantes de la tierra

parameter uso1(l,a,s,p,r) dominante latifoliado(sin uso);

uso1(l,a,s,p,r)\$ (peruso(l,a,s,p,r,'c1')gt 0.8)=1;

display uso1;

parameter uso2(l,a,s,p,r) dominante Bosque de Coniferas (con uso);

uso2(l,a,s,p,r)\$ (peruso(l,a,s,p,r,'c2')gt 0.8)=2;

display uso2;

parameter uso3(l,a,s,p,r) dominante cafe;

uso3(l,a,s,p,r)\$ (peruso(l,a,s,p,r,'c3')gt 0.8)=3;

display uso3;

parameter uso4(l,a,s,p,r) dominante pastizales;

uso4(l,a,s,p,r)\$ (peruso(l,a,s,p,r,'c4')gt 0.8)=4;

display uso4;

parameter uso5(l,a,s,p,r) dominante maiz;

uso5(l,a,s,p,r)\$ (peruso(l,a,s,p,r,'c5')gt 0.8)=5;

display uso5;

parameter uso6(l,a,s,p,r) dominante frijol siembra de primera;

uso6(l,a,s,p,r)\$ (peruso(l,a,s,p,r,'c6')gt 0.8)=6;

display uso6;

parameter uso7(l,a,s,p,r) dominante frijol siembra de postrera;

uso7(l,a,s,p,r)\$ (peruso(l,a,s,p,r,'c7')gt 0.8)=7;

display uso7;

parameter uso8(l,a,s,p,r) dominante matorrales(sin uso);

uso8(l,a,s,p,r)\$ (peruso(l,a,s,p,r,'c8')gt 0.8)=8;

display uso8;

\*Porcentajes de mezcla por uso de la tierra

parameter usoA(l,a,s,p,r) maiz frijol;

usoA(l,a,s,p,r)\$ (peruso1(l,a,s,p,r)gt 0.1)=100;

parameter usoC(l,a,s,p,r) cafe;

usoC(l,a,s,p,r)\$ (peruso(l,a,s,p,r,'c3')gt 0.05)=1000;

parameter usoP(l,a,s,p,r) pastizales;

usoP(l,a,s,p,r)\$ (peruso(l,a,s,p,r,'c4')gt 0.3)=10000;

parameter usoB(l,a,s,p,r) Bosque;

usoB(l,a,s,p,r)\$ (peruso2(l,a,s,p,r)gt 0.4)=100000;

parameter usoM(l,a,s,p,r) matorrales;

usoM(l,a,s,p,r)\$ (peruso(l,a,s,p,r,'c8')gt 0.4)=1000000;

parameter zer(l,a,s,p,r) cero uso en las UTH;

zer(l,a,s,p,r)\$ (mtierra(r,s,l,a,p)eq 0)=20;

display zer;

parameter usot(l,a,s,p,r) sumatoria de codigos;

usot(l,a,s,p,r)=

uso1(l,a,s,p,r)

+uso2(l,a,s,p,r)



```

+uso3(l,a,s,p,r)
+uso4(l,a,s,p,r)
+uso5(l,a,s,p,r)
+uso6(l,a,s,p,r)
+uso7(l,a,s,p,r)
+uso8(l,a,s,p,r)
+usoA(l,a,s,p,r)
+usoC(l,a,s,p,r)
+usoP(l,a,s,p,r)
+usoB(l,a,s,p,r)
+usoM(l,a,s,p,r)
+zer(l,a,s,p,r);
display usot
;

```

\*RESULTADOS (ARCHIVOS)

```
PUT res;
```

```
*tabla resumen de resultados
```

```

put/
put "indicador "" ""R1"" ""R2"" ""TOTAL"/
put "ingreso Total"" :
loop(r,
put ingreso.l(r):13:2" ")
put ingtotal.l :13:2" "
put/

```

```

put "ingreso/PEA "" "
loop(r,
put ingpop(r):13:2 """)
put/

```

```

put "dias trabajo"" "
loop(r,
put HTtrabajo(r):13:2" ")
put(sum((l,a,s,p,r,c),trabajo(l,a,s,p,r,c))):13:2""
put/

```

```

put "erosion "" "
loop(r,
put eros(r):13:2" ")
put(sum((l,a,s,p,r,c),erosion(l,a,s,p,r,c))):13:2""
put/

```

```

put "agua "" "
loop(r,
put agu(r):13:2" ")
put(sum((l,a,s,p,r,c),agua(l,a,s,p,r,c))):13:2""
put/

```

```

put "carbono "" "
loop(r,
put carb(r):13:2" ")
put(sum((l,a,s,p,r,c),carbono(l,a,s,p,r,c))):13:2""
put/

```

```
PUT res1;  
put/
```

```
put"Area de uso para cada cultivo"  
put/  
put/  
put"Cultivo "" ""R1"" ""R2"" "/  
loop(c,  
put c.tl:3""  
loop(r,  
put sum((l,a,s,p),(X.l(l,a,s,p,r,c)*0.7)):13:0""  
put/  
put/  
loop(c,  
put c.tl""  
loop(r,  
put sum((l,a,s,p),(X.m(l,a,s,p,r,c)*0.7)):13:0""  
put/)
```

```
put res2;  
put/  
*Asignacion de uso por UTH, Interfase GAMS-ARC/VIEW  
put " "Cod"" ,""USO""/  
loop(l,  
loop(a,  
loop(s,  
loop(p,  
loop(r,  
put l.tl:2""  
put a.tl:2""  
put s.tl:2""  
put p.tl:2""  
put r.tl:2" , "  
loop(c,  
put usot(l,a,s,p,r):0:0""  
put/))))))
```

```
put res3;  
*Area por cultivo y por UTH  
put " ""UTH"" ""BL"" ""BC"" ""C"" ""p"  
" ""M1"" ""F1"" ""F2"" ""M2"" "/  
loop(l,  
loop(a,  
loop(s,  
loop(p,  
loop(r,  
put l.tl:2""  
put a.tl:2""  
put s.tl:2""  
put p.tl:2""  
put r.tl:2" , "  
loop(c,  
put((X.l(l,a,s,p,r,c)*0.7):6:2""  
put/))))))
```

## 2B Formulas utilizadas para el cálculo de captura de carbono

### CUANTIFICACIÓN DE CARBONO

#### 1.1 Ecuaciones

##### 1.1.1 Factor de Expansión de Volumen (FEV)

(Brown, 1996 citado por Alpizar, 1997). Al estarse utilizando datos de volumen comercial extraídos de inventarios forestales con fines comerciales ( $\geq 30$  cm), se desprecia el volumen no comercial, contemplado en el rango de diámetro entre 10 cm y 30 cm.

Se requiere entonces realizar un ajuste que posibilite expandir los datos de volumen a todo el espectro de diámetros de un bosque, o sea desde los 10 cm como mínimo. Para tal efecto, se recurre al Factor de Expansión de Volumen (FEV) para realizar tal corrección. Dicho ajuste se hace dependiendo de si el volumen reportado es  $>$  o  $<$  a 250 m<sup>3</sup>/ha.

$$\text{FEV} = e \{ 1,3 - 0,209 * \ln(\text{Vol}) \} \text{ si } < 250 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$\text{FEV} = 1,13 \text{ si } = 250 \text{ m}^3/\text{ha}$$

##### 1.1.2 Factor de Expansión de Biomasa (FEB)

(Brown, 1996 citado por Alpizar, 1997) Al estarse utilizando así mismo datos de biomasa comercial éstos no han considerado la totalidad del árbol por encima del suelo (ramas, follaje). Para ello se requiere de la utilización de un factor de Expansión de Biomasa (FEB), el cuál depende de si la biomasa reportada es  $=$  a 190 t/ha o  $<$  a 190 t/ha.

$$\text{FEB} = e \{ 3,213 - 0,506 * \ln(\text{biomasa}) \} \text{ si } < 190 \text{ t/ha}$$

$$\text{FEB} = 1,75 \text{ si } = 190 \text{ t/ha}$$

##### 1.1.3. Cuantificación de Carbono

$$\text{CBp} = \text{At} \times \text{BI} \times \text{Rc}$$

donde; CBp = Carbono estimado contenido en el bosque primario

At = Área total del bosque primario

BI = Biomasa promedio del bosque primario

Rc = Contenido de carbono en la biomasa estimada en un 50%, según IPCC (1996)

##### 1.1.4. Fijación de Carbono

$$\text{Cf} = \text{Área} * (\text{IMA} * \text{Dm}) * 0,5$$

donde;

Cf = Carbono fijado en toneladas

IMA = Incremento medio anual en volumen ( m<sup>3</sup>/ha)

Dm = Densidad de la madera en t/m<sup>3</sup>

##### 1.1.5 Emisión evitada

$$\text{EE} = \text{Área} * \text{Contenido carbono / hectárea} * \text{Tasa deforestación}$$

### 3B Categorías de ordenamiento territorial, sistema PLOTEUS

**Áreas protegidas:** Áreas declaradas legalmente, se encuentran bajo normas técnicas y reglamentarias que determinan el tipo de uso del suelo que se puede hacer del suelo.

**Bosque ribereño:** Cubiertas de los bosques en las márgenes del agua, tienen una función importante en la protección de cauces y bancos de las fuentes de agua..

**Poblados:** Área de influencia de los caseríos, aldeas, municipios y ciudades.

**Producción agropecuaria:** Áreas de vocación agrícola o ganadera por la productividad del suelo y pendiente favorable.

**Producción Forestal:** Por sus características, condiciones de pendiente y capacidad del suelo estas áreas pueden ser sujetas a producción forestal mediante la formulación de planes de manejo forestal.

**Protección:** Áreas que por condiciones de pendientes y suelos sensitivos a la erosión deben ser preservadas de actividades de producción agropecuaria o forestal, o que deben tomarse medidas especiales de conservación de suelos.

**Zonas de producción de agua:** Áreas declaradas de interés forestal por la AFE-COHDEFOR y que deben ser sometidas a regímenes especiales de manejo forestal y uso del suelo.

Fuente: Plan de ordenamiento territorial y uso del suelo, PLOTEUS (Ortiz, 1998).